



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σύνθεση Διαδικτυακών Υπηρεσιών μέσω
Σχεδιασμού Ενεργειών

Ουρανία Ι. Χατζή

ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ 2009

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σύνθεση Διαδικτυακών Υπηρεσιών μέσω Σχεδιασμού Ενεργειών
Ουρανία Ι. Χατζή

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δημοσθένης Αναγνωστόπουλος,
Αναπληρωτής Καθηγητής Χαροκοπείου Πανεπιστημίου

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δημοσθένης Αναγνωστόπουλος,
Αναπληρωτής Καθηγητής Χαροκοπείου Πανεπιστημίου
Μαρία Νικολαΐδη,
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Χαροκοπείου Πανεπιστημίου
Νικόλαος Βασιλειάδης,
Επίκουρος Καθηγητής Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ιωάννης Βλαχάβας,
Καθηγητής Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, εξεταστής
Γεώργιος Καραμπατζός,
Καθηγητής Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, εξεταστής
Ανδρέας Κυριακούσης,
Καθηγητής Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, εξεταστής
Δημοσθένης Αναγνωστόπουλος,
Αναπληρωτής Καθηγητής Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, επιβλέπων
Νικόλαος Βασιλειάδης,
Επίκουρος Καθηγητής Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, μέλος τριμελούς
Μαρία Νικολαΐδη,
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, μέλος τριμελούς
Δημήτριος Βράκας,
Λέκτορας Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, εξεταστής

*Στους γονείς μου, Γιάννη και Αναστασία,
στον αδερφό μου Βαγγέλη
και στον Μιχάλη*

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής ξεκίνησε στο Τμήμα Γεωγραφίας του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου τον Οκτώβριο του 2005 και συνεχίστηκε από το Δεκέμβριο του 2007 στο νεοϊδρυθέν Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεματικής, όπου και ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2009. Η διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο ΠΕΝΕΔ σε συνεργασία με το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Το έργο υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα - Γ΄ Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης και χρηματοδοτήθηκε κατά το 75% από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και κατά το 25% από το Ελληνικό Δημόσιο (Υπουργείο Ανάπτυξης - Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας).

Σε αυτό το σημείο επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους των οποίων η συμβολή ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής μου:

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω και να εκφράσω την ειλικρινή μου εκτίμηση στον επιβλέποντά μου, Αναπληρωτή Καθηγητή Δημοσθένη Αναγνωστόπουλο, για την καθοδήγησή του, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ενταχθώ στο ευχάριστο περιβάλλον του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Μάρα Νικολαΐδου, η οποία διετέλεσε μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής μου, για την πολύπλευρη υποστήριξή της και τις επιστημονικές συμβουλές της σε μια μεγάλη ποικιλία τομέων, χωρίς τη βοήθεια της οποίας η εκπόνηση της διατριβής θα ήταν πολύ πιο δύσκολη σε πολλά επίπεδα.

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης Νικόλαο Βασιλειάδη, ο οποίος διετέλεσε επίσης μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής μου, για την άψογη συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια από την πτυχιακή μου εργασία μέχρι την παρούσα διδακτορική διατριβή, για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του, και για την ηρεμία που εκπέμπει.

Επιθυμώ επίσης να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης Ιωάννη Βλαχάβα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από τα φοιτητικά μου

ακόμα χρόνια στο Τμήμα Πληροφορικής του ΑΠΘ, δίνοντάς μου την ευκαιρία να δραστηριοποιηθώ και να εξελιχθώ ερευνητικά, για το ενδιαφέρον του και για την υποστήριξή του για την ολοκλήρωση αυτής της διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το Λέκτορα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης Δημήτρη Βράκα όχι μόνο για την ουσιαστική βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής και την αξιοθαύμαστη ψυχραιμία του, που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο, αλλά και για τα εμπνευσμένα ακρωνύμια που μου υπέδειξε.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τους ερευνητές του Εργαστηρίου Προγραμματισμού και Τεχνολογίας Λογισμικού του Τμήματος Πληροφορικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης για τη φιλοξενία τους κατά τις επισκέψεις μου στο ανωτέρω εργαστήριο και ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γεώργιο Μεδίτσκο για την άποψη συνεργασία μας και την άμεση απόκρισή του στα θέματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συνάδελφους και συνεργάτες στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο για τη δημιουργία θετικού κλίματος, την υποστήριξη και την υπομονή τους, ιδιαίτερα κατά τους τελευταίους μήνες της συγγραφής της διατριβής.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου Γιάννη και Αναστασία και τον αδερφό μου Βαγγέλη, για την ηθική υποστήριξη, την υπομονή, την κατανόηση και την αγάπη τους, και κυρίως επειδή χωρίς τη συμπαράστασή τους δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής.

Περίληψη

Οι διαδικτυακές υπηρεσίες σήμερα αποτελούν ουσιαστικά τμήματα του Παγκόσμιου Ιστού, καθώς αυτός τείνει να μετατραπεί από μια απλή συλλογή κειμένων σε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον, σημαντικό τμήμα του οποίου σχετίζεται με την προσφορά υπηρεσιών. Οι απαιτήσεις για ολοκληρωμένη προσφορά υπηρεσιών, σε πολλές περιπτώσεις, δεν καθίσταται δυνατό να ικανοποιηθούν από μια απλή διαδικτυακή υπηρεσία, με αποτέλεσμα την ανάγκη για σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών, διαδικασία που καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη, χρονοβόρα και μη αποδοτική με την συνεχή αύξηση του αριθμού των διαθέσιμων ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών. Για αυτόν τον λόγο, η δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας σύνθεσης αποδεικνύεται ιδιαίτερα σημαντική. Η αυτοματοποίηση της σύνθεσης των διαδικτυακών υπηρεσιών διευκολύνεται σημαντικά με την ύπαρξη του Σημασιολογικού Ιστού, αφού η ύπαρξη σημασιολογικής πληροφορίας δίνει τη δυνατότητα σύνθεσης με χρήση ευφών τεχνικών, όπως ο σχεδιασμός ενεργειών.

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η μελέτη και εφαρμογή του σχεδιασμού ενεργειών για την αυτοματοποιημένη σύνθεση σημασιολογικών διαδικτυακών υπηρεσιών, η οποία υποστηρίχθηκε μέσω της σχεδίασης και υλοποίησης ολοκληρωμένων συστημάτων λογισμικού. Η συμβολή της διατριβής εντοπίζεται τόσο στον τομέα της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, όσο και στον τομέα του σχεδιασμού ενεργειών.

Όσον αφορά τον τομέα της σύνθεσης, στο πλαίσιο της διατριβής αναπτύχθηκε και προτάθηκε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, η οποία εκτείνεται σε όλα τα στάδια από την αναπαράσταση του προβλήματος σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών ως πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών και τον εμπλουτισμό του με σημασιολογική πληροφορία, έως την επίλυσή του με χρήση εξωτερικών συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Ανάμεσα στα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης συγκαταλέγονται η απλή και φυσική κωδικοποίηση του προβλήματος, η ανεξαρτητοποίηση της αναπαράστασης του προβλήματος από τη διαδικασία επίλυσής του, κάτι που προσδίδει αυξημένη ευελιξία, η δυνατότητα κλιμάκωσης καθώς και η αυξημένη διαλειτουργικότητα που οφείλεται στη συμμόρφωση με τα τρέχοντα πρότυπα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συνεισφορά της διατριβής υπήρξε καινοτόμα σε ζητήματα που σχετίζονται με την αξιοποίηση της σημασιολογικής πληροφορίας κατά την επίλυση του προβλήματος, την αποτίμηση της ποιότητας των σύνθετων υπηρεσιών, και τη δυνατότητα τροποποίησης των σύνθετων υπηρεσιών που λαμβάνονται ως λύσεις, μέσω αντικατάστασης ατομικών υπηρεσιών. Οι παραπάνω τομείς έρευνας συνδυάστηκαν, υλοποιήθηκαν προγραμματιστικά και ολοκληρώθηκαν στο σύστημα

PORSCE, το οποίο επιτελεί το έργο της αυτόματης σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών με σημασιολογική επίγνωση χρησιμοποιώντας τεχνικές σχεδιασμού ενεργειών.

Στον τομέα του σχεδιασμού ενεργειών, σημαντική είναι η συνεισφορά της διατριβής στη διευκόλυνση της μοντελοποίησης, κωδικοποίησης και συντήρησης πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών, μέσω εύχρηστων ολοκληρωμένων γραφικών διεπαφών. Επιπλέον συμβολή αποτελεί η ανεξαρτητοποίηση της αναπαράστασης του προβλήματος από την επίλυσή του, που έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη ευελιξία στην επιλογή αλγορίθμου σχεδιασμού ενεργειών, και δίνει τη δυνατότητα εκμετάλλευσης των σύγχρονων ερευνητικών εξελίξεων στον τομέα αυτό. Τα δύο αυτά ζητήματα καλύπτονται από το σύστημα VLEPPO, το οποίο σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε επίσης στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Το VLEPPO παρέχει ένα εύχρηστο γραφικό περιβάλλον και διαλειτουργικότητα με τα τρέχοντα πρότυπα, ενώ η ευελιξία επιλογής συστήματος σχεδιασμού ενεργειών για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος υλοποιείται με χρήση της τεχνολογίας των διαδικτυακών υπηρεσιών.

Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφονται συνοπτικά βασικές έννοιες για τις διαδικτυακές υπηρεσίες και τη σύνθεσή τους, καθώς και η συμβολή της διδακτορικής διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται συνοπτικά ο σχεδιασμός ενεργειών, που αποτελεί την ευφυή τεχνική που επιλέχθηκε στην παρούσα προσέγγιση για τη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται για περιγραφή, επικοινωνία και ανακάλυψη διαδικτυακών υπηρεσιών. Επίσης, κατηγοριοποιούνται οι προσεγγίσεις που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία για τη σύνθεσή τους και ανάμεσά τους τοποθετείται η παρούσα διατριβή.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η έρευνα για την εφαρμογή τεχνικών σχεδιασμού ενεργειών για επίλυση του προβλήματος της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, ενώ παράλληλα περιγράφεται και η αντίστοιχη προγραμματιστική υλοποίηση από την οποία προέκυψε το σύστημα PORSCE

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το δεύτερο σύστημα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, το VLEPPO, το οποίο επιχειρεί να προσεγγίσει θέματα που άπτονται όχι μόνο της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών αλλά και του σχεδιασμού ενεργειών γενικότερα.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 εκθέτονται τα συμπεράσματα της διδακτορικής διατριβής, καθώς και μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας που προβλέπεται να μελετηθούν στο προσεχές διάστημα.

Extended Abstract

Web services nowadays are essential parts of the World Wide Web, as it transforms from a simple collection of documents to an integrated environment, where services play an important role. The need for integrated service functionality in many cases cannot be met by a simple atomic web service, which leads to the requirement for web service composition, a task that becomes significantly difficult, time-consuming and inefficient as the number of available atomic services increases continuously. Therefore, the possibility to automate web service composition is proved crucial. The automated web service composition is significantly facilitated by the development of the Semantic Web, since the existence of semantic information permits composition using intelligent techniques, such as planning.

The object of this dissertation is the study and application of planning for automated semantic web service composition. The research is supported by the design and development of integrated software systems. The contribution of the dissertation focuses on both the areas of web service composition and automated planning.

As far as web service composition is concerned, an integrated approach was developed and proposed, which extends from the representation of the web service composition problem as a planning problem and its enhancement with semantic information, to acquiring solutions the problem using external planning systems. The prominent advantages of this approach include the simple and natural representation of the problem, the independence of problem representation from the solution process, which results in increased flexibility, the capability of scaling and the increased interoperability due to conformation to the current standards. The contribution of the dissertation was also novel in issues concerning the utilization of semantic information during problem solving, complex services quality assessment, and the possibility for complex service modification through simple service replacement. The aforementioned aspects were combined, implemented and integrated in the PORSCE system, which automatically composes web services under semantic awareness using automated planning techniques.

The contribution of the dissertation in the area of automated planning focuses on the facilitation of modeling, encoding and maintaining of planning domains and problems through the use of convenient integrated visual interfaces. Moreover, the independence of the problem representation from the solving process, which results in increased flexibility in the selection of

planning algorithm, is a very important aspect of this research, which provides the possibility to exploit current developments of research in the area of planning. These two aspects are covered by the VLEPPO system, which offers a convenient visual environment and interoperability with the current standards, while the flexibility in selecting planning system is implemented using the web services technology.

Chapter 1 describes basic concepts about web services and their composition, as well as the contribution of the dissertation.

In Chapter 2, AI planning is briefly presented, as it is the intelligent technique used in this approach for web service composition.

In Chapter 3, standards for web service description, communication and discovery are described. Furthermore, the approaches which can be found in the literature for web service composition are presented along with the approach of this dissertation.

In Chapter 4, the research concerning the application of planning for web service composition is discussed. Moreover, the programming implementation of this research is presented, which resulted in the development of the PORSCE system.

In Chapter 5, the second system developed in the context of this dissertation is presented. The VLEPPO system attempts to solve issues concerning not only web service composition but also AI planning in general.

Finally, Chapter 6 contains conclusions of this dissertation and future research directions.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
EXTENDED ABSTRACT.....	11
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
1.1. ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ.....	17
1.2. ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ.....	19
1.3. ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ.....	21
1.4. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	23
1.5. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ.....	28
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	28
2.2. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΓΝΩΣΗΣ.....	29
2.2.1. Ο φορμαλισμός STRIPS.....	29
2.2.2. Η γλώσσα ορισμού PDDL.....	31
2.2.3. Παράδειγμα κωδικοποίησης προβλήματος.....	37
2.3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ.....	41
2.4. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΠΛΑΝΩΝ	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ	48
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	48
3.2. ΜΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΓΛΩΣΣΕΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	54
3.2.1. BPEL4WS.....	55
3.2.2. WSCI.....	56
3.2.3. WS-CDL.....	57
3.2.4. WSCL.....	58
3.2.5. BPML.....	58
3.2.6. BPMN / XPDL	59
3.3. ΗΜΙ-ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΘΕΣΗΣ.....	59
3.4. ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	61
3.4.1. Σχεδιασμός σε Ιεραρχικά Δίκτυα Διεργασιών.....	66
3.4.2. Σχεδιασμός ενεργειών με Εκτίμηση Αναγωγής.....	67
3.4.3. Σχεδιασμός με Έλεγχο Μοντέλων.....	68
3.4.4. Λογισμός Καταστάσεων.....	71
3.4.5. Σχεδιασμός με χρήση κανόνων.....	72

3.4.6. Υβριδικός Σχεδιασμός.....	73
3.4.7. Απόδειξη Θεωρημάτων.....	74
3.4.8. Μετασχηματισμός προβλήματος και σύνθεση μέσω κλασικού σχεδιασμού ενεργειών	75
3.5. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΜΕΣΩ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ PORSCE..... 84

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	84
4.2. ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	86
4.3. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ	88
4.4. ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	91
4.4.1. Συλλογιστική πάνω στις οντολογίες του πεδίου ορισμού (<i>Domain Ontology Reasoning</i>)	92
4.4.1.1 Δημιουργία ομάδων οντολογιών.....	93
4.4.2. Σχετικότητα μεταξύ εννοιών	95
4.4.2.1 Ιεραρχικά Φίλτρα.....	96
4.4.2.2. Σημασιολογική απόσταση μεταξύ εννοιών (<i>Semantic Concept Distance</i>).....	97
4.4.2.3. Τυπικοί ορισμοί της σχετικότητας εννοιών	99
4.5. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	101
4.5.1. Αναπαράσταση προβλήματος	102
4.5.2. Σημασιολογική Επίγνωση και Σημασιολογική Χαλάρωση.....	105
4.6. ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	109
4.7. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ	111
4.8. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ	113
4.9. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	114
4.9.1. Οργάνωση Ταξιδιού.....	116
4.9.2. Ηλεκτρονική Αγορά Βιβλίου	121
4.10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	131

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ VLEPPO..... 134

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	134
5.2. ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ	135
5.3. ΠΡΟΣΦΕΡΟΜΕΝΗ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ	139
5.3.1. Οντότητες και Συσχετίσεις στα Πεδία Ορισμού.....	139
5.3.2. Αναπαράσταση Τελεστών.....	141
5.3.3. Αναπαράσταση Προβλημάτων	144
5.3.4. Εξελεγμένα Χαρακτηριστικά.....	145
5.3.5. Αναπαράσταση Πλάνων.....	148
5.3.6. Συντακτικός Έλεγχος και Έλεγχος Εγκυρότητας	149
5.4. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΕΞΑΓΩΓΗΣ	150
5.4.1. Εξαγωγή σε PDDL.....	150
5.4.2. Εισαγωγή από PDDL.....	152
5.4.3. Λειτουργίες αποθήκευσης και ανάκτησης.....	153
5.5. ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ	153

5.5.1. Διασύνδεση με συστήματα σχεδιασμού ενεργειών υλοποιημένα σαν διαδικτυακές υπηρεσίες	153
5.5.2. Τοπική Επίλυση Προβλημάτων Σχεδιασμού Ενεργειών	156
5.6. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ.....	156
5.6.1. Κλασικό Πρόβλημα Σχεδιασμού Ενεργειών	156
5.6.2. Σύνθεση Διαδικτυακών Υπηρεσιών	159
5.7. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ VLEPPO ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΑΛΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	163
5.8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	166
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ.....	168
6.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	168
6.2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ.....	171
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	174
ΟΡΟΛΟΓΙΑ.....	188

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1. Διαδικτυακές υπηρεσίες

Οι διαδικτυακές υπηρεσίες (web services) σήμερα αποτελούν δομικά συστατικά στοιχεία του Παγκόσμιου Ιστού (World Wide Web), καθώς αυτός τείνει να μετατραπεί από μια απλή συλλογή κειμένων σε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον, σημαντικό τμήμα του οποίου σχετίζεται με την προσφορά υπηρεσιών. Για την επιτυχημένη αλληλεπίδραση των πληροφοριακών συστημάτων στον Παγκόσμιο Ιστό είναι αναγκαία η επικοινωνία και η συνεργασία μεταξύ ετερογενών συστημάτων που βασίζονται σε διαφορετικές τεχνολογίες. Οι διαδικτυακές υπηρεσίες στοχεύουν στην απλοποίηση τέτοιου είδους αλληλεπιδράσεων, ορίζοντας έναν πρότυπο μηχανισμό για την περιγραφή, τον εντοπισμό και την επικοινωνία μεταξύ πληροφοριακών συστημάτων που εκτίθενται και λειτουργούν στο Διαδίκτυο (Internet). Με τη χρήση της τεχνολογίας αυτής, είναι πρακτικά εφικτός ο μετασχηματισμός και η έκθεση οποιασδήποτε εφαρμογής ως διαδικτυακής, στην οποία μπορούν να έχουν πρόσβαση άλλα συστήματα χρησιμοποιώντας ανοικτά και σαφώς ορισμένα πρότυπα που έχουν συσταθεί από το World Wide Web Consortium [W3C WS]. Σύμφωνα με το μοντέλο των διαδικτυακών υπηρεσιών, ο Παγκόσμιος Ιστός λειτουργεί ως ενδιάμεσο λογισμικό για την ολοκλήρωση ετερογενών εφαρμογών και περιβαλλόντων.

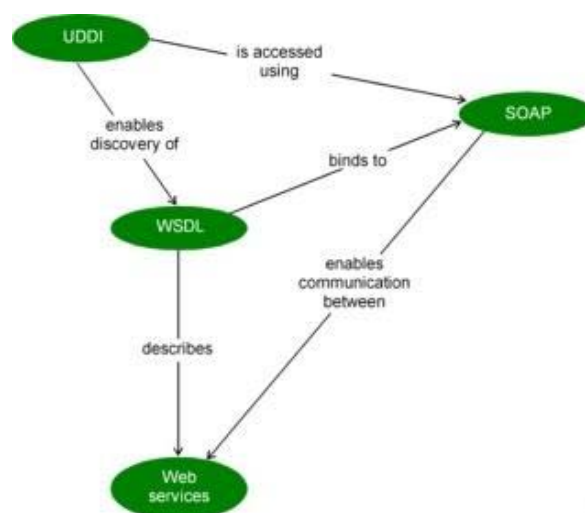
Η πρόσβαση σε κάποια διαδικτυακή υπηρεσία επιτυγχάνεται μέσω ενός Ενιαίου Προσδιοριστή Πόρων (Universal Resource Identifier - URI), ενώ η ίδια η υπηρεσία ορίζεται και περιγράφεται από γλώσσες βασισμένες στην XML, όπως η Web Service Description Language (WSDL) [WSDL]. Η WSDL περιγράφει τις διεπαφές της διαδικτυακής υπηρεσίας, δηλαδή τις πληροφορίες οι οποίες θα πρέπει να είναι ορατές και διαθέσιμες ώστε να πραγματοποιηθεί η επικοινωνία μαζί της, αλλά περιορίζεται μόνο στη συντακτική τους περιγραφή. Η ίδια η διαδικτυακή υπηρεσία αντιμετωπίζεται ως μια απομακρυσμένη υλοποίηση αυτών των διεπαφών, που είναι ανεξάρτητη από πλατφόρμα υλοποίησης.

Οι διαδικτυακές υπηρεσίες μπορούν να δημοσιευθούν και να ανακαλυφθούν μέσω μητρώων UDDI (Universal Description, Discovery and Integration) [UDDI]. Τα μητρώα UDDI παρέχουν

μια πρότυπη πλατφόρμα που επιτρέπει τον εντοπισμό διαδικτυακών υπηρεσιών με γρήγορο, εύκολο και δυναμικό τρόπο. Τα μητρώα UDDI περιέχουν εγγραφές των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών και παρέχουν τεχνικές πληροφορίες για τον τρόπο πρόσβασης και χρήσης των υπηρεσιών, όπως επίσης και κατηγοριοποίηση των διαδικτυακών υπηρεσιών.

Χρήστες, συστήματα λογισμικού ή ευφυείς πράκτορες (intelligent agents) που εντοπίζουν μια διαδικτυακή υπηρεσία μέσω ενός μητρώου UDDI μπορούν να αλληλεπιδράσουν με αυτήν χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SOAP (Simple Object Access Protocol) [SOAP]. Τα μηνύματα SOAP μεταφέρονται μέσω πρωτοκόλλων μεταφοράς (transfer protocols) στο Διαδίκτυο όπως το HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) [Booth et al., 2003]. Το SOAP βασίζεται στην XML και παρέχει το βασικό πλαίσιο για τη σύνταξη μηνυμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανακάλυψη και την επικοινωνία με τις διαδικτυακές υπηρεσίες.

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των προαναφερθέντων προτύπων συνοψίζονται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των προτύπων WSDL, UDDI και SOAP [SOASPECS].

Το τρέχον πρότυπο περιγραφής διαδικτυακών υπηρεσιών WSDL λειτουργεί καθαρά στο συντακτικό επίπεδο και επομένως σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι σε θέση να αποτυπώσει τις απαιτήσεις και τις δυνατότητες μιας διαδικτυακής υπηρεσίας, για παράδειγμα τις εισόδους και τις εξόδους της, με τρόπο κατανοητό τόσο από τον άνθρωπο όσο και από τον υπολογιστή. Η προσθήκη σημασιολογικών (semantic) πληροφοριών στην περιγραφή των διαδικτυακών υπηρεσιών έχει ως αποτελέσματα βελτιωμένες δυνατότητες ανακάλυψής τους, και τη διευκόλυνση της αυτοματοποίησης διαδικασιών σχετικών με τη διαχείριση των διαδικτυακών υπηρεσιών, όπως για παράδειγμα τη σύνθεση, την εκτέλεση και τη συνεργασία. Επιπλέον, μπορεί να διευκολύνει τη μετατροπή υπαρχόντων εφαρμογών σε διαδικτυακές υπηρεσίες, με

απώτερο στόχο την ολοκλήρωση επιχειρησιακών διαδικασιών (business process integration) [Piccinelli, 1999].

Για την κάλυψη της ανάγκης προσθήκης σημασιολογικών πληροφοριών προτάθηκαν νέες γλώσσες περιγραφής διαδικτυακών υπηρεσιών, όπως η SAWSDL (Semantic Annotations for Web Service Description Language) [SAWSDDL] και η WSDL-S (Web Service Description Language - Semantics) [WSDL-S], που στην πλειοψηφία τους είναι συμβατές και λειτουργούν συμπληρωματικά με τα τρέχοντα πρότυπα για συντακτική περιγραφή των υπηρεσιών. Πέραν από τις σημασιολογικές πληροφορίες που εισάγονται με αυτές τις γλώσσες, η σημασιολογική επέκταση των διαδικτυακών υπηρεσιών, πρέπει να υποστηριχθεί από οντολογίες (ontologies). Οι οντολογίες εμπλουτίζουν τις σημασιολογικές πληροφορίες απεικονίζοντας τις συσχετίσεις μεταξύ των εννοιών που χρησιμοποιούνται για να αποδώσουν τη σημασιολογία των διαδικτυακών υπηρεσιών. Η OWL-S [OWL-S], γνωστή ως DAML-S στην πρώτες εκδόσεις της, είναι μια οντολογία για διαδικτυακές υπηρεσίες βασισμένη στην OWL (Web Ontology Language) [OWL], η οποία παρέχει ένα σύνολο γλωσσικών δομών επισήμανσης (markup language constructs) για τη σημασιολογική περιγραφή των ιδιοτήτων και δυνατοτήτων των διαδικτυακών υπηρεσιών. Η OWL-S έχει επιλεγθεί και χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο της προσέγγισης, που θα περιγραφεί στην παρούσα διδακτορική διατριβή, λόγω της επικράτησής της ως πρότυπο για τη σημασιολογική περιγραφή διαδικτυακών υπηρεσιών.

1.2. Σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών

Όταν οι απαιτήσεις των χρηστών για την ολοκλήρωση μιας συναλλαγής δεν είναι δυνατό να ικανοποιηθούν από μία συγκεκριμένη υπηρεσία, είναι απαραίτητη η *σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών (web service composition)*, συνδυάζοντας ατομικές διαδικτυακές υπηρεσίες ώστε να δημιουργηθούν σύνθετες με νέα λειτουργικότητα και αυξημένες δυνατότητες. Η σύνθεση των διαδικτυακών υπηρεσιών αναφέρεται στη δυνατότητα συνδυασμού υπαρχόντων υπηρεσιών για να δημιουργηθούν νέες [Piccinelli, 1999; Alonso et al, 2004] και κερδίζει συνεχώς έδαφος σαν ένα νέο μοντέλο αλληλεπίδρασης μεταξύ κατανεμημένων και ετερογενών εφαρμογών και συστημάτων. Για την ορθή και ουσιαστική ολοκλήρωση των εφαρμογών δεν επαρκεί η απλή υποστήριξη των αλληλεπιδράσεων με πρότυπα μηνυμάτων και πρωτόκολλα [Aalst, 2003] όπως το SOAP και η WSDL, αλλά πρέπει να καθοριστούν περισσότερα στοιχεία σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις, όπως η σειρά με την οποία ανταλλάσσονται αυτά τα μηνύματα και εκτελούνται οι διεργασίες, οι κανόνες συντονισμού μεταξύ των υπηρεσιών, η λογική των αλληλεπιδράσεων και ο χειρισμός λαθών ή εξαιρέσεων (exceptions). Για αυτόν το λόγο έχουν

αναπτυχθεί γλώσσες σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, όπως οι WSFL (Web Services Flow Language) [Leymann, 2001], XLANG [Thatte, 2001] και BPEL4WS (Business Process Execution Language for Web Services) [Thatte, 2003].

Η σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ολοκλήρωση επιχειρησιακών διεργασιών, καθώς και στις περιπτώσεις που η λειτουργικότητα που προσφέρεται από ατομικές υπηρεσίες δεν επαρκεί. Ωστόσο η διαδικασία σύνθεσης αναμένεται να γίνεται όλο και δυσκολότερη, χρονοβόρα και μη αποδοτική, καθώς η πολυπλοκότητα του προβλήματος σύνθεσης αυξάνεται συνεχώς με την αύξηση του αριθμού των διαθέσιμων ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών. Για αυτόν το λόγο, η δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας σύνθεσης αποδεικνύεται ένας σημαντικός παράγοντας για την επιβίωση των διαδικτυακών υπηρεσιών στον επιχειρηματικό κόσμο [Bassiliades et al., 2005].

Η αυτοματοποίηση της σύνθεσης των διαδικτυακών υπηρεσιών διευκολύνεται σημαντικά με την ύπαρξη του Σημασιολογικού Ιστού (Semantic Web) [Berners-Lee et al., 2001], στο πλαίσιο του οποίου περιλαμβάνεται ρητή αναπαράσταση του νοήματος της πληροφορίας και του περιεχομένου των κειμένων (σημασιολογική πληροφορία). Αυτό επιτρέπει τον αυτόματο και ακριβή εντοπισμό πληροφορίας ιστού, όχι μόνο με συντακτικά αλλά και με σημασιολογικά κριτήρια, καθώς και την ανάπτυξη αυτόνομων ευφυών πρακτόρων που διευκολύνουν τη συνεργασία μεταξύ ετερογενών δικτυακών εφαρμογών, εφόσον είναι σε θέση να κατανοήσουν καλύτερα την προσφερόμενη λειτουργικότητα.

Οι διαδικτυακές υπηρεσίες στο πλαίσιο του Σημασιολογικού Ιστού εμφανίζονται πλέον ως *σημασιολογικές διαδικτυακές υπηρεσίες (semantic web services)* και διευκολύνουν την αυτόματη ανακάλυψη, εκτέλεση, παρακολούθηση και σύνθεσή τους [McIlraith et al., 2001] με χρήση κατάλληλων περιγραφών, όπως για παράδειγμα μέσω της OWL-S. Χρησιμοποιώντας οντολογίες καθίσταται δυνατή η κατανόηση της σημασιολογίας των περιγραφών από προγράμματα ή πράκτορες. Ειδικά όσον αφορά τη σύνθεση, η προσθήκη σημασιολογικής πληροφορίας στις περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών δίνει τη δυνατότητα χρήσης τεχνικών από το χώρο της Τεχνητής Νοημοσύνης, όπως για παράδειγμα ο Σχεδιασμός Ενεργειών (AI planning), για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας [Alfredo, 2003].

1.3. Σύντομη ανασκόπηση πεδίου σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών

Η σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών αποτελεί ένα ιδιαίτερα ενεργό πεδίο έρευνας, στο πλαίσιο του οποίου έχουν προταθεί και μελετηθεί πολυάριθμες προσεγγίσεις που κυμαίνονται από μη αυτοματοποιημένες, που απαιτούν παρέμβαση του χρήστη σε κάθε βήμα, έως πλήρως αυτοματοποιημένες, που η παρέμβαση του χρήστη περιορίζεται μόνο στον καθορισμό των απαιτήσεων του σχετικά με την επιθυμητή σύνθετη υπηρεσία [Srivastava and Koehler, 2003; Milanovic and Malek, 2004; Bucchiarone and Gnesi, 2006; Rao and Su, 2004; Dustdar and Schreiner, 2005]. Αρκετές από τις παραπάνω προσεγγίσεις έχουν ακολουθήσει διακριτές μεταξύ τους πορείες [Srivastava and Koehler, 2003].

Ο επιχειρηματικός κόσμος αντιμετωπίζει τις διαδικτυακές υπηρεσίες με μία κατά βάση συντακτική, μη αυτόματη προσέγγιση, σαν απομακρυσμένες κλήσεις διεργασιών (remote procedure calls). Έχει δε αναπτύξει και χρησιμοποιεί ένα σύνολο προτύπων βασισμένων στην XML για τη σύνθεσή τους. Τα νέα πρότυπα έρχονται να συμπληρώσουν αυτά που είναι για ορισμό (WSDL), ανακάλυψη (UDDI) και επικοινωνία (SOAP) των ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών. Τα πρότυπα σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών είναι σχεδιασμένα ώστε να περιγράφουν στατικά τόσο τον τρόπο σύνθεσης όσο και τις συμμετέχουσες ατομικές διαδικτυακές υπηρεσίες. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφουν επιχειρησιακές διεργασίες (business processes) που υλοποιούνται μέσω διαδικτυακών υπηρεσιών, καθορίζοντας τη σειρά εκτέλεσης των λειτουργιών (operations), τη σειρά ανταλλαγής των μηνυμάτων, τα διαμοιραζόμενα δεδομένα, τους διάφορους συμμετέχοντες (partners) στη διεργασία και τον τρόπο με τον οποίον αυτοί εμπλέκονται, καθώς και τον κοινό χειρισμό εξαιρέσεων. Ένα βασικό κοινό χαρακτηριστικό αυτών των προτύπων είναι ο προσανατολισμός τους στον ορισμό αφηρημένων διεργασιών (abstract processes), ή επιχειρησιακών πρωτόκολλων αλληλεπιδράσεων (business interaction protocols). Τα επιχειρησιακά πρωτόκολλα αλληλεπιδράσεων χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τις δημόσιες και ορατές ανταλλαγές μηνυμάτων μεταξύ των διαφορετικών εμπλεκόμενων πλευρών (εταίρων) που λαμβάνουν μέρος σε μια αλληλεπίδραση, χωρίς να αποκαλύπτουν τίποτα για την εσωτερική τους δομή και υλοποίηση. Το πιο αντιπροσωπευτικό και συχνότερα χρησιμοποιούμενο ανάμεσα στα πρότυπα αυτά είναι η γλώσσα BPEL4WS [Thatte, 2003], που προέρχεται από σύγκλιση προγενέστερων προτύπων και αποτελεί μια κοινή προσπάθεια διαφόρων μεγάλων επιχειρήσεων για την τυποποίηση του ορισμού σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών.

Μια ενδιάμεση λύση αποτελούν οι ημι-αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις, οι οποίες επιχειρούν να αυτοματοποιήσουν μόνο ένα μέρος της διαδικασίας σύνθεσης. Σε αυτές τις προσεγγίσεις η περιγραφή του τρόπου σύνθεσης παραμένει στατική, όμως ο εντοπισμός των κατάλληλων υπηρεσιών γίνεται με δυναμικό, αυτοματοποιημένο τρόπο. Αυτές οι προσεγγίσεις συνήθως βασίζονται στον ορισμό ροών εργασίας από το χρήστη, οι οποίες αντιπροσωπεύουν σύνθετες διαδικτυακές υπηρεσίες. Στη συνέχεια εκτελείται αυτόματη αναζήτηση υποψήφιων ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών που θα μπορούσαν να ταυτοποιηθούν με εργασίες της ροής, και ο χρήστης καλείται να επιλέξει ανάμεσά τους τις επιθυμητές, διαμορφώνοντας έτσι ένα πλάνο σύνθεσης. Τέτοιου είδους προσεγγίσεις μειώνουν σημαντικά τους χρόνους σύνθεσης, απαιτούν όμως εκτεταμένη παρέμβαση του χρήστη, κάτι που δεν είναι επιθυμητό, καθώς προϋποθέτει εκ μέρους του καλή γνώση του πεδίου.

Οι αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις στις οποίες έχει στραφεί κατά κύριο λόγο η επιστημονική κοινότητα, και ειδικότερα αυτή του Σημασιολογικού Ιστού, αποτελούν ουσιαστικές βιώσιμες προοπτικές για τη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών. Σε αυτές τις προσεγγίσεις τόσο η διαδικασία σύνθεσης όσο και η επιλογή των κατάλληλων υπηρεσιών γίνεται δυναμικά και αυτοματοποιημένα. Ο αριθμός των διαθέσιμων ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών αυξάνεται συνεχώς με ταχείς ρυθμούς, επομένως οι αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις ελαττώνουν το χρόνο εντοπισμού των κατάλληλων υπηρεσιών και αυξάνουν την αποδοτικότητα της διαδικασίας σύνθεσης [Berardi et al, 2005]. Σε αυτήν την κατηγορία προσεγγίσεων συχνά παρατηρείται ο μετασχηματισμός του προβλήματος της σύνθεσης με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή καλά μελετημένων τεχνικών από το χώρο της Τεχνητής Νοημοσύνης [Carman et al, 2003]. Οι χρήστες στην πλειονότητα των περιπτώσεων διαμορφώνουν μόνο τις απαιτήσεις τους σχετικά με τη σύνθετη υπηρεσία, ενώ ο εντοπισμός των κατάλληλων ατομικών υπηρεσιών και η εναρμόνισή τους γίνεται αυτόματα. Συνήθως οι διαθέσιμες υπηρεσίες περιγράφονται με βάση τις εισόδους και τις εξόδους τους, καθώς και άλλους περιορισμούς που αφορούν την ποιότητα ή την απόδοσή τους, και οι περιγραφές εμπλουτίζονται με σημασιολογικές πληροφορίες. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται ευφυείς τεχνικές, όπως συλλογιστική (reasoning) ή σχεδιασμός ενεργειών (planning) για να αποκτηθεί λύση στο πρόβλημα. Η οργάνωση των σημασιολογικών πληροφοριών σε οντολογίες, προσπάθεια η οποία υποστηρίζεται και από την OWL-S, επιτρέπει την ορθότερη εφαρμογή των τεχνικών Τεχνητής Νοημοσύνης, εφόσον οι τεχνικές αυτές πλέον είναι σε θέση να λάβουν υπόψη τους συσχετίσεις και ισοδυναμίες μεταξύ εννοιών.

Το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής τοποθετείται στο χώρο των αυτοματοποιημένων προσεγγίσεων, καθώς εκτιμάται ότι αποτελούν την καταλληλότερη λύση στο πρόβλημα της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, καθώς απαιτούν την ελάχιστη

παρέμβαση από την πλευρά των χρηστών, και απευθύνονται ακόμα και σε μη ειδικούς του πεδίου των διαδικτυακών υπηρεσιών. Επιπλέον, η προσέγγιση αυτή λαμβάνει υπόψη της τις τρέχουσες τάσεις στο χώρο των διαδικτυακών υπηρεσιών, οι οποίες σχετίζονται όχι μόνο με τη ραγδαία αύξηση του αριθμού τους αλλά και με τη συχνή τροποποίηση του ορισμού τους. Οι αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τα θέματα αυτά καθώς η σύνθεση γίνεται σε πραγματικό χρόνο, με βάση τα δεδομένα που υπάρχουν διαθέσιμα σε κάθε χρονική στιγμή.

1.4. Συμβολή της διδακτορικής διατριβής

Η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής έγκειται στη μελέτη και εφαρμογή της ευφυούς τεχνικής του σχεδιασμού ενεργειών για την αυτοματοποιημένη σύνθεση σημασιολογικών διαδικτυακών υπηρεσιών, η οποία υποστηρίχθηκε μέσω σχεδιασμού και ανάπτυξης ολοκληρωμένων συστημάτων λογισμικού. Η συμβολή της στον τομέα της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών συνοψίζεται στα θέματα της αναπαράστασης του προβλήματος σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, του εμπλουτισμού του προβλήματος με σημασιολογική πληροφορία, της αναπαράστασης και τροποποίησης των σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών, καθώς και της αποτίμησης της ποιότητας των σύνθετων υπηρεσιών. Επιπλέον τομείς συμβολής άπτονται του σχεδιασμού ενεργειών και σχετίζονται με τη διευκόλυνση της γραφικής μοντελοποίησης πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών καθώς και την ευελιξία στην απόκτηση λύσης με χρήση εξωτερικών συστημάτων σχεδιασμού μέσω της τεχνολογίας των διαδικτυακών υπηρεσιών.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, το πρόβλημα της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών αντιμετωπίστηκε ως πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών. Κατ' αρχάς, μελετήθηκαν διάφοροι τρόποι αναπαράστασης και ανάμεσά τους εντοπίστηκε αυτός που μετασχηματίζει το πρόβλημα με τον πιο φυσικό και πιστό τρόπο, διατηρώντας όλα τα στοιχεία του αρχικού προβλήματος. Εφόσον οι είσοδοι του συστήματος, δηλαδή οι σημασιολογικές διαδικτυακές υπηρεσίες, περιγράφονται σε OWL-S, ενώ το πρότυπο που χρησιμοποιείται στα συστήματα σχεδιασμού είναι η γλώσσα περιγραφής πεδίων ορισμού σχεδιασμού ενεργειών PDDL (Planning Domain Definition Language) [Ghallab et al, 1998], φυσική συνέπεια είναι η ανάγκη μετατροπής μεταξύ των δύο προτύπων. Για αυτόν το λόγο αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε η μεθοδολογία μετάφρασης των OWL-S σημασιολογικών περιγραφών των διαδικτυακών υπηρεσιών στη γλώσσα PDDL. Παράλληλα, αναπτύχθηκε η μεθοδολογία μετατροπής των απαιτήσεων σχετικά με τη σύνθετη υπηρεσία σε πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών, περιγεγραμμένο επίσης σε PDDL.

Όσον αφορά την απόκτηση της λύσης, δηλαδή της περιγραφής της επιθυμητής σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας, εξερευνήθηκαν και εφαρμόστηκαν διάφοροι υπάρχοντες αλγόριθμοι σχεδιασμού ενεργειών και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα που παράγουν. Κατά τη διαδικασία σύνθεσης υπηρεσιών μέσω σχεδιασμού ενεργειών προέκυψε η αναγκαιότητα εκμετάλλευσης της σημασιολογικής πληροφορίας που περιέχεται στις περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών. Διαπιστώθηκε ότι επιπλέον σημασιολογικές πληροφορίες είναι δυνατό να εξαχθούν από την επεξεργασία οντολογιών που συνοδεύουν τις σημασιολογικές περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών, και έτσι επιτυγχάνεται όχι μόνο η επίγνωση της σημασιολογίας των εννοιών κατά τη διαδικασία σχεδιασμού, αλλά και η σημασιολογική χαλάρωση, που ενδέχεται να οδηγήσει σε προσεγγιστικές λύσεις σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η εύρεση πλάνου.

Επίσης, μια πρόκληση η οποία προέκυψε κατά τη διαδικασία σύνθεσης και στην οποία προτείνεται λύση μέσα από την παρούσα διατριβή είναι η αντιμετώπιση του ενδεχόμενου μη διαθεσιμότητας ατομικών υπηρεσιών που συμμετέχουν στις σύνθετες διαδικτυακές υπηρεσίες. Βάσει του εμπλουτισμού με σημασιολογική πληροφορία μπορεί να γίνει τροποποίηση της σύνθετης υπηρεσίας, ώστε να αντικατασταθεί η μη διαθέσιμη ατομική υπηρεσία, χωρίς να απαιτείται εκ νέου αναπαράσταση του προβλήματος και επανασχεδιασμός αυτού.

Η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος σύνθεσης μέσω σχεδιασμού ενεργειών έχει σαν έξοδο την περιγραφή της σύνθετης υπηρεσίας. Σε πολλές περιπτώσεις, ωστόσο, η χρήση πολλαπλών συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών καθώς και η σημασιολογική χαλάρωση ενδέχεται να επιστρέψουν περισσότερες της μιας σύνθετες διαδικτυακές υπηρεσίες, διαφορετικές μεταξύ τους. Η συμβολή της διατριβής στο πεδίο της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών ολοκληρώνεται με την πρόταση μετρικών για αποτίμηση της ποιότητας των σύνθετων υπηρεσιών. Τέτοιες μετρικές περιλαμβάνουν εγγενή χαρακτηριστικά του πλάνου που αποτελεί την περιγραφή της σύνθετης υπηρεσίας, όπως αριθμός επιπέδων και βημάτων, αλλά και επιπλέον μετρικές σημασιολογικής απόστασης σε σχέση με την ιδανική επιθυμητή υπηρεσία, σε περίπτωση που η διαδικασία επίλυσης έχει επιστρέψει προσεγγιστικές λύσεις.

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της προσέγγισης αυτής είναι η απλή και φυσική αναπαράσταση του προβλήματος σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών σε πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών, διατηρώντας ταυτόχρονα συμβατότητα με τα πρότυπα που έχουν καθιερωθεί τόσο στις διαδικτυακές υπηρεσίες όσο και στο σχεδιασμό ενεργειών. Επιπλέον, η αναπαράσταση του προβλήματος είναι ανεξάρτητη από την τεχνική ή τον αλγόριθμο σχεδιασμού ενεργειών, επομένως υπάρχει ευελιξία στην επιλογή του τρόπου επίλυσης. Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα επίσης συγκαταλέγεται η σημασιολογική επίγνωση που επιτυγχάνεται με την επεξεργασία

οντολογιών, η οποία με τη σειρά της δίνει τη δυνατότητα σημασιολογικής χαλάρωσης και εύρεσης εναλλακτικών υπηρεσιών.

Οι παραπάνω τομείς έρευνας υλοποιήθηκαν, συνδυάστηκαν και ολοκληρώθηκαν στο σύστημα PORSCE, το οποίο πραγματοποιεί αυτόματη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών με σημασιολογική επίγνωση. Το σύστημα εξάγει το πεδίο ορισμού και το πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών με βάση τις σημασιολογικές περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών σε OWL-S και τις απαιτήσεις του χρήστη για τη σύνθετη υπηρεσία, αποκτά λύσεις, δηλαδή περιγραφές της σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας με χρήση εξωτερικών συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών, και τις αναπαριστά οπτικά. Επιπλέον, το PORSCE διαθέτει υποσύστημα σημασιολογικής ανάλυσης για να εφαρμόζει σημασιολογική χαλάρωση, όπου απαιτείται, όπως για παράδειγμα κατά την τροποποίηση της σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας με αντικατάσταση κάποιας από τις ατομικές υπηρεσίες που περιλαμβάνονται, ενώ επίσης υλοποιεί μέτρα αποτίμησης της ποιότητας των σύνθετων υπηρεσιών.

Ο δεύτερος τομέας συμβολής της διδακτορικής διατριβής αφορά κυρίως στο σχεδιασμό ενεργειών και σχετίζεται με τη διευκόλυνση της μοντελοποίησης, κωδικοποίησης και συντήρησης πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών, μέσω εύχρηστων ολοκληρωμένων γραφικών διεπαφών. Τα γραφικά αυτά περιβάλλοντα όχι μόνο προσφέρουν οπτική βοήθεια στον χρήστη αλλά και εκτελούν ελέγχους εγκυρότητας σε πραγματικό χρόνο ώστε να αποτραπεί η διάδοση τυχόν λαθών και ασυνεπειών στα πεδία ορισμού. Στο ίδιο πλαίσιο εντάσσεται και η ανεξαρτητοποίηση του ορισμού του προβλήματος σχεδιασμού ενεργειών - είτε αυτό έχει προέλθει από πρόβλημα σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών είτε πρόκειται για κλασικό πεδίο - από τους αλγόριθμους και τις τεχνικές σχεδιασμού ενεργειών. Η αποδέσμευση του προβλήματος από τον εκάστοτε αλγόριθμο ή τεχνική επιτρέπει την ουσιαστική αξιοποίηση των νέων εξελίξεων της έρευνας στο χώρο του σχεδιασμού ενεργειών.

Τα δύο αυτά ζητήματα υποστηρίζονται προγραμματιστικά από το σύστημα VLEPPO, το οποίο αναπτύχθηκε επίσης στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Το VLEPPO παρέχει εύχρηστο γραφικό περιβάλλον το οποίο διευκολύνει τη μοντελοποίηση πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Επιπλέον παρέχεται διαλειτουργικότητα με τη PDDL με δυνατότητες εισαγωγής και εξαγωγής, ενώ η ευελιξία επιλογής συστήματος σχεδιασμού ενεργειών για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος γίνεται χρησιμοποιώντας την τεχνολογία των διαδικτυακών υπηρεσιών. Το VLEPPO στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο σε προβλήματα σχεδιασμού που αφορούν τη σύνθεση υπηρεσιών, ωστόσο όμως πρόκειται για ένα σύστημα σχεδιασμού ενεργειών γενικού σκοπού.

1.5. Δομή της διδακτορικής διατριβής

Στο παρόν πρώτο Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν συνοπτικά βασικές έννοιες για τις διαδικτυακές υπηρεσίες και τη σύνθεσή τους, καθώς και η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται συνοπτικά το ερευνητικό πεδίο του σχεδιασμού ενεργειών, καθώς αυτός αποτελεί την ευφυή τεχνική που επιλέχθηκε στην παρούσα προσέγγιση για τη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών. Ανάμεσα σε άλλα, αναφέρονται οι επικρατέστεροι φορμαλισμοί που ακολουθούνται για την αναπαράσταση γνώσης. Όταν αργότερα εξετασθεί ο μετασχηματισμός του προβλήματος της σύνθεσης ως πρόβλημα σχεδιασμού, θα γίνει χρήση κάποιων από αυτούς και αναφορά στα στοιχεία τους. Επίσης, περιλαμβάνεται μια πολύ συνοπτική ανασκόπηση των συστημάτων και τεχνικών σχεδιασμού ενεργειών, καθώς και τρόποι αναπαράστασης των λύσεων.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται στοιχεία για τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή, την επικοινωνία και την ανακάλυψη διαδικτυακών υπηρεσιών. Στη συνέχεια κατηγοριοποιούνται και παρουσιάζονται οι προσεγγίσεις που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία και χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών. Η ανασκόπηση περιλαμβάνει μη αυτοματοποιημένες μεθόδους σύνθεσης, όπως η γλώσσα BPEL4WS, ημι-αυτοματοποιημένες μεθόδους, οι οποίες αν και δεν αποτελούν σημαντικό τμήμα της βιβλιογραφίας αναφέρονται για λόγους πληρότητας, καθώς και αυτοματοποιημένες μεθόδους σύνθεσης, κυρίως μέσω τεχνικών Τεχνητής Νοημοσύνης. Στις αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις συμπεριλαμβάνεται και η προσέγγιση που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή, δηλαδή η σύνθεση μέσω σχεδιασμού ενεργειών. Τέλος, το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με τη σύγκριση της παρούσας εργασίας σε σχέση με άλλες.

Τα Κεφάλαια 4 και 5 αποτελούν την κύρια περιγραφή της πρωτότυπης συμβολής της διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η έρευνα για την εφαρμογή τεχνικών σχεδιασμού ενεργειών για επίλυση του προβλήματος της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, ενώ παράλληλα περιγράφεται και η αντίστοιχη προγραμματιστική υλοποίηση από την οποία προέκυψε το σύστημα PORSCE και η νεότερη έκδοσή του, PORSCE II. Η προσέγγιση που ακολουθείται περιλαμβάνει μετασχηματισμό και αναπαράσταση του προβλήματος της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών σε πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών σύμφωνα με κανόνες. Περιγράφονται η σημασιολογική επίγνωση του συστήματος όσον αφορά τις έννοιες που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό ενεργειών και η σημασιολογική χαλάρωση με χρήση οντολογιών, ώστε να επιτευχθεί πλήρης εκμετάλλευση της σημασιολογικής πληροφορίας που

περιέχεται στις περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών. Ακόμη, περιγράφεται η επίλυση του προβλήματος μέσω εξωτερικών συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών και η ανάκτηση λύσεων (πλάνων). Οι λύσεις στη συνέχεια αναπαρίστανται οπτικά και προσφέρονται προς τροποποίηση από το χρήστη, ενώ η ποιότητά τους αποτιμάται με βάση συγκεκριμένες μετρικές. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση δύο παραδειγμάτων χρήσης του συστήματος, τα οποία αναφέρονται σε διαφορετικά πεδία ορισμού. Με τη βοήθεια αυτών των παραδειγμάτων διευκολύνεται η κατανόηση της λειτουργίας του PORSCE καθώς και της θεωρίας πάνω στην οποία βασίζεται, ενώ επιπλέον παρουσιάζονται μετρήσεις απόδοσης του συστήματος και συγκριτικές μετρήσεις της απόδοσης των δύο εκδόσεων.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το δεύτερο σύστημα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, το VLEPPO, το οποίο επιχειρεί να προσεγγίσει θέματα που άπτονται όχι μόνο του προβλήματος της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών αλλά και του σχεδιασμού ενεργειών γενικότερα, τα οποία δεν προσεγγίζονται από το σύστημα PORSCE. Περιγράφεται πώς το σύστημα VLEPPO διευκολύνει την κατανόηση, σχεδίαση, τροποποίηση και συντήρηση πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Επιπλέον, παρουσιάζεται η αποδέσμευση της αποτύπωσης του προβλήματος από την επίλυσή του, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία των διαδικτυακών υπηρεσιών ως ενδιάμεσο λογισμικό για την ολοκλήρωση εξωτερικών συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών υλοποιημένων ως διαδικτυακών υπηρεσιών. Το κεφάλαιο εμπεριέχει επίσης σχολιασμό για τους λόγους για τους οποίους προέκυψε η ανάπτυξη του συστήματος καθώς και τα πλεονεκτήματα του VLEPPO σε σχέση με άλλα παρεμφερή συστήματα. Επίσης παρουσιάζονται δυο παραδείγματα χρήσης, ένα που αφορά ένα κλασικό πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών ώστε να επιδειχθεί η δυνατότητα χρήσης του VLEPPO σαν σύστημα σχεδιασμού ενεργειών γενικής χρήσης και ένα άλλο που αφορά τη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών ώστε να παρουσιαστεί η συμπληρωματικότητα του VLEPPO με το PORSCE και η χρήση του στο αντικείμενο της παρούσας διατριβής.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 εκθέτονται τα συμπεράσματα της διδακτορικής διατριβής, καθώς και μελλοντικά ερευνητικά θέματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της διατριβής και προβλέπεται να μελετηθούν στο προσεχές διάστημα.

Κεφάλαιο 2

Σχεδιασμός Ενεργειών

2.1. Εισαγωγή

Σχεδιασμός ενεργειών (planning) είναι η διαδικασία εύρεσης μιας ακολουθίας *ενεργειών (actions)*, οι οποίες όταν εκτελεστούν από έναν πράκτορα κατορθώνουν την επίτευξη ενός συνόλου *στόχων (goals)*. Ο σχεδιασμός ενεργειών αποτελεί μια από τις σημαντικές περιοχές της Τεχνητής Νοημοσύνης που είναι ενεργή ερευνητικά για πάνω από τέσσερις δεκαετίες, και δίνει τη δυνατότητα αυξημένης αυτονομίας και ευελιξίας σε συστήματα και ευφυείς πράκτορες (*intelligent agents*), ειδικά όταν αυτοί δρουν σε δυναμικά περιβάλλοντα. Ο σχεδιασμός ενεργειών έχει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογής σε προβλήματα πραγματικού κόσμου, ανάμεσα στα οποία περιλαμβάνονται η ρομποτική, προβλήματα εφοδιαστικής (*logistics*), κατασκευαστικά προβλήματα, προβλήματα διαστημικών αποστολών, πλοήγησης, στρατηγικής κλπ.

Ο σχεδιασμός ενεργειών ενδείκνυται για προβλήματα που χαρακτηρίζονται από υψηλή πολυπλοκότητα και μεγάλους χώρους αναζήτησης, επομένως οι απλοί αλγόριθμοι αναζήτησης αποδεικνύονται ανεπαρκείς για την αποδοτική επίλυσή τους [Βλαχάβας κ.α., 2006]. Εναλλακτικές τεχνικές επίλυσης προβλημάτων που εμπίπτουν στο πλαίσιο του σχεδιασμού ενεργειών έχουν αναπτυχθεί, όπως ο μη γραμμικός σχεδιασμός (*non-linear planning*), ο σχεδιασμός βασισμένος σε γράφους (*graph-based planning*) και ο ιεραρχικός σχεδιασμός (*hierarchical planning*), ενώ τα συστήματα λογισμικού που υλοποιούν αυτούς τους αλγόριθμους ονομάζονται *συστήματα σχεδιασμού ενεργειών (planning systems)* ή απλούστερα *σχεδιαστές (planners)*.

Στην γενική περίπτωση ένα πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών αναπαρίσταται από την αρχική κατάσταση του κόσμου, την τελική του κατάσταση καθώς και το σύνολο των επιτρεπτών ενεργειών που έχει στη διάθεσή του ο ευφυής πράκτορας, και οι οποίες χρησιμοποιούνται για μετάβαση από μία κατάσταση σε μια νέα. Το αποτέλεσμα της επίλυσης του προβλήματος, που ονομάζεται *πλάνο (plan)*, αποτελεί ένα σύνολο ενεργειών, πλήρως ή μερικώς διατεταγμένων

μεταξύ τους, οι οποίες αν εφαρμοστούν στην αρχική κατάσταση παράγουν την επιθυμητή τελική κατάσταση.

2.2. Αναπαράσταση Γνώσης

Ο όρος *αναπαράσταση γνώσης (knowledge representation)* αφορά τη συστηματική κωδικοποίηση του συνόλου των διαθέσιμων πληροφοριών για τον κόσμο που έχουν σημασία για το πρόβλημα προς αντιμετώπιση. Το *πεδίο ορισμού (domain)* που προκύπτει αναπαριστά με φορμαλιστικό τρόπο τα στοιχεία του κόσμου που θα χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή προβλημάτων. Ο φορμαλισμός που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της γνώσης παίζει καθοριστικό ρόλο στα είδη των προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών που μπορούν να αναπαρασταθούν και να επιλυθούν, καθώς ο κάθε φορμαλισμός έχει ένα δεδομένο βαθμό εκφραστικότητας και πολυπλοκότητας. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός γλωσσών και προτύπων περιγραφής προβλημάτων σχεδιασμού, όπως για παράδειγμα η προτασιακή λογική ή η κατηγορηματική λογική πρώτης τάξης [Hamilton, 1978]. Είναι προφανές ότι όσο πιο εκφραστική είναι μια γλώσσα, τόσο μεγαλύτερο εύρος προβλημάτων είναι σε θέση να αναπαραστήσει, επομένως διευκολύνει την αναπαράσταση σύνθετων συστημάτων και εννοιών του πραγματικού κόσμου. Ωστόσο, ο χρόνος που απαιτείται για την επίλυση των προβλημάτων κατά κανόνα αυξάνει με την πολυπλοκότητα της γλώσσας, καθώς αυξάνει η υπολογιστική πολυπλοκότητα (computational complexity) των αλγορίθμων που εφαρμόζονται κατά την επίλυση [Bylander, 1994].

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι πιο σημαντικοί φορμαλισμοί που έχουν επικρατήσει για την αναπαράσταση πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών, εφόσον στοιχεία αυτών των φορμαλισμών θα χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση της διαδικασίας σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών ως πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών.

2.2.1. Ο φορμαλισμός STRIPS

Ο φορμαλισμός STRIPS (Stanford Research Institute Planning System) αποτελεί τη βάση για την αναπαράσταση πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών στα περισσότερα κλασικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών [Fikes and Nilson, 1971], λόγω της απλότητας και της φυσικότητάς του. Ένα πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών στο φορμαλισμό STRIPS αναπαρίσταται σαν μια τριάδα $\langle I, A, G \rangle$, όπου το I είναι η αρχική κατάσταση (initial state), A είναι ένα σύνολο από διαθέσιμες ενέργειες (actions) και G ένα σύνολο στόχων (goals).

Οι καταστάσεις αναπαρίστανται σαν ένα σύνολο *κατηγορημάτων* (*predicates*), που βασίζονται σε κατηγορηματική λογική πρώτης τάξης. Όλα τα στοιχεία της αρχικής κατάστασης του κόσμου που έχουν κάποια σημασία για το πρόβλημα πρέπει να δηλωθούν ρητά στην αρχική κατάσταση I. Η κατάσταση I μπορεί να περιέχει στατική αλλά και δυναμική πληροφορία. Για παράδειγμα, στην κατάσταση I ενδέχεται να δηλώνεται ότι τα αντικείμενα A και B είναι κύβοι, το οποίο είναι παράδειγμα στατικής πληροφορίας, δηλαδή πληροφορίας η οποία θεωρείται ότι παραμένει αμετάβλητη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ενεργειών. Ταυτόχρονα όμως, στην κατάσταση I ενδέχεται να δηλώνεται ότι ο κύβος A βρίσκεται αρχικά πάνω στον κύβο B, το οποίο είναι παράδειγμα δυναμικής πληροφορίας, που αναμένεται να αλλάξει κάποια στιγμή κατά τη διάρκεια σχεδιασμού ενεργειών.

Η κατάσταση G, από την άλλη πλευρά, δεν είναι πλήρης (*complete*). Η G δεν είναι απαραίτητο να διευκρινίζει την τελική κατάσταση όλων των αντικειμένων του προβλήματος, είτε επειδή αυτή υπονοείται από τα συμφραζόμενα, είτε επειδή η τελική κατάσταση κάποιων αντικειμένων δεν έχει σημασία για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Έστω ένα παράδειγμα, από το πεδίο της εφοδιαστικής (*logistics*) [McDermott, 1998], στο οποίο υπάρχουν δέματα που πρέπει να μεταφερθούν από κάποιες τοποθεσίες σε άλλες, χρησιμοποιώντας διάφορα μέσα μεταφοράς. Η τελική τοποθεσία αυτών των μέσων μεταφοράς συνήθως παραλείπεται από τον ορισμό των στόχων του προβλήματος, εφόσον το κύριο αντικείμενο του προβλήματος είναι μόνο η μεταφορά των δεμάτων στους επιθυμητούς προορισμούς. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχουν συνήθως περισσότερες της μίας καταστάσεις που ικανοποιούν τους στόχους ενός προβλήματος, επομένως είναι πιο σωστό να λεχθεί ότι το G αντιπροσωπεύει ένα σύνολο καταστάσεων αντί για μια μοναδική κατάσταση.

Το σύνολο A περιέχει όλες τις ενέργειες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μεταβάλλουν καταστάσεις. Κάθε ενέργεια A_i έχει τρεις λίστες γεγονότων που περιέχουν :

- τις προϋποθέσεις της A_i , δηλαδή τα γεγονότα που πρέπει να ισχύουν στην τρέχουσα κατάσταση του κόσμου για να είναι δυνατή η εφαρμογή της ενέργειας (σημειώνονται ως $prec(A_i)$)
- τα γεγονότα που προστίθενται στην κατάσταση του κόσμου μετά την εφαρμογή της ενέργειας (σημειώνονται ως $add(A_i)$) και
- τα γεγονότα που αφαιρούνται από την κατάσταση του κόσμου μετά την εφαρμογή της ενέργειας (σημειώνονται ως $del(A_i)$).

Τυπικά ισχύουν οι ακόλουθοι κανόνες για τις καταστάσεις στον φορμαλισμό STRIPS:

- Μια ενέργεια A_i είναι δυνατό να εφαρμοστεί στην κατάσταση S αν $\text{prec}(A_i) \subseteq S$.
- Αν η ενέργεια A_i εφαρμόζεται στην S , η διαδοχική κατάσταση S' υπολογίζεται σαν: $S' = S \setminus \text{del}(A_i) \cup \text{add}(A_i)$

Η λύση σε ένα πρόβλημα, ή *πλάνο* (*plan*), είναι μια ακολουθία ενεργειών οι οποίες αν εφαρμοσθούν διαδοχικά στην αρχική κατάσταση I οδηγούν σε μια κατάσταση S' τέτοια ώστε $S' \supseteq G$.

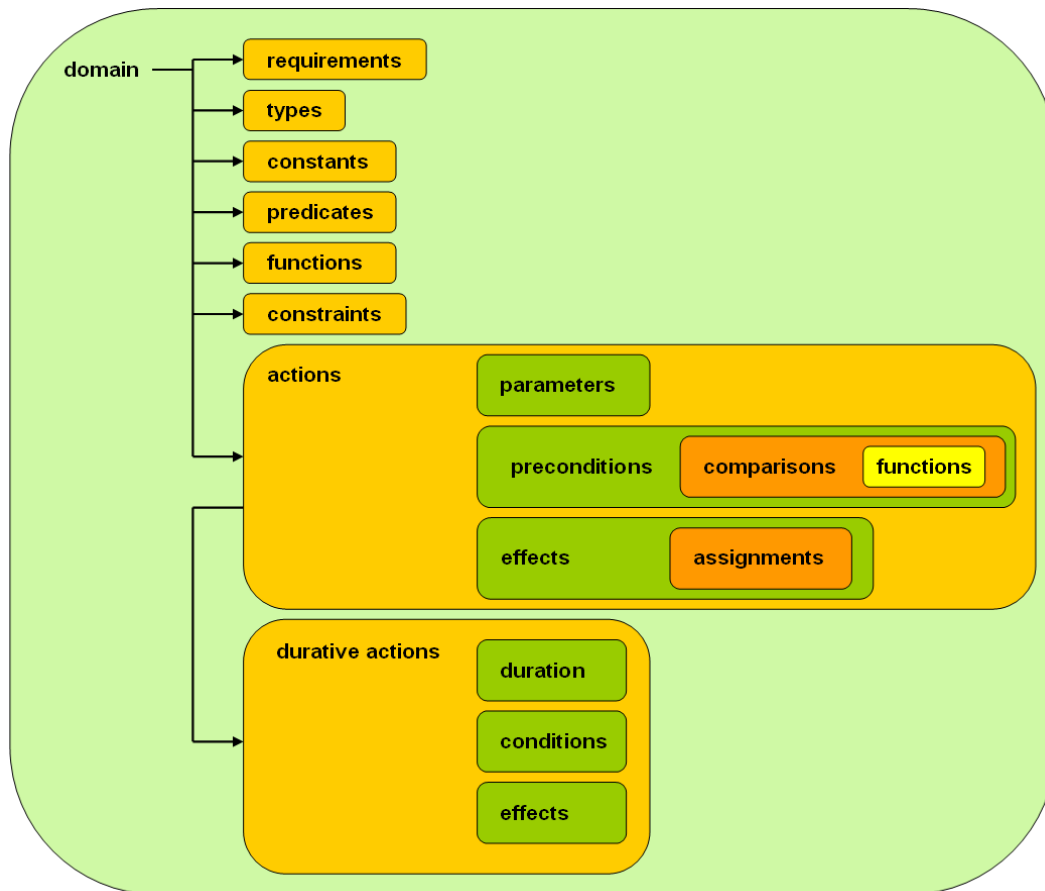
Συνήθως, στην περιγραφή των πεδίων ορισμού, αντί για τις ενέργειες αυτές καθεαυτές χρησιμοποιούνται τα *πρότυπα ενεργειών* ή *τελεστές* (*action schemas, operators*). Οι τελεστές διαθέτουν μεταβλητές οι οποίες μπορούν να ταυτοποιηθούν με τα διαθέσιμα αντικείμενα, και έτσι διευκολύνεται η κωδικοποίηση του πεδίου ορισμού, καθώς μειώνεται σημαντικά ο αριθμός των τελεστών που απαιτείται.

2.2.2. Η γλώσσα ορισμού PDDL

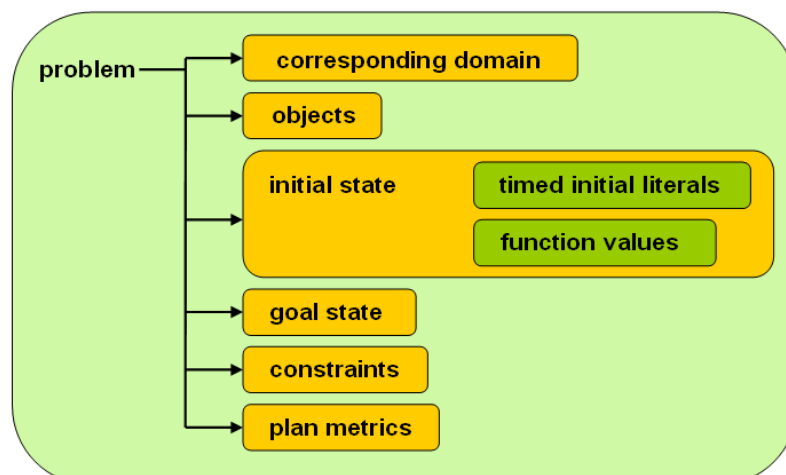
Η γλώσσα Planning Domain Definition Language (PDDL) σχεδιάστηκε αρχικά ώστε να αποτελέσει ένα πρότυπο μέσο κωδικοποίησης πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών, με στόχο την τυποποίηση της εισόδου προγραμμάτων σχεδιασμού ενεργειών που λαμβάνουν μέρος σε διεθνείς διαγωνισμούς, όπως ο IPC [AIPS, 2000; IPC, 2004]. Ωστόσο, στις επόμενες εκδόσεις της εμπλουτίστηκε και επεκτάθηκε με πολλούς τρόπους και αποτελεί πλέον πρότυπο στην κοινότητα του σχεδιασμού ενεργειών για τη μοντελοποίηση πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Η PDDL έχει καθιερωθεί σαν η πιο ευρέως αποδεκτή κοινή γλώσσα για την ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στους ερευνητές σχετικά με πεδία ορισμού και προβλήματα σχεδιασμού ενεργειών. Επιπλέον, η πλειοψηφία των προγραμμάτων σχεδιασμού ενεργειών, και ειδικότερα τα πιο εξελιγμένα από αυτά τη χρησιμοποιούν σαν γλώσσα εισόδου [Gerevini et al., 2005; Hsu et al., 2006; PDDL4J, 2008; SATPLAN, 2004]. Πρόσφατα έχει προταθεί μια ελαφρώς διαφοροποιημένη συντακτικά μορφή της γλώσσας, χωρίς ουσιαστικές αλλαγές, που βασίζεται στην XML, η PDDXML [Klusch et al, 2005], η οποία μπορεί να εξυπηρετήσει καταλληλότερα σκοπούς ανταλλαγής δεδομένων στο Διαδίκτυο.

Η δομή ενός εγγράφου PDDL που περιγράφει ένα τυπικό πεδίο ορισμού φαίνεται στην Εικόνα 2, ενώ στην Εικόνα 3 φαίνεται η δομή ενός εγγράφου που περιέχει ένα τυπικό πρόβλημα εκφρασμένο σε PDDL. Στις επόμενες παραγράφους δίνονται περισσότερες λεπτομέρειες για τα

στοιχεία που απαρτίζουν τα πεδία ορισμού και τα προβλήματα σχεδιασμού ενεργειών που περιγράφονται σε PDDL.



Εικόνα 2. Η δομή ενός τυπικού εγγράφου PDDL για την περιγραφή ενός πεδίου ορισμού.



Εικόνα 3. Η δομή ενός τυπικού εγγράφου PDDL για την περιγραφή ενός προβλήματος.

Η πρώτη έκδοση της PDDL [Ghallab et al., 1998] εκφράζει κυρίως τις φυσικές ιδιότητες των πεδίων ορισμού για κάθε πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών, όπως για παράδειγμα τα διαθέσιμα

κατηγορήματα και τους διαθέσιμους τελεστές, χωρίς να δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα σε χρονικά ή άλλου είδους χαρακτηριστικά. Καθώς δεν σχεδιάστηκε σαν μέρος κάποιου συγκεκριμένου συστήματος σχεδιασμού ενεργειών, δεν διαθέτει δομές για οδηγίες (*advice*) προς το σύστημα σχετικά με το πως πρέπει να ερευνηθεί ο χώρος των λύσεων, ωστόσο αν ο χρήστης το επιθυμεί, υπάρχει η δυνατότητα να δοθούν τέτοιου είδους οδηγίες χρησιμοποιώντας *επεκταμένη σημειογραφία* (*extended notation*), εξαρτώμενη από το εκάστοτε σύστημα σχεδιασμού ενεργειών. Τα στοιχεία της γλώσσας έχουν χωριστεί σε υποσύνολα που αναφέρονται με τον όρο *απαιτήσεις* (*requirements*), τα οποία διευκολύνουν τον χειρισμό των πεδίων ορισμού από συστήματα σχεδιασμού ενεργειών που δεν καλύπτουν ολόκληρη τη γλώσσα. Αυτό πραγματοποιείται ως εξής: κάθε πεδίο ορισμού δηλώνει ποιες απαιτήσεις χρησιμοποιεί, και κάθε σύστημα σχεδιασμού έχει επίγνωση της συμβατότητάς του με αυτές. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα σχεδιασμού είναι σε θέση να αποφανθεί χωρίς επιπλέον πληροφορία αν έχει τη δυνατότητα να διαχειριστεί το δεδομένο πεδίο ορισμού. Το σύστημα σχεδιασμού ενεργειών μπορεί απλά να αγνοήσει όλους τους ορισμούς που σχετίζονται με τις απαιτήσεις τις οποίες δεν έχει τη δυνατότητα να διαχειριστεί. Πρέπει να αναφερθεί ότι για τα πεδία ορισμού εκφρασμένα σε PDDL ισχύει η υπόθεση του κλειστού σύμπαντος, δηλαδή οτιδήποτε δεν αναφέρεται ρητά ως αληθές είναι ψευδές, εκτός και αν στον ορισμό του πεδίου αναφέρεται σαφώς κάτι διαφορετικό.

Κάθε περιγραφή πεδίου ορισμού σε PDDL αποτελείται από διάφορες δηλώσεις που περιλαμβάνουν τις προαναφερθείσες απαιτήσεις, καθώς και *τύπους οντοτήτων* (*types*), *μεταβλητές* (*variables*), *σταθερές* (*constants*), στοιχεία που είναι *ανθεκτικά στο χρόνο* (*timeless literals*) και *κατηγορήματα*. Επιπλέον, υπάρχουν δηλώσεις τελεστών (*operators, actions*), *αξιωμάτων* (*axioms*) και *περιορισμοί ασφαλείας* (*safety constraints*). Τα προαναφερθέντα στοιχεία εξηγούνται με περισσότερες λεπτομέρειες στις ακόλουθες παραγράφους. Πρέπει να σημειωθεί ότι η PDDL επιτρέπει κληρονομικότητα, με την έννοια ότι ένα πεδίο ορισμού μπορεί να δηλώνει ότι κληρονομεί στοιχεία όπως απαιτήσεις, τύπους, σταθερές, τελεστές κτλ από άλλα πεδία ορισμού, τα οποία σε αυτή τη περίπτωση ονομάζονται *πρόγονοι* (*ancestor domains*).

Η χρήση των *τύπων* (*types*) των οντοτήτων στα πεδία ορισμού, παρόλο που δεν είναι υποχρεωτική, έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη και κατατοπιστική. Στα πεδία ορισμού που δηλώνεται η αντίστοιχη απαίτηση (:types), επομένως πρέπει να γίνει χρήση τύπων, για το κάθε αντικείμενο πρέπει να δηλώνεται ένας συγκεκριμένος τύπος. Σε περίπτωση που η ρητή δήλωση του τύπου απουσιάζει, το αντικείμενο ή η μεταβλητή θεωρείται ότι είναι του γενικού τύπου αντικείμενο (*object*). Με τον ίδιο τρόπο, τα ορίσματα ενός κατηγορήματος πρέπει να δηλώνονται ως κάποιου τύπου. Ο ορισμός τύπων παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου εγκυρότητας όσον αφορά τη συμφωνία τύπων αντικειμένων και τύπων ορισμάτων κατά την ταυτοποίηση. Η

διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την επικύρωση (validation) του πεδίου ορισμού, δηλαδή την επιβεβαίωση της ορθότητας (soundness) και της συνέπειάς (consistency) του. Στα πεδία που δεν γίνεται χρήση τύπων, πολλές φορές χρησιμοποιούνται *ανθεκτικά στο χρόνο μοναδιαία κατηγορήματα* (timeless unary predicates), ώστε να αναπληρώσουν την έλλειψη τύπων κατά την ταυτοποίηση αντικειμένων και ορισμάτων.

Οι *μεταβλητές* (variables) στην PDDL έχουν την ίδια σημασιολογία όπως και σε οποιαδήποτε άλλη γλώσσα, δηλαδή μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή από ένα σύνολο και χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ενσωματωμένες συναρτήσεις της PDDL για την αποτίμηση εκφράσεων. Στις νεότερες εκδόσεις της γλώσσας εμφανίζονται με τον όρο *fluents* και χρησιμοποιούνται όχι μόνο στην αποτίμηση εκφράσεων αλλά και για να αντιπροσωπεύσουν ποσότητες που ενδέχεται να αλλάξουν με το πέρασμα του χρόνου σαν αποτέλεσμα κάποιου τελεστή.

Οι *σταθερές* (constants) αντιπροσωπεύουν αντικείμενα των οποίων οι τιμές παραμένουν αμετάβλητες και χρησιμοποιούνται στα πρότυπα τελεστών που δηλώνονται σε ένα πεδίο ορισμού, στην θέση κάποιων ορισμάτων. Όπως και οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο, οι σταθερές ενδέχεται να είναι κάποιου τύπου, επομένως πρέπει να υπακούουν στους ίδιους περιορισμούς κατά την ταυτοποίησή τους με τα ορίσματα των κατηγορημάτων.

Οι *συσχετίσεις* (relationships) μεταξύ των αντικειμένων σε ένα πεδίο ορισμού εκφράζονται μέσω των *κατηγορημάτων* (predicates). Τα κατηγορήματα έχουν αυθαίρετο αριθμό ορισμάτων, ενώ η σειρά αυτών των ορισμάτων καθώς και ο τύπος του καθενός (αν υπάρχει) είναι σαφώς καθορισμένα. Τα κατηγορήματα χρησιμοποιούνται σαν προϋποθέσεις και αποτελέσματα των τελεστών, καθώς και για να περιγράψουν την κατάσταση του κόσμου κάθε δεδομένη χρονική στιγμή.

Οι *τελεστές* (actions, operators) επιτρέπουν μεταβάσεις μεταξύ δύο διαδοχικών καταστάσεων, επιδρώντας πάνω σε μια κατάσταση και αλλάζοντάς την με την πρόσθεση ή την αφαίρεση κατηγορημάτων. Η δήλωση ενός τελεστή περιλαμβάνει τις παραμέτρους και τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται, καθώς και τις προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν για να είναι δυνατή η εφαρμογή του τελεστή, δηλαδή τα κατηγορήματα που πρέπει να περιλαμβάνονται στο σύνολο των κατηγορημάτων που περιγράφουν την κατάσταση του κόσμου ώστε να μπορεί ο τελεστής να εφαρμοστεί στη συγκεκριμένη κατάσταση. Όσον αφορά τα αποτελέσματα ενός τελεστή, η PDDL προσφέρει δύο τρόπους ορισμού τους. Τα αποτελέσματα λοιπόν ενδέχεται να είναι είτε μια λίστα κατηγορημάτων είτε μια επέκταση (expansion), αλλά όχι ταυτόχρονα και τα δύο. Στην περίπτωση που τα αποτελέσματα ενός τελεστή είναι λίστα κατηγορημάτων, τα οποία ενδέχεται

να είναι υπό συνθήκη (conditional) ή καθολικά ποσοτικοποιημένα (universally quantified), τότε εκφράζουν τις αλλαγές τις οποίες επιφέρει ο τελεστής στην κατάσταση του κόσμου μετά την εφαρμογή του. Πιο συγκεκριμένα, και σε συμφωνία με τον φορμαλισμό STRIPS που περιγράφηκε παραπάνω, τα αποτελέσματα ενδέχεται να περιλαμβάνουν τόσο κατηγορήματα που θα προστεθούν όσο και κατηγορήματα που θα αφαιρεθούν από την κατάσταση του κόσμου. Τα κατηγορήματα τα οποία δεν αναφέρονται ανάμεσα στα αποτελέσματα του τελεστή θεωρούνται ότι μένουν ανεπηρέαστα από την εφαρμογή του. Στην περίπτωση που τα αποτελέσματα ενός τελεστή εκφράζονται σαν επέκταση, τότε ο τελεστής αποσυντίθεται σε απλούστερους τελεστές, οι οποίοι μπορούν να βρίσκονται σε οποιοδήποτε σειριακό ή παράλληλο συνδυασμό. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται όταν η λύση ενός προβλήματος εκφράζεται με την μορφή μιας σειράς τελεστών αντί για ένα σύνολο κατηγορημάτων που αντιπροσωπεύουν την τελική κατάσταση.

Τα κατηγορήματα που είναι πάντα αληθή αναφέρονται ως *ανθεκτικά στο χρόνο (timeless)*. Προφανώς τέτοιου είδους κατηγορήματα δεν είναι δυνατό να εμφανίζονται στα αποτελέσματα ενός τελεστή γιατί κάτι τέτοιο θα άλλαζε την ισχύ τους από αληθή σε ψευδή ή αντίστροφα. Τέτοιου είδους κατηγορήματα επομένως δεν επηρεάζονται (δεν προστίθενται ούτε αφαιρούνται) από κάποιον διαθέσιμο τελεστή.

Τα *αξιώματα (axioms)*, σε αντίθεση με τους τελεστές οι οποίοι εκφράζουν σχέσεις μεταξύ διαδοχικών καταστάσεων, εκφράζουν σχέσεις μεταξύ προτάσεων που ισχύουν μέσα στην ίδια κατάσταση. Η αναγκαιότητα ύπαρξης αξιωμάτων προκύπτει από το γεγονός ότι οι ορισμοί των τελεστών ενδέχεται να μην αναφέρουν όλες τις αλλαγές σε όλα τα κατηγορήματα που επηρεάζονται από την εφαρμογή του τελεστή. Επομένως, επιπλέον κατηγορήματα συμπεραίνονται από τα αξιώματα, μετά την εφαρμογή κάθε τελεστή. Αυτά ονομάζονται *παραγόμενα κατηγορήματα (derived predicates)*, σε αντίθεση με τα *στοιχειώδη πρωταρχικά κατηγορήματα*. Στις νεότερες εκδόσεις της γλώσσας ο όρος *παραγόμενα κατηγορήματα* έχει αντικαταστήσει τα αξιώματα, αλλά η έννοια και η ιδέα πίσω από αυτά παραμένει η ίδια.

Εκτός από πεδία ορισμού η PDDL χρησιμοποιείται και για τον ορισμό προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών με βάση τα ήδη ορισμένα πεδία. Ο ορισμός ενός προβλήματος στην PDDL καθορίζει την αρχική κατάσταση και την τελική κατάσταση, που αναφέρεται επίσης και ως στόχος. Η αρχική κατάσταση περιλαμβάνει μια λίστα κατηγορημάτων που θεωρείται ότι είναι αληθή, ενώ ισχύει η θεωρία του κλειστού σύμπαντος, δηλαδή οτιδήποτε δεν αναφέρεται ως αληθές στην αρχική κατάσταση θεωρείται εξ' ορισμού ψευδές. Η περιγραφή της τελικής

κατάστασης δύναται να γίνει είτε με χρήση κατηγορηματικής λογικής πρώτης τάξης χωρίς συναρτήσεις, είτε ως επέκταση τελεστών.

Η PDDL 2.1 [Fox and Long, 2003] σχεδιάστηκε ώστε να είναι συμβατή με τις προηγούμενες εκδόσεις της γλώσσας και να διατηρεί τις βασικές αρχές. Αναπτύχθηκε λόγω της ανάγκης ύπαρξης μια γλώσσας ικανής να εκφράσει τις χρονικές και αριθμητικές ιδιότητες των πιο σύγχρονων πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών.

Η πρώτη από τις επεκτάσεις που εισήχθησαν ήταν οι αριθμητικές εκφράσεις (numeric expressions). Οι στοιχειώδεις αριθμητικές εκφράσεις είναι συναρτήσεις που συσχετίζουν έναν αριθμό από αντικείμενα του πεδίου ορισμού με αριθμητικές τιμές. Οι σύνθετες αριθμητικές εκφράσεις σχηματίζονται από τις στοιχειώδεις με την χρήση αριθμητικών τελεστών. Προκειμένου να υποστηριχθούν οι αριθμητικές εκφράσεις, επιπλέον στοιχεία πρέπει να εισαχθούν στην γλώσσα, όπως συναρτήσεις (functions), υποθετικές εκφράσεις που περιλαμβάνουν σύγκριση ζευγαριών αριθμητικών εκφράσεων, καθώς και τελεστές απόδοσης τιμής, όπως αυτοί της ανάθεσης (assignment), της αύξησης (increase) και της μείωσης (decrease). Οι τιμές των αναθέσεων ή οι αριθμητικές τιμές στις συναρτήσεις δεν αποτελούν μέρος του πεδίου ορισμού, επομένως πρέπει να δηλωθούν μαζί με τον ορισμό του προβλήματος.

Μια ακόμα αξιοσημείωτη προσθήκη ήταν οι μετρικές για τα πλάνα (plan metrics). Επιτρέποντας στον χρήστη να καθορίσει τον τρόπο με τον οποίον κάθε πλάνο πρέπει να αξιολογηθεί, δίνεται η δυνατότητα η αναζήτηση λύσης να μην έχει ως στόχο ένα οποιοδήποτε πλάνο αλλά το καλύτερο πλάνο με βάση την ορισμένη μετρική.

Επιπλέον επεκτάσεις σε αυτή την έκδοση της γλώσσας είναι οι *τελεστές διαρκείας* (durative actions), που διακρίνονται σε διακριτούς (discretised) και συνεχείς (continuous). Ενώ σε όλες τις προηγούμενες εκδόσεις οι τελεστές θεωρούνταν στιγμιαίοι, με αυτή την επέκταση δίνεται στους τελεστές η δυνατότητα να έχουν κάποια ορισμένη εκ των προτέρων διάρκεια. Για να λειτουργήσει σωστά ένα σύστημα σχεδιασμού ενεργειών με τελεστές διαρκείας, είναι επιπλέον αναγκαίες οι χρονικές σημάνσεις (temporal annotations) των προϋποθέσεων και των αποτελεσμάτων των τελεστών. Μια προϋπόθεση σημαίνεται έτσι ώστε να είναι αναγκαίο να ισχύει στην αρχή, στο τέλος ή καθ' όλη τη χρονική περίοδο για την οποία διαρκεί ο τελεστής. Παρομοίως, ένα αποτέλεσμα μπορεί να είναι άμεσο (immediate) ή καθυστερημένο (delayed), δηλαδή να λαμβάνει χώρα στην αρχή ή στο τέλος του εν λόγω χρονικού διαστήματος.

Η PDDL 2.2 [Edelkamp and Hoffman, 2004] προσέθεσε τα παραγόμενα κατηγορήματα, για τα οποία έγινε λόγος νωρίτερα, καθώς και τα μεταχρονολογημένα αρχικά κατηγορήματα (timed

initial literals), τα οποία αποτελούν γεγονότα που γίνονται αληθή ή ψευδή σε κάποιες δεδομένες χρονικές στιγμές που καθορίζονται εκ των προτέρων κατά τη δήλωση του προβλήματος, και δεν επηρεάζονται από τους τελεστές που το σύστημα σχεδιασμού ενεργειών υποδεικνύει ότι πρέπει να εφαρμοσθούν.

Στην PDDL 3.0 [Gerevini and Long, 2005] έγινε προσπάθεια για να εμπλουτιστεί η γλώσσα με δομές που αυξάνουν την εκφραστική της ικανότητα όσον αφορά τον ορισμό των μετρικών που καθορίζουν την ποιότητα των πλάνων. Ένας από τους τρόπους που καθιστούν αυτό δυνατό είναι ο διαχωρισμός των περιορισμών σε αυστηρούς (*strong*), οι οποίοι είναι υποχρεωτικό να ικανοποιούνται από την λύση του προβλήματος και χαλαρούς (*soft*), οι οποίοι δεν απαιτούνται, αλλά είναι επιθυμητοί. Προφανώς, η ικανοποίηση όλων των αυστηρών περιορισμών καθιστά ένα πλάνο έγκυρο, ενώ όσο περισσότεροι χαλαροί περιορισμοί ικανοποιούνται, τόσο καλύτερης ποιότητας είναι το συγκεκριμένο πλάνο. Για ακόμη μεγαλύτερη ευελιξία στον ορισμό αυτής της ποιότητας, ο κάθε χαλαρός περιορισμός δύναται να συσχετισθεί με κάποια ένδειξη σημαντικότητας, επομένως αν ικανοποιηθεί συνεισφέρει ανάλογα στην ποιότητα του πλάνου. Επιπλέον, υπάρχουν και περιορισμοί τροχιάς καταστάσεων (*state trajectory constraints*) οι οποίοι θέτουν περιορισμούς όχι μόνο στην τελική κατάσταση αλλά και σε ολόκληρη την ακολουθία τελεστών που περιλαμβάνεται σε ένα πλάνο.

2.2.3. Παράδειγμα κωδικοποίησης προβλήματος

Ίσως το πιο γνωστό παράδειγμα πεδίου ορισμού σχεδιασμού ενεργειών είναι το Gripper [AIPS-98], το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ενδεικτικά στην παρούσα ενότητα σαν παράδειγμα για την παρουσίαση της PDDL.

Στο κόσμο του Gripper θεωρείται ότι υπάρχει ένα ρομπότ με N λαβίδες (*grripper*) το οποίο μπορεί να κινηθεί σε έναν χώρο K δωματίων (*room*) τα οποία είναι όλα συνδεδεμένα μεταξύ τους έτσι ώστε το ρομπότ να μεταβαίνει από κάποιο δωμάτιο σε κάποιο άλλο με μία μοναδική κίνηση. Υπάρχουν επίσης L σφαίρες (*ball*), διακριτές μεταξύ τους. Όλα τα παραπάνω θεωρούνται στατική πληροφορία, αφού δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια σχεδιασμού, και κατά τη κωδικοποίηση σε PDDL αναπαρίστανται είτε ως *τύποι*, αν έχει δηλωθεί η αντίστοιχη απαίτηση, είτε ως μοναδιαία κατηγορήματα σε αντίθετη περίπτωση.

Όσον αφορά τη δυναμική πληροφορία, κάθε σφαίρα βρίσκεται αρχικά σε κάποιο από τα δωμάτια, ενώ το ρομπότ μπορεί να μεταφέρει τις σφαίρες από την αρχική τους θέση σε κάποιον

προορισμό, κρατώντας μία σφαίρα ανά λαβίδα σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή. Αυτές οι πληροφορίες αντικατοπτρίζονται στα παρακάτω τέσσερα κατηγορήματα:

- `at(ball, room)`: καθορίζει ότι η σφαίρα `ball` την τρέχουσα στιγμή βρίσκεται στο δωμάτιο `room`
- `holding(ball, gripper)`: δείχνει ότι η λαβίδα `gripper` την τρέχουσα στιγμή κρατάει τη σφαίρα `ball`
- `at-robot(room)`: υποδεικνύει ότι η τρέχουσα θέση του ρομπότ είναι το δωμάτιο `room`
- `empty(gripper)`: δηλώνει ότι η λαβίδα `gripper` δεν κρατάει καμία σφαίρα αυτή τη χρονική στιγμή

Η κατάσταση του κόσμου σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή αναπαρίσταται με ένα σύνολο κατηγορημάτων που περιλαμβάνουν τόσο στατική όσο και δυναμική πληροφορία. Για τη μετάβαση από μια κατάσταση σε άλλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι διαθέσιμοι τελεστές.

Οι διαθέσιμοι τελεστές περιλαμβάνουν:

- το πιάσιμο κάποιας σφαίρας με μία από τις λαβίδες (`pick`)
- την απόθεση της σφαίρας με ταυτόχρονη ελευθέρωση της λαβίδας (`drop`)
- τη μετακίνηση του ρομπότ από δωμάτιο σε δωμάτιο (είτε αυτό κρατάει σφαίρες στις λαβίδες του είτε όχι) (`move`)

Σχηματικά οι τελεστές μπορούν να αναπαρασταθούν με ένα πλαίσιο που περιέχει το όνομά τους, και δύο λίστες κατηγορημάτων. Η αριστερή λίστα περιέχει τις προϋποθέσεις του τελεστή, δηλαδή τα κατηγορήματα που πρέπει να περιλαμβάνονται στην κατάσταση του κόσμου για να είναι δυνατή η εφαρμογή του τελεστή. Η δεξιά λίστα περιέχει τα αποτελέσματα, με τη μορφή γεγονότων που θα προστεθούν ή θα αφαιρεθούν από την κατάσταση του κόσμου μετά την εφαρμογή του τελεστή. Οι τελεστές που υπάρχουν στο κόσμο του Gripper είναι οι παρακάτω φαίνονται στην Εικόνα 4.

move	
room(from)	+ at-robby(to)
room(to)	- at-robby(from)
at-robby(from)	

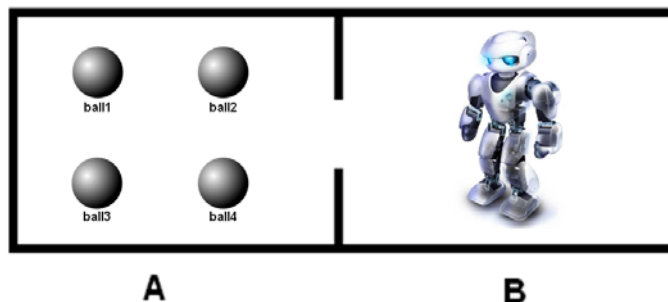
pick	
ball(b)	+ holding(b, g)
room(r)	- at(b, r)
gripper(g)	- free(g)
at(b, r)	
at-robby(r)	
free(g)	

drop	
ball(b)	+ at(b, r)
room(r)	+ free(g)
gripper(r)	- holding(b, g)
holding(b, g)	
at-robby(r)	

Εικόνα 4. Οι τελεστές στον κόσμο του Gripper.

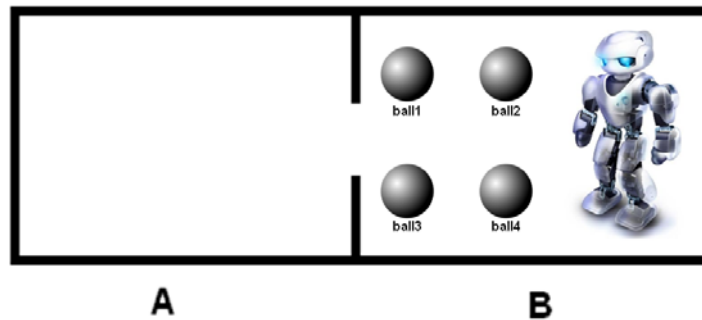
Τα προβλήματα που εκφράζονται με βάση αυτό το πεδίο ορισμού θα πρέπει να καθορίζουν πλήρως την αρχική κατάσταση, δηλαδή να αναφέρουν όλα τα αντικείμενα που θεωρείται ότι υπάρχουν στον κόσμο (σφαίρες, δωμάτια, λαβίδες), τις αρχικές θέσεις όλων των στοιχείων (σφαιρών, ρομπότ), καθώς και την αρχική κατάσταση των λαβίδων. Επιπλέον, πρέπει να καθορίζουν όσα από τα στοιχεία της τελικής κατάστασης παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

Για παράδειγμα, έστω ότι σε μια πιθανή αρχική κατάσταση υπάρχουν δύο δωμάτια, τέσσερις σφαίρες και το ρομπότ έχει δύο λαβίδες. Επιπλέον, όλες οι σφαίρες βρίσκονται στο δωμάτιο Α, το ρομπότ στο δωμάτιο Β και οι λαβίδες είναι ελεύθερες, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5. Μια πιθανή αρχική κατάσταση για το πεδίο ορισμού Gripper.

Έστω επίσης ότι η αντίστοιχη τελική κατάσταση απαιτεί τόσο οι σφαίρες όσο και το ρομπότ να είναι στο δωμάτιο B, και οι λαβίδες του ρομπότ να είναι ελεύθερες. Αυτή η τελική κατάσταση φαίνεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6. Μια πιθανή τελική κατάσταση για το πεδίο ορισμού Gripper.

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η πλήρης κωδικοποίηση του παραπάνω πεδίου ορισμού καθώς και του ενδεικτικού προβλήματος που αναφέρθηκε σε PDDL χωρίς χρήση τύπων. Σε αυτήν την περίπτωση η στατική πληροφορία του πεδίου ορισμού αντιπροσωπεύεται με χρήση μοναδιαίων κατηγορημάτων.

```
(define (domain gripper)
  (:predicates (room ?r)
    (ball ?b)
    (gripper ?g)
    (at-robby ?r)
    (at ?b ?r)
    (free ?g)
    (holding ?o ?g))

  (:action move
    :parameters (?from ?to)
    :precondition (and (room ?from) (room ?to) (at-robby ?from))
    :effect (and (at-robby ?to)
      (not (at-robby ?from))))

  (:action pick
    :parameters (?obj ?room ?gripper)
    :precondition (and (ball ?obj) (room ?room) (gripper ?gripper)
      (at ?obj ?room) (at-robby ?room) (free ?gripper))
    :effect (and (holding ?obj ?gripper)
      (not (at ?obj ?room))
      (not (free ?gripper))))

  (:action drop
    :parameters (?obj ?room ?gripper)
    :precondition (and (ball ?obj) (room ?room) (gripper ?gripper)
      (holding ?obj ?gripper) (at-robby ?room))
    :effect (and (at ?obj ?room)
      (free ?gripper)
      (not (holding ?obj ?gripper)))))

(define (problem strips-gripper-x-1)
  (:domain gripper)
  (:objects rooma roomb ball4 ball3 ball2 ball1 left right)
  (:init (room rooma)
    (room roomb)
    (ball ball4)
    (ball ball3)
    (ball ball2)
    (ball ball1)
    (at-robby rooma)
    (gripper left)
    (gripper right)
    (free left)
    (free right)
    (at ball4 rooma)
    (at ball3 rooma)
    (at ball2 rooma)
    (at ball1 rooma)
    )
  (:goal (and (at ball4 roomb)
    (at ball3 roomb)
    (at ball2 roomb)
    (at ball1 roomb)
    (at-robby roomb)
    (free left)
    (free right)
    )))
```

Εικόνα 7. Το πεδίο ορισμού gripper (αριστερά) και ένα ενδεικτικό πρόβλημα (δεξιά), χωρίς χρήση τύπων.

Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται το ίδιο πεδίο ορισμού και ένα πιο πολύπλοκο πρόβλημα με χρήση τύπων.


```

(define (domain gripper-typed)
  (:types room ball gripper)
  (:predicates (at-robby ?r - room)
    (at ?b - ball ?r - room)
    (free ?g - gripper)
    (holding ?b - ball ?g - gripper))

  (:action move
    :parameters (?from - room ?to - room)
    :precondition (at-robby ?from)
    :effect (and (at-robby ?to)
      (not (at-robby ?from))))

  (:action pick
    :parameters (?obj - ball ?room - room ?gripper - gripper)
    :precondition (and (at ?obj ?room)
      (at-robby ?room)
      (free ?gripper))
    :effect (and (holding ?obj ?gripper)
      (not (at ?obj ?room))
      (not (free ?gripper))))

  (:action drop
    :parameters (?obj - ball ?room - room ?gripper - gripper)
    :precondition (and (holding ?obj ?gripper)
      (at-robby ?room))
    :effect (and (at ?obj ?room)
      (free ?gripper)
      (not (holding ?obj ?gripper)))))

```

```

(define (problem gripper1)
  (:domain gripper-typed)
  (:objects rooma roomb - room
    ball1 ball2 ball3 ball4 ball5 ball6 - ball
    left right - gripper)
  (:init (at-robby rooma)
    (free left)
    (free right)
    (at ball1 rooma)
    (at ball2 rooma)
    (at ball3 rooma)
    (at ball4 rooma)
    (at ball5 rooma)
    (at ball6 rooma))
  (:goal (and (at ball1 roomb)
    (at ball2 roomb)
    (at ball3 roomb)
    (at ball4 roomb)
    (at ball5 roomb))))

```

Εικόνα 8. Το πεδίο ορισμού gripper (αριστερά) και ένα ενδεικτικό πρόβλημα (δεξιά), με χρήση τύπων.

2.3. Τεχνικές και Συστήματα Σχεδιασμού Ενεργειών

Καθώς ο σχεδιασμός ενεργειών αποτελεί ένα ενεργό πεδίο έρευνας για τουλάχιστον τα τελευταία 40 έτη, έχουν προταθεί και εξελιχθεί διάφορες τεχνικές, αλγόριθμοι και συστήματα που διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, είτε στον τρόπο που μοντελοποιούν τον κόσμο είτε στον τρόπο που αναζητούν την λύση του εκάστοτε προβλήματος και στις ευριστικές τεχνικές που χρησιμοποιούν για επιτάχυνση της διαδικασίας επίλυσης. Το πρώτο σύστημα σχεδιασμού ενεργειών που εμφανίστηκε στη βιβλιογραφία θεωρείται ο *General Problem Solver (GPS)* [Newell and Simon, 1963], ο οποίος επιχειρούσε να προσομοιώσει την ανθρώπινη σκέψη για επίλυση των προβλημάτων. Το σημαντικότερο ωστόσο σύστημα της εποχής είναι το αυτό που προτάθηκε σε συνδυασμό με τον φορμαλισμό STRIPS, το οποίο είχε και το ίδιο όνομα [Fikes and Nilsson, 1971], και επιχειρούσε σχεδιασμό στον χώρο των καταστάσεων (state-space planning). Οι σχεδιαστές αυτής της κατηγορίας μετασχηματίζουν συνεχώς καταστάσεις, εφαρμόζοντας διαθέσιμους τελεστές, μέχρι να προκύψει μια επιθυμητή κατάσταση, εφαρμόζοντας ευριστικές μεθόδους, ώστε να μειώσουν το πλήθος των καταστάσεων που εξετάζονται. Ανάλογα με το σημείο εκκίνησης της αναζήτησης, δηλαδή την αρχική ή την τελική κατάσταση, αυτή χαρακτηρίζεται ως ορθή (forward) ή ανάστροφη (backward).

Ανάμεσα σε άλλες τεχνικές που παρουσιάστηκαν μέχρι την δεκαετία του 1990 και αντιμετωπίζουν το πρόβλημα του σχεδιασμού ενεργειών σαν τυπικό πρόβλημα αναζήτησης

(search problem), περιλαμβάνεται η αναζήτηση στον χώρο των πλάνων (plan-space planning), με κυριότερα παραδείγματα τα συστήματα UCPOP [Penberthy and Weld, 1992], TWEAK [Chapman, 1987] και SNLP [McAllester and Roseblitt, 1991; Knoblock and Yang, 1993]. Η αναζήτηση σε αυτά τα συστήματα έχει ως σημείο εκκίνησης ένα αρχικό πλάνο το οποίο μετασχηματίζεται συνεχώς μέχρι να βρεθεί ένα πλάνο στο οποίο μπορεί να εξασφαλιστεί η ορθότητα και η εφαρμοσιμότητά του. Ο σχεδιασμός στον χώρο των πλάνων μειώνει σημαντικά το χρόνο αναζήτησης, ενώ επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής μερικώς διατεταγμένων πλάνων.

Ανάμεσα στις αρχικές προσεγγίσεις στον σχεδιασμό ενεργειών περιλαμβάνεται και ο ιεραρχικός σχεδιασμός, κατά τον οποίον ο χρήστης δύναται να ορίσει διάφορα επίπεδα αφαίρεσης για την περιγραφή του προβλήματος. Η επίλυση γίνεται στο υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης και συνεχίζεται εμπλουτίζοντας σταδιακά το πλάνο με λεπτομέρειες καθώς κατεβαίνει επίπεδα, μέχρι που οι τελεστές είναι αρκετά απλοί ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να αντιστοιχισθούν με διαθέσιμους τελεστές του πεδίου ορισμού. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να μειωθεί ο χρόνος αναζήτησης, ωστόσο χρειάζεται να υπάρχει εκ των προτέρων γνώση από κάποιον ειδικό του πεδίου (domain expert), ώστε να είναι δυνατή η ορθή αποσύνθεση των ενεργειών. Παραδείγματα σχεδιαστών που χρησιμοποιούν ιεραρχική προσέγγιση είναι οι ABSTRIPS [Sacerdoti, 1974] και AbTWEAK [Yang and Tenenber, 1990].

Οι προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής ανήκουν στην κατηγορία των κλασικών τεχνικών σχεδιασμού ενεργειών και ακολουθούνται ακόμα και σήμερα για την κατασκευή συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Ωστόσο, ειδικά από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 και μέχρι σήμερα, οι ερευνητές έχουν στραφεί σε νέες μεθόδους που επιταχύνουν την διαδικασία σχεδιασμού αλλά και χειρίζονται ζητήματα που δεν αντιμετωπίζονται από την πλειονότητα των κλασικών τεχνικών, όπως ο χρόνος, η αβεβαιότητα, η ύπαρξη περιορισμών στους πόρους κ.α. [Βράκας, 2004]. Οι προσπάθειες αυτές αναφέρονται στη βιβλιογραφία σαν *νεοκλασικές τεχνικές σχεδιασμού ενεργειών*.

Ένας από τους κυριότερους εκπροσώπους των νεοκλασικών τεχνικών είναι ο σχεδιασμός βασισμένος σε γράφους (graph-based planning), και το κυριότερο σύστημα που εφαρμόζει αυτή τη τεχνική, το οποίο απολαμβάνει ιδιαίτερη αναγνώριση τα τελευταία χρόνια, είναι το Graphplan [Blum and Furst, 1997]. Βασικό ρόλο κατά τη διαδικασία σχεδιασμού παίζει ο γράφος που κατασκευάζεται από την περιγραφή του προβλήματος και περιέχει όλη τη διαθέσιμη πληροφορία. Ο γράφος στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την αναζήτηση, και έχει αποδειχθεί ότι δίνει αξιόλογα αποτελέσματα ακόμα και για μη γραμμικά πλάνα. Άλλα παραδείγματα

παρόμοιων συστημάτων είναι τα STAN [Long and Fox, 1998] και IPP [Koehler et al, 1997], ενώ ένα ακόμα σύστημα βασισμένο σε γράφους σχεδιασμού ενεργειών είναι το LPG-td [Gerevini et al, 2004; 2005], το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην παρούσα έρευνα ως εξωτερικό σύστημα σχεδιασμού ενεργειών.

Μια ακόμα σημαντική νεοκλασική προσέγγιση βασίζεται στην εξαγωγή γνώσης από τη δομή του εκάστοτε προβλήματος μέσω της αυτόματης εξαγωγής ευριστικών μηχανισμών που χρησιμοποιούνται ώστε να κατευθύνουν την αναζήτηση. Ένα από τα πρώτα συστήματα που ανήκει σε αυτή τη κατηγορία είναι ο UNPOP [McDermott, 1996; 1999], ενώ ακολούθησαν τα ASP/HSP [Bonet et al, 1997; Bonet and Geffner, 1999], FF [Hoffman, 2000; Hoffman and Nebel, 2001], PGRT [Vrakas et al, 1999], CL [Vrakas et al, 2001], HybridAcE [Vrakas and Vlahavas, 2005] και HAP_{RC} [Vrakas et al, 2005].

Ένας σημαντικός αριθμός προσεγγίσεων επιχειρεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα του σχεδιασμού ενεργειών μετατρέποντάς το σε άλλου είδους προβλήματα, όπως για παράδειγμα σε πρόβλημα Ικανοποίησης Προτασιακής Λογικής (Propositional Satisfiability). Παραδείγματα συστημάτων που χρησιμοποιούν αυτή τη προσέγγιση είναι το SATPLAN [Kautz and Selman, 1992; 1996] και το BLACKBOX [Kautz and Selman, 1998]. Έχει επίσης επιχειρηθεί η μετατροπή του προβλήματος σε πρόβλημα Ικανοποίησης Περιορισμών (Constraint Satisfaction Problem), επίλυσή του με μεθόδους ικανοποίησης περιορισμών και μετατροπής της λύσης σε πλάνο, με παραδείγματα τέτοιων συστημάτων τα IxTeT [Laborie and Ghallab, 1995] και HSTS [Muscettola, 1994]. Τέλος, έχει προταθεί η αναπαράσταση προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών ως προβλήματα ελέγχου μοντέλων (Model Checking) και ως Μαρκοβιανές Διαδικασίες Απόφασης (Markov Decision Process), οι οποίες είναι τεχνικές που έχουν τη δυνατότητα χειρισμού αβεβαιότητας (uncertainty) [Giunchiglia and Traverso, 1999].

Στον Πίνακα 1 συνοψίζεται η παραπάνω σύντομη ανασκόπηση και τα κυριότερα συστήματα που εκπροσωπούν την κάθε τεχνική.

	Τεχνική	Χαρακτηριστικό	Παραδείγματα συστημάτων
Κλασικές τεχνικές σχεδιασμού	Σχεδιασμός στον χώρο των καταστάσεων (State-space planning)	Μετασχηματισμός καταστάσεων μέσω τελεστών μέχρι να προκύψει η επιθυμητή τελική κατάσταση	STRIPS
	Σχεδιασμός στον χώρο των πλάνων (Plan-based Planning)	Μετασχηματισμός πλάνων μέχρι να βρεθεί κάποιο ορθό και εφαρμόσιμο	UCPOP, TWEAK, SNLP

	Ιεραρχικός σχεδιασμός (Hierarchical planning)	Επίλυση στο υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης και σταδιακός εμπλουτισμός του πλάνου σε χαμηλότερα επίπεδα	ABSTRIPS, AbTWEAK
Νεοκλασικές Τεχνικές Σχεδιασμού	Σχεδιασμός βασισμένος σε γράφους (Graph-based planning)	Κατασκευάζεται γράφος από την περιγραφή του προβλήματος και χρησιμοποιείται κατά την αναζήτηση λύσης	Graphplan, STAN, IPP, LPG-td
	Αυτόματη εξαγωγή ευριστικών μηχανισμών (Automatic heuristic extraction)	Εξαγωγή γνώσης από τη δομή του εκάστοτε προβλήματος για χρήση κατά την αναζήτηση λύσης	UNPOP, ASP/HSP, FF, PGRT, CL, HybridAcE, HAPrc
	Μετατροπή σε άλλου είδους πρόβλημα	Μετατροπή σε πρόβλημα Ικανοποίησης προτασιακής λογικής (Propositional satisfiability) ή Ικανοποίησης περιορισμών (Constraint Satisfaction) και επίλυση	SATPLAN, BLACKBOX, IxTeT, HSTS

Πίνακας 1. Σύνοψη ανασκόπησης συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών

Η επιλογή του LPG-td στην παρούσα έρευνα ως κύριο σύστημα σχεδιασμού ενεργειών για τοπική επίλυση των προβλημάτων σχεδιασμού στηρίχθηκε στους παρακάτω λόγους:

- Αποτελεί μια από τις σύγχρονες τεχνικές σχεδιασμού, με αποδεδειγμένα καλή απόδοση σε διαγωνισμούς σχεδιασμού ενεργειών για διαφόρων ειδών πεδία ορισμού και προβλήματα. Η απόδοσή του επαληθεύτηκε από τα πειράματα στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, όπως θα φανεί σε επόμενα κεφάλαια.
- Έχει τη δυνατότητα να χειριστεί μεγάλο αριθμό τελεστών σε ένα πεδίο ορισμού, καθώς και μεγάλο αριθμό αντικειμένων στα προβλήματα, διατηρώντας το χρόνο που απαιτείται για τον σχεδιασμό σε χαμηλά επίπεδα. Η ιδιότητά του αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη κλιμάκωση του προβλήματος της σύνθεσης, καθώς εκτιμάται ότι τα πεδία ορισμού που προκύπτουν έχουν μεγάλο αριθμό τελεστών. Άλλα συστήματα σχεδιασμού που δοκιμάστηκαν, όπως το JPlan [JPlan], το οποίο αποτελεί μια υλοποίηση του Graphplan, έδειξαν αδυναμία στον χειρισμό μεγάλου αριθμού τελεστών.
- Η ολοκλήρωσή του με υπάρχοντα συστήματα είναι εύκολη, ιδιότητα που οφείλεται στη συμβατότητα με την γλώσσα PDDL τόσο για την εισαγωγή πεδίων ορισμού και προβλημάτων όσο και για την περιγραφή των παραγόμενων πλάνων.

- Κατά τη χρήση του δίνει αυξημένες δυνατότητες παραμετροποίησης και είναι σε θέση να επιστρέψει περισσότερα του ενός πλάνα, χαρακτηριστικά που δεν έχουν άλλα συστήματα σχεδιασμού, ενώ έχει τη δυνατότητα βελτίωσης των λύσεων που παράγει όσο περισσότερο χρόνο αφιερεί να τρέχει.

2.4. Αναπαράσταση Πλάνων

Παρά την εκτεταμένη έρευνα στο πεδίο του σχεδιασμού ενεργειών και την τυποποίηση της εισόδου των συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών με το πρότυπο της PDDL, δεν έχει επικρατήσει κάποιος επίσημος τρόπος αναπαράστασης της εξόδου τέτοιων συστημάτων. Εκτός από την ίδια την ακολουθία ενεργειών που απαρτίζει το πλάνο, η έξοδος μπορεί να περιλαμβάνει στατιστικά στοιχεία για τη διαδικασία σχεδιασμού. Επιπλέον, σε περίπτωση που το πλάνο είναι μερικώς διατεταγμένο, δηλαδή ενδέχεται να υπάρχουν παράλληλα επίπεδα, η έξοδος του συστήματος περιλαμβάνει πληροφορία για αυτά.

Στον ορισμό της PDDL+ [Fox and Long, 2002], έχει προταθεί ένας τρόπος αναπαράστασης πλάνων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τυποποίηση της εξόδου των συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών και είναι σε θέση να αναπαραστήσει τόσο γραμμικά όσο και παράλληλα πλάνα, καθώς και ενέργειες με διάρκεια. Η αναπαράσταση αυτή ορίζει ότι η κάθε ενέργεια στο πλάνο αναπαρίσταται σαν

$L: \text{Action } [T]$

όπου L είναι το επίπεδο του πλάνου στο οποίο βρίσκεται η ενέργεια και T η χρονική της διάρκεια. Το πλάνο αποτελείται από μια σειρά τέτοιων ορισμών ενεργειών. Δυστυχώς, τα περισσότερα από τα σύγχρονα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών δεν συμμορφώνονται ή ακολουθούν μόνο μερικώς αυτό το πρότυπο, με αποτέλεσμα την δυσκολία στη διαλειτουργικότητα με άλλα συστήματα.

Στην Εικόνα 9 φαίνεται ένα πλάνο στην μορφή που προτείνεται από την PDDL+, το οποίο αντιστοιχεί στο πεδίο ορισμού Gripper και στο πρόβλημα που φαίνεται στην Εικόνα 7. Το συγκεκριμένο πλάνο είναι μερικώς διατεταγμένο σε 15 επίπεδα, και η κάθε ενέργεια που περιέχει έχει την προκαθορισμένη διάρκεια 1 χρονικής μονάδας, εφόσον στην κλασική μορφή του πεδίου ορισμού Gripper δεν υπάρχουν τελεστές διαρκείας.

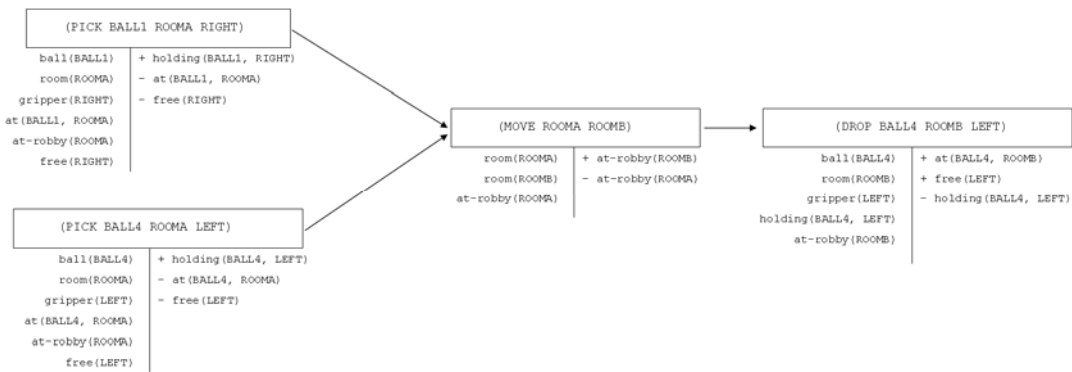
0:	(PICK BALL1 ROOMA RIGHT)	[1]
0:	(PICK BALL4 ROOMA LEFT)	[1]
1:	(MOVE ROOMA ROOMB)	[1]
2:	(DROP BALL4 ROOMB LEFT)	[1]
3:	(MOVE ROOMB ROOMA)	[1]
4:	(PICK BALL3 ROOMA LEFT)	[1]
5:	(MOVE ROOMA ROOMB)	[1]
6:	(DROP BALL3 ROOMB LEFT)	[1]
7:	(MOVE ROOMB ROOMA)	[1]
8:	(MOVE ROOMA ROOMB)	[1]
9:	(DROP BALL1 ROOMB RIGHT)	[1]
10:	(MOVE ROOMB ROOMA)	[1]
11:	(PICK BALL2 ROOMA RIGHT)	[1]
12:	(MOVE ROOMA ROOMB)	[1]
13:	(DROP BALL2 ROOMB RIGHT)	[1]
14:	(MOVE ROOMB ROOMA)	[1]
15:	(MOVE ROOMA ROOMB)	[1]

Εικόνα 9. Το πλάνο για το πεδίο ορισμού και το πρόβλημα που παρουσιάστηκε παραπάνω.

Εκτός από την κωδικοποιημένη τυπική μορφή τους, η οπτική αναπαράσταση των πλάνων συμβάλλει σημαντικά στην κατανόησή τους και στον εντοπισμό των εξαρτήσεων μεταξύ ενεργειών. Σχηματικά, τα πλάνα μπορούν να αναπαρασταθούν με δύο κύριους τρόπους [Βλαχάβας κ.α., 2006]:

- με δίκτυα ενεργειών (procedural networks) των οποίων οι κόμβοι είναι ενέργειες που αναπαρίστανται με τη σχηματική μορφή που περιγράφηκε στην ενότητα 2.2.3 και οι κατευθυνόμενες ακμές δηλώνουν την ακολουθία των ενεργειών
- με ραβδογράμματα Gantt, όπου κάθε ράβδος αντιπροσωπεύει μια ενέργεια και το μήκος της ράβδου τη διάρκειά της, ενώ η θέση των ράβδων δείχνει τις ενέργειες που εκτελούνται παράλληλα.

Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα δίκτυο ενεργειών για τις τέσσερις πρώτες ενέργειες του παραπάνω πλάνου, ενώ στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται ένα ραβδόγραμμα Gantt για τις πρώτες έξι ενέργειες του παραπάνω πλάνου. Οι υπόλοιπες ενέργειες του πλάνου δεν εμφανίζονται στις συγκεκριμένες σχηματικές αναπαραστάσεις ώστε τα σχήματα να είναι ευδιάκριτα.



Εικόνα 10. Ένα δίκτυο ενεργειών για τις τέσσερις πρώτες ενέργειες του παραπάνω πλάνου.

0	1	2	3	4	5
PICK BALL1 ROOMA RIGHT	MOVE ROOMA ROOMB	DROP BALL4 ROOMB LEFT	MOVE ROOMB ROOMA	PICK BALL3 ROOMA LEFT	MOVE ROOMA ROOMB
PICK BALL4 ROOMA LEFT					

Εικόνα 11. Ένα ραβδόγραμμα Gantt για τις έξι πρώτες ενέργειες του παραπάνω πλάνου.

Ένας τρόπος αναπαράστασης πλάνων με ράβδους που μοιάζει με τα ραβδογράμματα Gantt υιοθετείται από την παρούσα προσέγγιση για την οπτικοποίηση των παραγόμενων πλάνων. Επιπλέον, η οπτικοποίηση των πλάνων στην παρούσα προσέγγιση απεικονίζει τις προϋποθέσεις και τα αποτελέσματα της κάθε ενέργειας που συμμετέχει στο πλάνο, καθώς και τις εξαρτήσεις μεταξύ τους, χαρακτηριστικό που εξυπηρετεί κυρίως σκοπούς επαλήθευσης της ορθότητας του πλάνου.

Κεφάλαιο 3

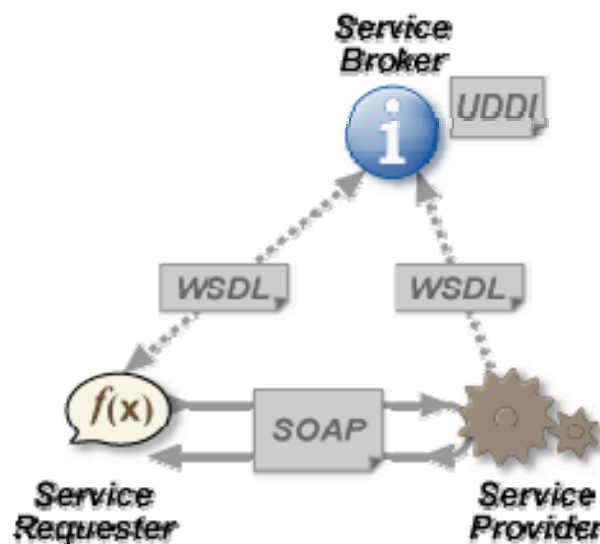
Σύνθεση Διαδικτυακών Υπηρεσιών

3.1. Εισαγωγή

Το Κεφάλαιο αυτό στοχεύει στην ανασκόπηση και κατηγοριοποίηση των μεθόδων σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, όπως προκύπτουν από τα τρέχοντα πρότυπα και βιβλιογραφία, καθώς και στη τοποθέτηση της έρευνας της παρούσας διδακτορικής διατριβής σε αυτό το πλαίσιο. Πριν αυτή τη παρουσίαση, ωστόσο, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν κάποια τεχνικά στοιχεία σχετικά με τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή, επικοινωνία και ανακάλυψη των ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών, ώστε να γίνουν κατανοητά όσα θα περιγραφούν στη συνέχεια.

Μια διαδικτυακή υπηρεσία (web service) ορίζεται από το World Wide Web Consortium [W3C] ως ένα σύστημα λογισμικού σχεδιασμένο να υποστηρίξει την συνεργασία μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων πάνω από κάποιο δίκτυο. Η διαδικτυακή υπηρεσία παρέχει μια διεπαφή που περιγράφεται σε κάποια μορφή κατανοητή από υπολογιστή, ενώ άλλα συστήματα έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνήσουν με τρόπο που καθορίζεται αυστηρά στον ορισμό της, χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα βασισμένα σε μηνύματα XML. Οι διαδικτυακές υπηρεσίες με αυτόν τον τρόπο παρέχουν έναν πρότυπο, καλά ορισμένο τρόπο επικοινωνίας και συνεργασίας μεταξύ συστημάτων λογισμικού ανεξάρτητο από την εσωτερική τους υλοποίηση ή το λειτουργικό σύστημα πάνω στο οποίο εκτελούνται αυτά.

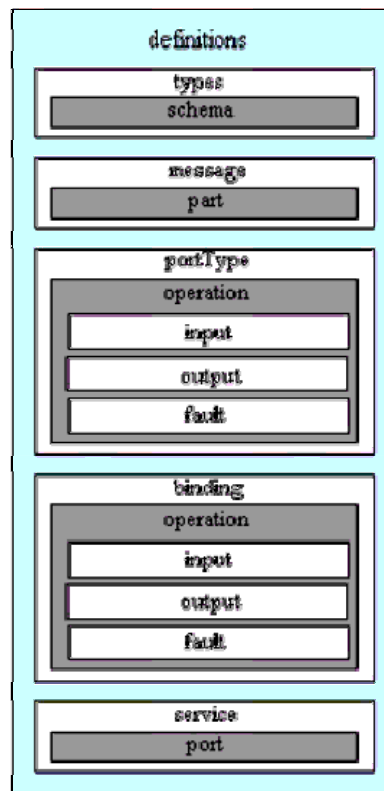
Το μοντέλο των διαδικτυακών υπηρεσιών περιλαμβάνει τρεις ρόλους: τον πάροχο της υπηρεσίας, ο οποίος δημιουργεί, περιγράφει και προσφέρει την υπηρεσία, τον εξυπηρετούμενο (client) ή καταναλωτή (consumer) της υπηρεσίας, ο οποίος χρησιμοποιεί την υπηρεσία με βάση την περιγραφή της, καθώς και τον ενδιάμεσο που εξυπηρετεί σκοπούς ανακάλυψης της υπηρεσίας [Dustdar and Schreiner, 2005]. Το μοντέλο της αρχιτεκτονικής και λειτουργίας των διαδικτυακών υπηρεσιών συνοψίζεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12. Το μοντέλο των διαδικτυακών υπηρεσιών [WS Architecture].

Η αρχιτεκτονική των διαδικτυακών υπηρεσιών δεν καθορίζει στοιχεία της εσωτερικής τους υλοποίησης, καθώς αυτά αφήνονται αποκλειστικά στον δημιουργό τους, αλλά καθορίζει τη διαλειτουργικότητα (interoperability) μεταξύ τους, δηλαδή περιγράφει εκείνα τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για να επιτευχθεί η ορθή επικοινωνία και συνεργασία μεταξύ τους [WS-arch]. Την τεχνολογία των διαδικτυακών υπηρεσιών συνθέτουν τρεις βασικοί άξονες: η περιγραφή τους (description), η επικοινωνία (communication) και η ανακάλυψή τους (discovery). Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται τα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί για καθεμία από τις τρεις δραστηριότητες.

Από τεχνικής απόψεως, μια διαδικτυακή υπηρεσία περιγράφεται από πρότυπα βασισμένα στην XML, ανάμεσα στα οποία έχει κυριαρχήσει η WSDL (Web Services Description Language) [WSDL]. Η WSDL περιγράφει συντακτικά την διαδικτυακή υπηρεσία σαν ένα σύνολο δικτυακών διεπαφών (network endpoints), σε διάφορα επίπεδα αφαίρεσης, ενώ η ίδια η διαδικτυακή υπηρεσία είναι μια απομακρυσμένη υλοποίηση αυτών των διεπαφών, ανεξάρτητη από λειτουργικά συστήματα, αρχιτεκτονικές και γλώσσες υλοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, η WSDL δηλώνει τις λειτουργίες που παρέχει η κάθε διαδικτυακή υπηρεσία, όπως και τον τρόπο που αυτή ανταλλάσσει δεδομένα μέσω μηνυμάτων. Η τυπική δομή ενός εγγράφου WSDL που περιγράφει μια διαδικτυακή υπηρεσία φαίνεται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13. Η δομή ενός εγγράφου WSDL [WSDL Structure].

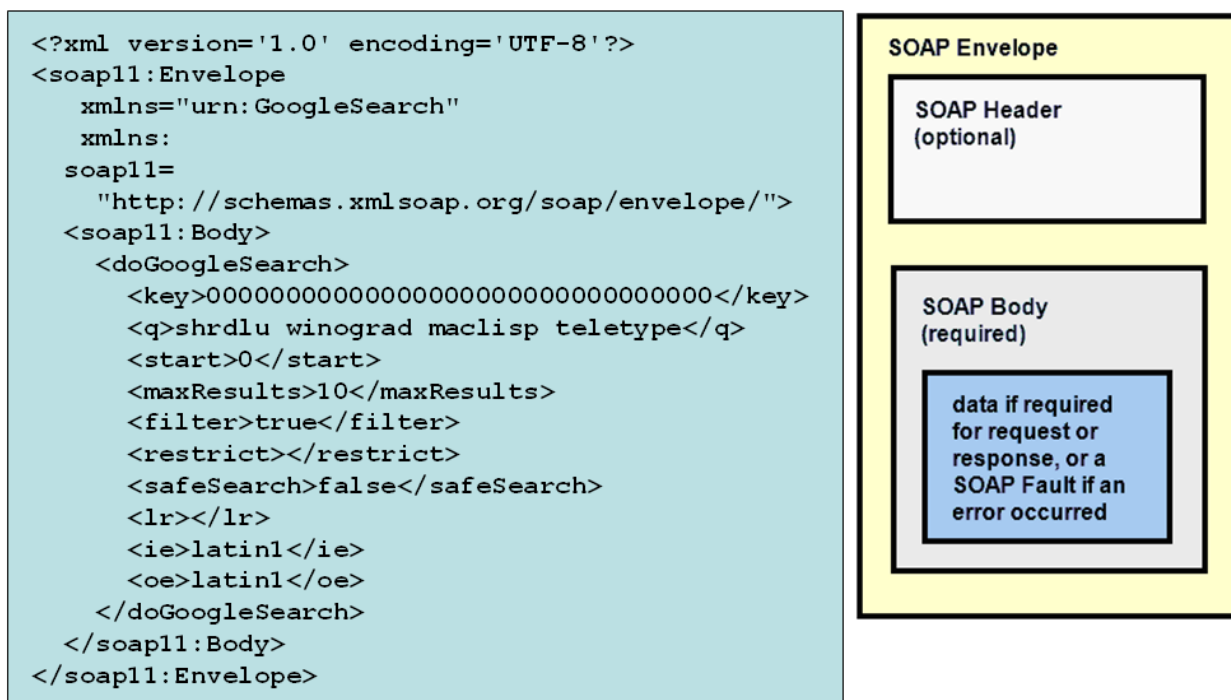
Στο τμήμα `types` ορίζονται οι τύποι δεδομένων, απλοί ή σύνθετοι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα μηνύματα που ανταλλάσσει η διαδικτυακή υπηρεσία με τον έξω κόσμο, ενώ στο τμήμα `message` δίνεται μια αφηρημένη περιγραφή αυτών των μηνυμάτων. Τυπικά, κάθε μήνυμα αντιστοιχεί σε μια λειτουργία της υπηρεσίας, και περιέχει τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για να εκτελεστεί η λειτουργία. Στο τμήμα `operation` ορίζονται όλες οι λειτουργίες που υποστηρίζονται από την υπηρεσία, και μπορούν να θεωρηθούν ανάλογες των μεθόδων (methods) ή των συναρτήσεων (functions) μιας γλώσσας προγραμματισμού. Το τμήμα `portType` ορίζει την διαδικτυακή υπηρεσία σαν το σύνολο λειτουργιών (operations) που υποστηρίζονται και των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται. Στο τμήμα `binding` ορίζονται συγκεκριμένα πρωτόκολλα και τύποι δεδομένων για κάθε `portType`, ενώ στο τμήμα `port` ορίζεται η διεύθυνση δικτύου στην οποία μπορεί να βρεθεί η κάθε υπηρεσία. Τέλος, το τμήμα `service` χρησιμοποιείται για να περικλείσει μέσα του το σύνολο των πληροφοριών που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν κάθε διαδικτυακή υπηρεσία, καθώς στο ίδιο WSDL αρχείο ενδέχεται να περιγραφούν περισσότερες από μία διαδικτυακές υπηρεσίες που χρησιμοποιούν κοινούς τύπους δεδομένων και μηνύματα. Ένα παράδειγμα εγγράφου WSDL για μια τυπική διαδικτυακή υπηρεσία παρουσιάζεται στην Εικόνα 14. Η συγκεκριμένη διαδικτυακή υπηρεσία λαμβάνει σαν είσοδο δύο αλφαριθμητικά (strings) που αντιπροσωπεύουν τα δεδομένα

ενός προβλήματος σχεδιασμού, δηλαδή το πεδίο ορισμού (domain) και ένα αντίστοιχο πρόβλημα (problem), εκφρασμένα σε PDDL. Στη συνέχεια πραγματοποιεί τη διαδικασία σχεδιασμού ενεργειών με τρόπο ο οποίος αποκρύπτεται από το έγγραφο WSDL, και επιστρέφει ένα αλφαριθμητικό που αναπαριστά το πλάνο που απέκτησε από την επίλυση του προβλήματος.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<definitions xmlns:http="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/http/" xmlns:soap="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/soap/"
  xmlns:s="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" xmlns:s0="HAP-WS" xmlns:soapenc="http://schemas.xmlsoap.org/soap/encoding/"
  xmlns:tm="http://microsoft.com/wsdl/mime/textMatching/" xmlns:mime="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/mime/"
  xmlns="http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/" targetNamespace="HAP-WS">
  <types>
    <s:schema elementFormDefault="qualified" targetNamespace="HAP-WS">
      <s:element name="HAP">
        <s:complexType>
          <s:sequence>
            <s:element minOccurs="0" maxOccurs="1" name="domain" type="s:string"/>
            <s:element minOccurs="0" maxOccurs="1" name="problem" type="s:string"/>
          </s:sequence>
        </s:complexType>
      </s:element>
    </s:schema>
  </types>
  <message name="HAPSoapIn">
    <part name="parameters" element="s0:HAP"/>
  </message>
  <message name="HAPSoapOut">
    <part name="parameters" element="s0:HAPResponse"/>
  </message>
  <portType name="HAPWClassSoap">
    <operation name="HAP">
      <documentation>The web method of calling HAP-WS. It takes three parameters: the domain file,
        the problem file and an instance of the HAP_Inputs structure,
        which is described in WSDL document and allows the user to configure planner parameters.
      </documentation>
      <input message="s0:HAPSoapIn"/>
      <output message="s0:HAPSoapOut"/>
    </operation>
  </portType>
  <binding name="HAPWClassSoap" type="s0:HAPWClassSoap">
    <soap:binding style="document" transport="http://schemas.xmlsoap.org/soap/http"/>
    <operation name="HAP">
      <soap:operation soapAction="HAP-WS/HAP" style="document"/>
      <input>
        <soap:body use="literal"/>
      </input>
      <output>
        <soap:body use="literal"/>
      </output>
    </operation>
  </binding>
  <service name="HAPWClass">
    <documentation>The Web Service interface of HAP planner which solves the problem.</documentation>
    <port name="HAPWClassSoap" binding="s0:HAPWClassSoap">
      <soap:address location="http://lpis.csd.auth.gr/systems/HAP-WS/HAP-WS.asmx"/>
    </port>
  </service>
</definitions>
```

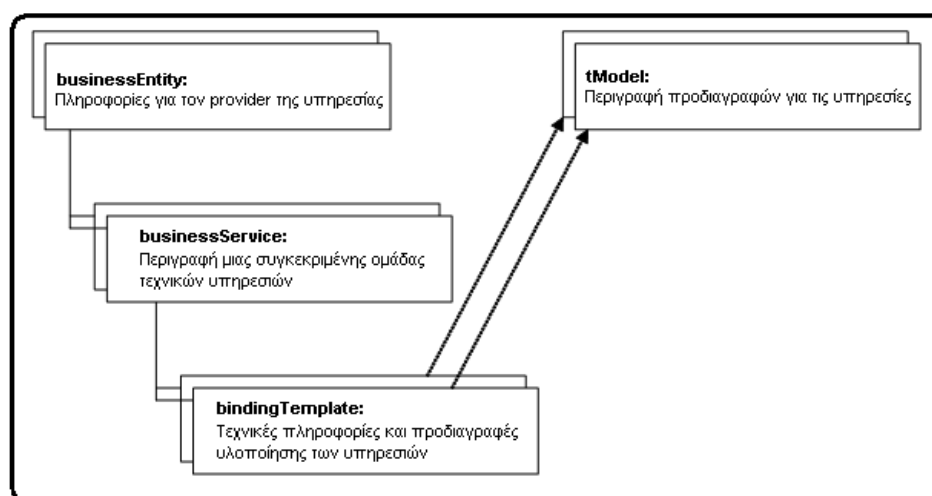
Εικόνα 14. Ένα παράδειγμα εγγράφου WSDL μιας διαδικτυακής υπηρεσίας.

Για την επικοινωνία ανάμεσα στις διαδικτυακές υπηρεσίες έχει επικρατήσει το πρότυπο SOAP (Simple Object Access Protocol) [SOAP], ένα πρωτόκολλο για την ανταλλαγή πληροφοριών μέσω δομημένων μηνυμάτων. Το SOAP βασίζεται στην XML για να περιγράψει την δομή των μηνυμάτων, ενώ λειτουργεί πάνω από άλλα πρωτόκολλα για τη διαπραγμάτευση και τη μεταφορά των μηνυμάτων [Booth et al, 2003], όπως το HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) [HTTP] και το RMI [RMI], κάτι που το καθιστά ανεξάρτητο από πλατφόρμες υλοποίησης και γλώσσες προγραμματισμού. Η τυπική δομή ενός μηνύματος SOAP καθώς και ένα παράδειγμα μηνύματος παρουσιάζονται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15. Η δομή ενός μηνύματος SOAP (δεξιά) και ένα παράδειγμα μηνύματος (αριστερά) [IBM SOAP].

Η τεχνολογία των διαδικτυακών υπηρεσιών συμπληρώνεται με τη δημοσίευση και ανακάλυψή τους, λειτουργίες που καθίστανται δυνατές μέσω μητρώων UDDI (Universal Description, Discovery and Integration) [UDDI]. Τα μητρώα UDDI επιτρέπουν τον εντοπισμό διαδικτυακών υπηρεσιών με εύκολο, γρήγορο και δυναμικό τρόπο, από απλούς χρήστες, εταιρίες ή ακόμα και άλλες διαδικτυακές υπηρεσίες. Η μορφή μιας εγγραφής σε ένα μητρώο UDDI παρουσιάζεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16. Μορφή εγγραφής σε μητρώο UDDI.

Οι πληροφορίες που παρέχονται από ένα μητρώο UDDI για την κάθε διαδικτυακή υπηρεσία μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες:

- *White Pages*: Αφορά τα στοιχεία μιας διαδικτυακής υπηρεσίας όπως πληροφορίες για τον πάροχο και την λειτουργία της (παρομοιάζονται με έναν τηλεφωνικό κατάλογο).
- *Yellow Pages*: Αφορούν κατηγοριοποίηση των διαδικτυακών υπηρεσιών ανάλογα με τη λειτουργία τους, βασισμένη σε γνωστές ταξινομίες (παρομοιάζονται με τον Χρυσό Οδηγό).
- *Green Pages*: Παρέχουν τις τεχνικές πληροφορίες για μια διαδικτυακή υπηρεσία (παρομοιάζονται με τεχνικά Εγχειρίδια Χρήσης).

Οι ατομικές διαδικτυακές υπηρεσίες γενικά έχουν περιορισμένες δυνατότητες, και σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι σε θέση να καλύψουν τις ανάγκες των χρηστών. Όταν απαιτείται αυξημένη λειτουργικότητα, είναι απαραίτητη η συνεργασία ατομικών υπηρεσιών για την παραγωγή σύνθετων, οι οποίες ικανοποιούν τις αυξημένες απαιτήσεις των χρηστών και υποστηρίζουν πολύπλοκες επιχειρησιακές διεργασίες, που ξεφεύγουν από τις δυνατότητες ενός παρόχου υπηρεσιών. Ο στόχος της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών είναι η παροχή πολύπλοκης λειτουργικότητας, αποκρύπτοντας ωστόσο την πολυπλοκότητα της διαδικασίας σύνθεσης από τον τελικό χρήστη, έτσι ώστε η εμπειρία που του προσφέρεται τελικά να μην διαφέρει σημαντικά από την χρήση μιας απλής διαδικτυακής υπηρεσίας.

Σε ότι αφορά τη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών μπορούν να διακριθούν δύο κύριες κατευθύνσεις οι οποίες έχουν αναπτυχθεί αρκετά ανεξάρτητα η μία από την άλλη [Srivastava and Koehler, 2003]. Από την μία πλευρά, στο πλαίσιο της προσέγγισης που ακολουθείται κυρίως από τον επιχειρηματικό κόσμο έχει αναπτυχθεί ένα σύνολο προτύπων βασισμένων στην XML για τον τυπικό (formal) ορισμό, σύνθεση και εκτέλεση διαδικτυακών υπηρεσιών [WS-I]. Η προσέγγιση αυτή αναπτύσσεται κατά βάση στο συντακτικό επίπεδο, καθώς η χρήση των διαδικτυακών υπηρεσιών αντιμετωπίζεται σαν απομακρυσμένη κλήση διεργασιών (remote procedure call). Τα πρωτόκολλα αλληλεπίδρασης, τα οποία καθορίζουν τον τρόπο που επιτυγχάνεται η διαλειτουργικότητα μεταξύ ατομικών υπηρεσιών, δημιουργούνται μη αυτόματα (manually) από ειδικούς και περιγράφονται με τη βοήθεια γλωσσών και προτύπων ορισμένων ειδικά για αυτόν τον σκοπό.

Από την άλλη, η κοινότητα του Σημασιολογικού Ιστού (Semantic Web) [Berners-Lee et al, 2001], επιχειρεί να εμπλουτίσει τις περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών συσχετίζοντας τις εισόδους (προϋποθέσεις) και τις εξόδους (αποτελέσματα) των διαδικτυακών υπηρεσιών με σημασιολογικούς όρους που οργανώνονται σε οντολογίες, και να προσεγγίσει τη διαδικασία της σύνθεσής τους χρησιμοποιώντας ευφυείς τεχνικές. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές για αυτοματοποιημένη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών προέρχονται από το χώρο της Τεχνητής Νοημοσύνης. Μια ανασκόπηση διαφόρων μεθόδων, γλωσσών και τεχνικών που εμπίπτουν σε αυτές τις δύο μεγάλες κατευθύνσεις παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου, με περισσότερη έμφαση στην περιγραφή των αυτοματοποιημένων τεχνικών, αφού η παρούσα εργασία τοποθετείται ανάμεσά τους. Η ανασκόπηση για λόγους πληρότητας περιλαμβάνει επίσης και μια ενδιάμεση προσέγγιση που αναφέρεται στη βιβλιογραφία και αφορά την ημι-αυτοματοποιημένη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών, η οποία στοχεύει σε αυτοματοποίηση ενός μόνο τμήματος της διαδικασίας σύνθεσης, όπως για παράδειγμα του εντοπισμού των ατομικών υπηρεσιών.

3.2. Μη αυτοματοποιημένες μέθοδοι και γλώσσες σύνθεσης

Η περιγραφή μιας διαδικτυακής υπηρεσίας με τη γλώσσα WSDL [WSDL] και τα υπόλοιπα πρότυπα για ανακάλυψη και επικοινωνία παραμένει στο συντακτικό επίπεδο, ορίζοντας μηνύματα που παρέχουν μια αφηρημένη περιγραφή των δεδομένων που ανταλλάσσονται με τον έξω κόσμο καθώς και των λειτουργιών που παρέχονται από τη διαδικτυακή υπηρεσία. Με βάση αυτή τη περιγραφή μπορούν να δημιουργηθούν προγράμματα – εξυπηρετούμενοι (client programs) που επικοινωνούν με την υπηρεσία εκμεταλλευόμενα την διεπαφή που προσφέρεται. Ωστόσο, μια τέτοια απλή περιγραφή δεν είναι επαρκής για την επιτυχημένη ολοκλήρωση των επιχειρησιακών διεργασιών (business processes) που βασίζονται σε πολλές διαδικτυακές υπηρεσίες αν δεν συμπληρωθεί με πληροφορίες για την σειρά εκτέλεσης των λειτουργιών και ανταλλαγής των μηνυμάτων μεταξύ των υπηρεσιών. Για αυτό το λόγο πρέπει να υποστηριχθεί η δυνατότητα σχηματισμού σύνθετων επιχειρησιακών διαδικασιών που περιλαμβάνουν περισσότερες της μιας διαδικτυακές υπηρεσίες που συνεργάζονται μεταξύ τους. Η διαδικασία σύνθεσης σε αυτή τη περίπτωση αναφέρεται ως μη αυτοματοποιημένη, καθώς, περιγράφονται στατικά τόσο η δομή των αλληλεπιδράσεων όσο και οι απλές υπηρεσίες που υλοποιούν τις ενέργειες που ορίζονται σε αυτές τις αλληλεπιδράσεις.

Για την περιγραφή των απαραίτητων αλληλεπιδράσεων που ακολουθούν σαφώς ορισμένα επιχειρησιακά μοντέλα έχει προκύψει ένας αξιοσημείωτος αριθμός γλωσσών και προτύπων

[Aalst et al, 2003; Bucchiarone and Gnesi, 2006], τα οποία αντιμετωπίζουν το ζήτημα της περιγραφής της σύνθεσης από διαφορετική σκοπιά, χωρίς ωστόσο να αποφεύγουν την αλληλοεπικάλυψη μεταξύ τους. Τα σημαντικότερα από αυτά τα πρότυπα περιγράφονται στις επόμενες ενότητες.

3.2.1. BPEL4WS

Η γλώσσα BPEL4WS [Thatte, 2003] είναι ένα καθιερωμένο πρότυπο για τον ορισμό επιχειρησιακών διεργασιών βασισμένων στις διαδικτυακές υπηρεσίες με τη χρήση XML. Εκτόπισε τα δύο παλαιότερα πρότυπα πρώτης γενιάς για ορισμό ροών εργασιών (workflows) βασισμένων σε διαδικτυακές υπηρεσίες, το XLANG της Microsoft [Thatte, 2001] και το WSFL της IBM [Leymann, 2001], αφού οι ιδέες των δύο αυτών προτύπων συγκλίνουν στην BPEL4WS. Η BPEL4WS επεκτείνει το μοντέλο αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαδικτυακών υπηρεσιών επιτρέποντάς του την περιγραφή σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών που αντιστοιχούν σε πολύπλοκες επιχειρησιακές διεργασίες, στις οποίες εμπλέκονται διαφορετικοί οργανισμοί. Το μοντέλο και η γραμματική που παρέχεται από την γλώσσα ορίζει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ πολλαπλών υπηρεσιών, την προσφερόμενη λειτουργικότητα από την παραγόμενη σύνθετη υπηρεσία και τους απαραίτητους κανόνες συντονισμού, ώστε να επιτευχθεί η υλοποίηση των επιχειρησιακών στόχων. Επιπλέον, προσφέρει τη δυνατότητα περιγραφής των καταστάσεων και της λογικής των αλληλεπιδράσεων, καθώς και έναν συστηματικό τρόπο χειρισμού εξαιρέσεων (exceptions), δηλαδή μη αναμενόμενων καταστάσεων. Η BPEL4WS υποστηρίζει τον ορισμό τόσο εκτελέσιμων (executable) όσο και αφηρημένων (abstract) επιχειρησιακών διεργασιών. Οι εκτελέσιμες επιχειρησιακές διεργασίες χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της συμπεριφοράς του καθενός από τους συμμετέχοντες σε μια αλληλεπίδραση. Οι αφηρημένες διεργασίες, οι οποίες ονομάζονται και επιχειρησιακά πρωτόκολλα αλληλεπίδρασης (business interaction protocols), χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τις δημόσιες και ορατές ανταλλαγές μηνυμάτων μεταξύ των διαφορετικών εμπλεκόμενων πλευρών (εταίρων) που λαμβάνουν μέρος σε μια αλληλεπίδραση, χωρίς να αποκαλύπτουν τίποτα για την εσωτερική τους δομή και υλοποίηση.

Για την εκτέλεση σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών που έχουν περιγραφεί σε BPEL απαιτούνται οι ανάλογες μηχανές εκτέλεσης (execution engines). Πολλές εταιρίες και οργανισμοί έχουν αναπτύξει τέτοιες μηχανές, βασισμένες σε μια ποικιλία τεχνολογιών. Ανάμεσα στις κυρίαρχες είναι η IBM WebSphere Business Integration Server Foundation [WBISF], η οποία αποτελεί μια πλήρη μηχανή BPEL που εκτελείται πάνω στην πλατφόρμα εξυπηρέτη

εφαρμογών Websphere (WebSphere Application Server) [WAS], καθώς και η Oracle BPEL Process Manager [OBPM], η οποία εκτελείται πάνω στον εξυπηρετή εφαρμογών Oracle (Oracle Application Server) [OAS]. Επίσης υπάρχουν προσεγγίσεις ανοικτού κώδικα, όπως η ActiveBPEL [ActiveBPEL] και η bexee [BEXEE]. Τέλος, αναφέρεται η ιδιαίτερα ελαφριά μηχανή Sliver [Hackman et al, 2006], που είναι σχεδιασμένη για εκτέλεση σε φορητές συσκευές (κινητά τηλέφωνα, PDAs), η οποία δείχνει το μεγάλο ενδιαφέρον που υπάρχει για την εκτέλεση σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών και τη μεγάλη διάδοση της τεχνολογίας αυτής.

Συμπληρωματικά έχει προταθεί το BPELJ [BPELJ], το οποίο επεκτείνει το BPEL4WS επιτρέποντας την εισαγωγή κώδικα Java μέσα σε έγγραφα BPEL. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα υποστήριξης λειτουργιών όπως υπολογισμοί τιμών μέσα σε έγγραφα, δημιουργία και καταστροφή εγγράφων χρησιμοποιώντας πληροφορίες από άλλα έγγραφα καθώς και υπολογισμοί τιμών για έλεγχο της ροής, για παράδειγμα μπορεί να σχηματισθεί μία δομή switch η οποία κατευθύνει τη ροή ανάλογα με το αποτέλεσμα ενός υπολογισμού [Milanovic & Malek, 2004].

Η δεύτερη έκδοση της γλώσσας BPEL [WS-BPEL2] ενσωμάτωσε δομές ελέγχου και διακλάδωσης (if-then-else), καθώς και δομές επανάληψης (while, repeat-until), επομένως η γλώσσα υποστηρίζει εγγενώς πλέον λειτουργίες ελέγχου ροής. Επιπλέον μια ακόμα σημαντική προσθήκη είναι η δυνατότητα δυναμικής παράλληλης κλήσης υπηρεσιών, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η προσαρμογή του αριθμού των βημάτων μιας διεργασίας με βάση τον αριθμό των συμμετεχόντων στη διεργασία αυτή, προσδίδοντας με αυτό το τρόπο αυξημένη ευελιξία.

3.2.2. WSCI

Η γλώσσα WSCI (Web Service Choreography Interface) [Arkin et al, 2002] είναι ένα XML πρότυπο για την γενική περιγραφή των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παρόχων και των χρηστών διαδικτυακών υπηρεσιών, προσανατολισμένη κυρίως στις ανταλλαγές μηνυμάτων μεταξύ των εμπλεκόμενων πλευρών. Το πρότυπο ορίζει την ροή των μηνυμάτων που ανταλλάσσει μια διαδικτυακή υπηρεσία, περιγράφοντας έτσι την ορατή συμπεριφορά της, αλλά δεν περιγράφει την εσωτερική συμπεριφορά και τις λειτουργίες της υπηρεσίας. Για αυτό το λόγο το πρότυπο δρα συμπληρωματικά με τις στατικές περιγραφές των λειτουργιών που ορίζει το πρότυπο WSDL, περιγράφοντας τον τρόπο αλληλεπίδρασης μεταξύ τους. Η περιγραφή των αλληλεπιδράσεων των διαδικτυακών υπηρεσιών γίνεται σε δύο επίπεδα. Σε ένα πρώτο επίπεδο το WSCI περιγράφει τα μηνύματα που στέλνει ή λαμβάνει μια διαδικτυακή υπηρεσία στο

πλαίσιο μιας διεργασίας, το οποίο αποτελεί μια μονόπλευρη περιγραφή που αφορά μόνο την ίδια την υπηρεσία. Σε ένα δεύτερο επίπεδο, ωστόσο, επιτρέπεται η περιγραφή των εξωτερικά παρατηρούμενων συμπεριφορών των υπηρεσιών, διευκολύνοντας έτσι την έκφραση χρονικών και λογικών εξαρτήσεων των ανταλλαγών μηνυμάτων μεταξύ των διαφορετικών υπηρεσιών, έτσι ώστε μια υπηρεσία μπορεί να επικοινωνήσει με μια άλλη ακολουθώντας τα επιθυμητά πρωτόκολλα συνεργασίας. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι το WSCI δίνει τη δυνατότητα χρήσης RDF για προσθήκη σημασιολογικής πληροφορίας στους ορισμούς των διεπαφών.

Η διαφορά της προσέγγισης αυτής σε σχέση με την προσέγγιση της BPEL4WS έγκειται στην κατανομημένη (distributed) εκτέλεση της σύνθετης επιχειρησιακής διεργασίας, σε αντίθεση με την κεντριοποιημένη εκτέλεση (centralized execution) σε κάποια μηχανή εκτέλεσης BPEL. Οι συμμετέχοντες σε μια *χορογραφία (choreography)* αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με βάση κάποιο καθολικό (global) σενάριο, χωρίς να υπάρχει, όπως στην περίπτωση της BPEL, ένα κοινό σημείο ελέγχου για όλους τους συμμετέχοντες σε μια αλληλεπίδραση.

3.2.3. WS-CDL

Η γλώσσα WS-CDL (Web Services Choreography Description Language) [Kavantzas et al, 2004] είναι επίσης βασισμένη στην XML και στοχεύει στον ορισμό της σύνθεσης συνεργασιών μακράς διάρκειας μεταξύ παρόχων και χρηστών διαδικτυακών υπηρεσιών. Παρέχει μια γενική καθολική περιγραφή της παρατηρούμενης εξωτερικής συμπεριφοράς όπου η σειρά των ανταλλασσόμενων μηνυμάτων μεταξύ όλων των συμμετεχόντων σε μια συνεργασία έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη ενός κοινού επιχειρησιακού στόχου. Όπως είναι προφανές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για την περιγραφή αφηρημένων διεργασιών, ανεξάρτητα από την εσωτερική υλοποίηση των ίδιων των διαδικτυακών υπηρεσιών. Η πρότασή της προέκυψε από την παρατήρηση ότι σε αρκετές περιπτώσεις απαιτείται η συνεργασία πολλών διαφορετικών εταίρων (οργανισμών, ανεξαρτήτων διεργασιών κτλ) ώστε να επιτευχθεί ένας κοινός στόχος, όμως οι κανόνες αυτής της συνεργασίας συνήθως περιγράφονται σε φυσική γλώσσα, ενώ λείπει ένας προτυποποιημένος τρόπος ορισμού των αλληλεπιδράσεων και των κανόνων που διέπουν αυτή τη συνεργασία. Με την χρήση της WS-CDL καθίσταται δυνατός ο καθολικός ορισμός της σειράς των μηνυμάτων και άλλων περιορισμών για την ανταλλαγή τους, και επομένως καθένας από τους συμμετέχοντες χρησιμοποιεί την περιγραφή αυτή για να αναπτύξει τις υπηρεσίες του με τρόπο που να συμμορφώνονται με τους κοινούς κανόνες.

3.2.4. WSCL

Η γλώσσα WSCL (Web Services Conversation Language) [WSCL, 2002] αποτελεί άλλο ένα πρότυπο που επιτρέπει τον ορισμό της εξωτερικής συμπεριφοράς των υπηρεσιών, καθορίζοντας τις αλληλεπιδράσεις τους («συζητήσεις», conversations) στο επιχειρησιακό επίπεδο, καθώς και τις δημόσιες διεργασίες που υποστηρίζουν. Οι αλληλεπιδράσεις καθορίζουν τα XML έγγραφα τα οποία ανταλλάσσονται σαν μέρος της αλληλεπίδρασης, καθώς και την επιτρεπόμενη σειρά αυτών των ανταλλαγών. Οι ίδιοι οι ορισμοί σε WSCL είναι XML έγγραφα, επομένως μπορούν με τη σειρά τους να αποτελούν αντικείμενο ανταλλαγής μεταξύ διαδικτυακών υπηρεσιών. Η αλληλεπίδραση συνήθως περιγράφεται από την οπτική του παρόχου της διαδικτυακής υπηρεσίας, όμως αυτή η περιγραφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξαχθεί η αντίστοιχη περιγραφή από την οπτική του χρήστη της υπηρεσίας. Η γλώσσα WSCL επιτυγχάνει τον διαχωρισμό της λογικής των αλληλεπιδράσεων από την επιχειρησιακή λογική και τα θέματα υλοποίησης μιας υπηρεσίας, για αυτό το λόγο υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά σε συνδυασμό με γλώσσες περιγραφής διαδικτυακών υπηρεσιών όπως η WSDL.

3.2.5. BPML

Η BPML (Business Process Management Language) [BPML, 2002] είναι μια γλώσσα για μοντελοποίηση αφηρημένων και εκτελέσιμων επιχειρησιακών διεργασιών. Δεν εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών αλλά γενικότερα στην ολοκλήρωση επιχειρησιακών εφαρμογών και στον ορισμό συνεργασιών με πολλούς συμμετέχοντες. Η BPML αντιλαμβάνεται μια διεργασία σαν μια σύνθεση δραστηριοτήτων και προσφέρει ευελιξία στον ορισμό της ροής ελέγχου, των δεδομένων και των γεγονότων με δομές ελέγχου όπως επιλογή υπό συνθήκη (conditional choice), σειριακή (sequential), επανάληψη (iteration) και παράλληλη εκτέλεση (parallel execution). Η BPML συμπληρώνεται από τους WSDL ορισμούς των διαδικτυακών υπηρεσιών, ενώ έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία και η δυνατότητα εισαγωγής σημασιολογικών μεταδεδομένων χρησιμοποιώντας πρότυπα όπως τα RDF και XHTML, ώστε να βελτιωθεί τόσο η αναγνωσιμότητα των εγγράφων από τον άνθρωπο όσο και η δυνατότητα κατανόησης και αυτόματης επεξεργασίας τους από τον υπολογιστή.

3.2.6. BPMN / XPDL

Η BPMN (Business Process Modeling Notation) [BPMN] αποτελεί μια γραφική αναπαράσταση για τον ορισμό επιχειρησιακών διεργασιών σε μια ροή εργασίας. Το κύριο στοιχείο της είναι ένα Διάγραμμα Επιχειρησιακής Διεργασίας (Business Process Diagram, BPD), ενώ ο ορισμός της παρέχει αντιστοίχιση μεταξύ της γραφικής σημειογραφίας (graphical notation) και των υποκείμενων δομών σε γλώσσες εκτέλεσης όπως η BPEL. Η BPMN μπορεί να μοντελοποιήσει τόσο εσωτερικές επιχειρησιακές διεργασίες, όσο και δημόσιες αφηρημένες διεργασίες. Επιπλέον, μοντελοποιεί συνεργατικές διεργασίες (collaboration processes), οι οποίες εμπεριέχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ δύο ή περισσότερων εταίρων, και οι οποίες ενδέχεται να υλοποιούνται μέσω διαδικτυακών υπηρεσιών.

Η XPDL (XML Process Definition Language) [XPDL] είναι ένα XML πρότυπο που έχει τυποποιηθεί από τον οργανισμό Workflow Management Coalition [WfMC] για την ανταλλαγή ορισμών επιχειρησιακών διεργασιών μεταξύ διαφορετικών εργαλείων και συστημάτων μοντελοποίησης. Χρησιμοποιείται ως πρότυπο ανταλλαγής διαγραμμάτων BPMN, αφού έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να καλύπτει πλήρως όλα τα στοιχεία της γλώσσας. Η XPDL αποθηκεύει πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την εκτέλεση μιας επιχειρησιακής διεργασίας, όπως και η BPEL, αλλά σε αντίθεση με την BPEL αποθηκεύει και γραφικές πληροφορίες.

3.3. Ημι-αυτοματοποιημένες μέθοδοι σύνθεσης

Στις ημι-αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις επιχειρείται να αυτοματοποιηθεί ένα μέρος μόνο της διαδικασίας σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, αφήνοντας συνήθως τον ορισμό των αλληλεπιδράσεων στον χρήστη και απελευθερώνοντάς τον από την υποχρέωση αναζήτησης ανάμεσα σε μεγάλο αριθμό διαδικτυακών υπηρεσιών για υπηρεσίες που πληρούν τις προδιαγραφές και τα κριτήρια σύνθεσης. Ο εντοπισμός των κατάλληλων διαδικτυακών υπηρεσιών που θα λάβουν μέρος στην αλληλεπίδραση δεν είναι ορισμένων εκ των προτέρων, αλλά γίνεται με δυναμικό τρόπο. Ο στόχος των προσεγγίσεων αυτών είναι η ανεξαρτησία από την υλοποίηση στην περιγραφή των επιχειρησιακών διεργασιών. Εφόσον οι περιγραφές των επιχειρησιακών διεργασιών είναι στατικές, η δομή της αλληλεπίδρασης μπορεί επίσης να περιγραφεί στατικά, ενώ το δυναμικό τμήμα της διαδικασίας αφορά τον εντοπισμό και την επιλογή ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών.

Τέτοιες προσεγγίσεις στοχεύουν στη σύνθεση ροών εργασίας (workflow composition), παραλληλίζοντας μια ροή εργασίας με μια σύνθετη διαδικτυακή υπηρεσία [Casati et al, 2001]. Όπως ο ορισμός μιας σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας περιλαμβάνει ένα σύνολο από ατομικές υπηρεσίες μαζί με τις δομές ελέγχου, ροής δεδομένων και ανταλλαγής μηνυμάτων ανάμεσα στις υπηρεσίες αυτές, παρομοίως ο ορισμός μιας ροής εργασίας πρέπει να καθορίσει τις αλληλεπιδράσεις των επιμέρους εργασιών [Rao and Su, 2004]. Αν λοιπόν το πρόβλημα της σύνθεσης αντιμετωπιστεί σαν πρόβλημα ορισμού μιας ροής εργασίας, τα σύγχρονα επιτεύγματα της έρευνας στο πεδίο της αυτοματοποίησης ροών εργασίας μπορούν να εφαρμοστούν και να προσφέρουν τα πλεονεκτήματά τους στη διαδικασία σύνθεσης.

Στην περίπτωση της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών για την υποστήριξη ροών εργασίας, το μοντέλο αφηρημένων διεργασιών, το οποίο περιλαμβάνει ένα σύνολο από εργασίες (tasks) και τις εξαρτήσεις των δεδομένων τους (data dependencies), πρέπει να είναι προκαθορισμένο από τον χρήστη πριν αρχίσει η διαδικασία σύνθεσης. Η αυτοματοποίηση που επιτυγχάνεται έγκειται μόνο στην αναζήτηση και επιλογή για την κάθε επιμέρους εργασία μιας διαδικτυακής υπηρεσίας η οποία είναι σε θέση να την εκπληρώσει, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τους πιθανούς περιορισμούς.

Ένα παράδειγμα συστήματος το οποίο υλοποιεί την προσέγγιση που περιγράφηκε μόλις είναι το EFlow [Casati et al, 2000]. Το EFlow είναι μια πλατφόρμα για τον ορισμό, την τυποποίηση και την διαχείριση σύνθετων υπηρεσιών, στο οποίο μια σύνθετη υπηρεσία μοντελοποιείται από ένα γράφο που ορίζει τη σειρά εκτέλεσης μεταξύ των κόμβων της διεργασίας. Ο γράφος ενδέχεται να περιέχει κόμβους υπηρεσίας (service), απόφασης (decision) και συμβάντος (event). Οι κόμβοι υπηρεσίας αναπαριστούν την κλήση μιας ατομικής ή σύνθετης υπηρεσίας, οι κόμβοι απόφασης καθορίζουν εναλλακτικά μονοπάτια και κανόνες που διέπουν την ροή εκτέλεσης, ενώ οι κόμβοι συμβάντος επιτρέπουν στις υπηρεσίες να στείλουν ή να λάβουν διαφόρους τύπους γεγονότων. Ο γράφος αυτός δεν δημιουργείται αυτόματα, αλλά ορίζεται από τον χρήστη, επομένως απαιτείται από μέρους του σχετικά καλή γνώση του πεδίου του προβλήματος. Η αυτοματοποίηση που προσφέρεται από το σύστημα αφορά στην προσάρτηση υπαρκτών υπηρεσιών σε κόμβους, ακολουθώντας τις προδιαγραφές που καθορίζονται από τον χρήστη κατά τον ορισμό των κόμβων. Για να αποφευχθούν περιπτώσεις προβλήματος λόγω μη διαθεσιμότητας κάποιας ατομικής υπηρεσίας, η προσάρτηση υπηρεσίας σε κόμβο χρειάζεται να πραγματοποιηθεί εκ νέου κάθε φορά που ενεργοποιείται ένας κόμβος υπηρεσίας, καθώς δεν υπάρχουν εκ των προτέρων εγγυήσεις για την διαθεσιμότητα μιας υπηρεσίας την στιγμή ενεργοποίησης του αντίστοιχου κόμβου υπηρεσίας.

3.4. Αυτοματοποιημένες μέθοδοι σύνθεσης

Οι προσεγγίσεις που περιγράφηκαν παραπάνω αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της σύνθεσης θεωρώντας τον κόσμο στατικό και γνωστό, στο πλαίσιο μιας επιχείρησης, ενός οργανισμού ή γενικότερα κάποιων συνεργαζόμενων φορέων. Στην πραγματικότητα όμως ο κόσμος των διαδικτυακών υπηρεσιών είναι κάθε άλλο παρά στατικός, εφόσον το Διαδίκτυο είναι ένα ανοικτό μέσο και ο κάθε πάροχος έχει την ελευθερία να προσφέρει συνεχώς καινούριες υπηρεσίες ή να τροποποιεί τις υπάρχουσες. Στη διαχείριση αυτού του μεγάλου και συνεχώς μεταβαλλόμενου όγκου διαδικτυακών υπηρεσιών συμβάλλει ο Σηματολογικός Ιστός και η αυτοματοποίηση της ανακάλυψης και της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών.

Παρά τις προσπάθειες για την ανάπτυξη κοινών προτύπων περιγραφής απλών και σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών, η διαδικασία της επεξεργασίας και της σύνθεσής τους έχει ιδιαίτερα μεγάλη πολυπλοκότητα που οφείλεται στους παρακάτω λόγους [Rao and Su, 2004]:

- Ο αριθμός των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών αυξάνεται συνεχώς λόγω της εξαιρετικά γρήγορης δημιουργίας νέων και της εύκολης έκθεσης της λειτουργικότητας υπάρχοντων συστημάτων ως διαδικτυακές υπηρεσίες. Επομένως η διαδικασία της σύνθεσης θα πρέπει να διενεργεί αναζήτηση σε ιδιαίτερα εκτεταμένα αποθετήρια υπηρεσιών, τα οποία τείνουν να αυξάνονται με γρήγορους ρυθμούς.
- Οι διαδικτυακές υπηρεσίες ενδέχεται να τροποποιηθούν πολλές φορές από τη στιγμή δημιουργίας τους, κάτι που σε αρκετές περιπτώσεις ενδέχεται να επηρεάσει και την εξωτερική τους διεπαφή και ακολούθως τον τρόπο επικοινωνίας με αυτές. Η διαδικασία σύνθεσης πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύσει τέτοιου είδους αλλαγές και να δράσει ανάλογα σε πραγματικό χρόνο, ενώ πολλές φορές ως απλούστερη λύση προτείνεται η εκτέλεση της διαδικασίας από την αρχή.
- Διάφορες διαδικτυακές υπηρεσίες που αναπτύσσονται από διαφορετικούς οργανισμούς χρησιμοποιούν διαφορετικά μοντέλα εννοιών (concepts) και φυσικές γλώσσες για την περιγραφή τους. Τα υπάρχοντα πρότυπα ορίζουν την επικοινωνία με το πέρασμα παραμέτρων και υποστηρίζουν συντακτικούς ελέγχους, όμως η σηματολογία των παραμέτρων αυτών παίζει καθοριστικό ρόλο στη σύνθεση. Η ταυτοποίηση και η αντιστοίχιση αυτών των εννοιών στις παραμέτρους είναι μια χρονοβόρα και δύσκολη διαδικασία.

Είναι φανερό ότι η αυξανόμενη πολυπλοκότητα καθιστά το χρόνο που απαιτείται για τη μη αυτοματοποιημένη διαδικασία σύνθεσης ιδιαίτερα μεγάλο, επομένως η σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών κρίνεται σκόπιμο να στραφεί σε τεχνικές που ευνοούν την αυτοματοποίησή της. Οι τεχνικές αυτές γενικά εμπίπτουν στην περιοχή της Τεχνητής Νοημοσύνης και διευκολύνουν την αυτοματοποίηση ολόκληρης της διαδικασίας σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, από την ανακάλυψη των κατάλληλων ατομικών υπηρεσιών μέχρι και την παραγωγή της ροής εργασίας ως ένα τελικό πλάνο σύνθεσης. Όμως, η εφαρμογή των περισσότερων από τις τεχνικές αυτές δεν είναι δυνατή χωρίς σημασιολογική πληροφορία, ενώ για τις υπόλοιπες η προσθήκη σημασιολογίας διευκολύνει τη διαδικασία σύνθεσης καθιστώντας την ορθότερη και αποδοτικότερη.

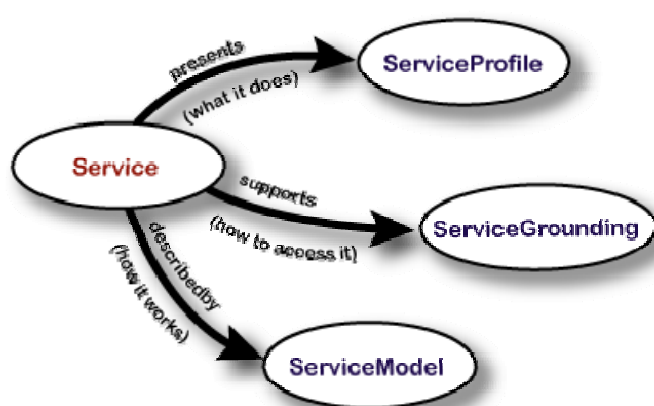
Διάφορα πρότυπα έχουν αναπτυχθεί για την έκφραση σημασιολογικών πληροφοριών σχετικά με τις διαδικτυακές υπηρεσίες, όπως τα OWL-S [OWL-S] και WSMO (Web Service Modeling Ontology) [WSMO], τα οποία αποτελούν οντολογίες περιγραφής σημασιολογικών διαδικτυακών υπηρεσιών, και τα SAWSDL (Semantic Annotations for Web Service Description Language) [SAWSDL] και WSDL-S (Web Service Description Language - Semantics) [WSDL-S], οι οποίες είναι συμβατές και λειτουργούν συμπληρωματικά με το τρέχον πρότυπο για συντακτική περιγραφή των υπηρεσιών WSDL. Το πρότυπο που φαίνεται ότι έχει επικρατήσει ανάμεσα στα άλλα για προσθήκη σημασιολογικής πληροφορίας σε διαδικτυακές υπηρεσίες και χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις στις παρακάτω τεχνικές, αλλά και στην προσέγγιση της παρούσας διατριβής, είναι η OWL-S, για αυτό το λόγο θα ακολουθήσει μια συνοπτική περιγραφή της.

Το πρότυπο OWL-S είναι μια ανώτερη οντολογία (upper ontology) βασισμένη στην OWL [OWL], η οποία έχει δημιουργηθεί στο πλαίσιο του Σημασιολογικού Ιστού για να περιγράψει γνώση σχετική με τις σημασιολογικές διαδικτυακές υπηρεσίες. Αποτελεί τη νεότερη έκδοση της DAML-S [DAML+OIL]. Χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις οντολογίες στις οποίες ανήκουν οι έννοιες που εμφανίζονται στις περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών σε OWL-S, οι οποίες είτε δίνονται μαζί με τις περιγραφές, είτε αποτελούν μέρος κάποιας διαδεδομένης, γενικού ενδιαφέροντος οντολογίας όπως για παράδειγμα η SUMO (Suggested Upper Merged Ontology) [SUMO] ή οντολογίες ορισμένες στο πλαίσιο του SKOS (Simple Knowledge Organization System) [SKOS]. Η χρήση της διευκολύνει χρήστες, ευφυείς πράκτορες ή άλλα συστήματα λογισμικού να ανακαλύψουν, να καλέσουν και να συνθέσουν σημασιολογικές διαδικτυακές υπηρεσίες με αυτόματο τρόπο.

Πιο συγκεκριμένα, η ανάπτυξη της OWL-S καθιστά τη σημασιολογία των διαδικτυακών υπηρεσιών κατανοητή από τον υπολογιστή, επομένως επιτρέπει την επίτευξη των ακόλουθων στόχων [W3C OWL-S]:

- *Αυτοματοποιημένη ανακάλυψη διαδικτυακών υπηρεσιών:* με την ανάπτυξη του Σημασιολογικού Ιστού, περισσότερες σημασιολογικές διαδικτυακές υπηρεσίες είναι διαθέσιμες. Η OWL-S θα επιτρέψει την αυτόματη ανακάλυψη της κατάλληλης διαδικτυακής υπηρεσίας από ευφυείς πράκτορες, με βάση κριτήρια ποιότητας και απαιτήσεις του χρήστη, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.
- *Αυτοματοποιημένη κλήση διαδικτυακών υπηρεσιών:* επί του παρόντος, η κλήση μιας διαδικτυακής υπηρεσίας απαιτεί την ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου προγράμματος που βασίζεται στην WSDL περιγραφή της. Η OWL-S επιτρέπει σε αυτόνομους πράκτορες να διαβάσουν την περιγραφή μιας διαδικτυακής υπηρεσίας, να κατανοήσουν τις εισόδους, τις εξόδους και άλλες απαιτήσεις της και να την καλέσουν.
- *Αυτοματοποιημένη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών:* με την OWL-S καθίσταται δυνατή η διαλειτουργικότητα μεταξύ ατομικών υπηρεσιών που προσφέρονται στο δίκτυο, ώστε να επιτευχθεί σύνθετη λειτουργικότητα, με χρήση μόνο των υψηλού επιπέδου περιγραφών τους.

Η οντολογία OWL-S για μια διαδικτυακή υπηρεσία αναγνωρίζει τρία κύρια μέρη, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στην Εικόνα 17.



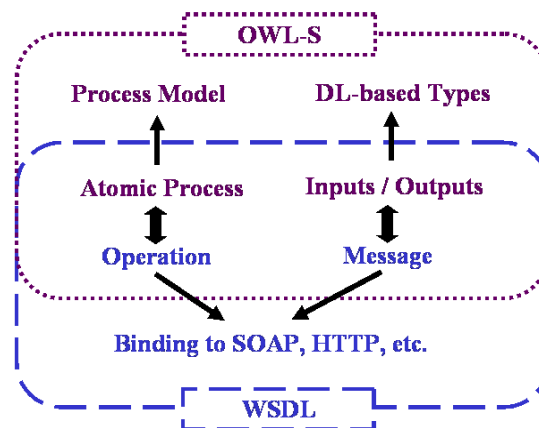
Εικόνα 17. Τα μέρη της περιγραφής μιας διαδικτυακής υπηρεσίας σε OWL-S [W3C OWL-S].

- *Service profile:* Χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη λειτουργία της διαδικτυακής υπηρεσίας και περιλαμβάνει πληροφορίες όπως όνομα και

περιγραφή, περιορισμούς ποιότητας και πληροφορίες για τον πάροχο.

- *Process model*: Περιγράφει τον τρόπο με τον οποίον μπορεί ο εξυπηρετούμενος / καταναλωτής της υπηρεσίας να επικοινωνήσει με αυτή.
- *Service grounding*: Περιγράφει λεπτομέρειες της επικοινωνίας όπως πρωτόκολλα και διευθύνσεις.

Εκτός από την προσέγγιση που αναφέρεται παραπάνω για την περιγραφή σημασιολογικών διαδικτυακών υπηρεσιών, η OWL-S έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί και συμπληρωματικά με την WSDL, εφόσον υπάρχει ήδη ένας σημαντικός όγκος περιγραφών διαδικτυακών υπηρεσιών εκφρασμένων σε αυτό το πρότυπο. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η επιλογή των δυνατών σημείων κάθε προτύπου, δηλαδή της εκφραστικότητας της OWL-S όσον αφορά τη σημασιολογία και τους τύπους δεδομένων, και της υποστήριξης της WSDL μέσω συστημάτων λογισμικού και πρωτοκόλλων μεταφοράς. Οι αντιστοιχίες μεταξύ των δύο προτύπων φαίνονται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18. Αντιστοιχίες μεταξύ OWL-S και WSDL [OWL-S].

Παράδειγμα ενός service profile μιας διαδικτυακής υπηρεσίας σε OWL-S φαίνεται στην Εικόνα 19. Περιέχει το όνομα και την περιγραφή της υπηρεσίας, καθώς και πληροφορίες για τις παραμέτρους της. Η συγκεκριμένη διαδικτυακή υπηρεσία δέχεται σαν παράμετρο εισόδου τον αριθμό ISBN ενός βιβλίου, εντοπίζει το βιβλίο και επιστρέφει σαν παραμέτρους εξόδου τον τίτλο και τον συγγραφέα του. Η διαδικτυακή υπηρεσία ανήκει στο σύνολο δοκιμών (test set) OWLS-TC [OWLS-TC], το οποίο περιέχει και την αντίστοιχη οντολογία books στην οποία ανήκουν οι έννοιες ISBN, Book και Author που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τη

σημασιολογία των παραμέτρων εισόδου και εξόδου. Η περιγραφή της υπηρεσίας (service profile) παρέχει αναφορές στο μοντέλο διεργασίας (process model) και στις πληροφορίες υλοποίησης (service grounding) της υπηρεσίας, όπως αυτά περιγράφηκαν παραπάνω, τα οποία δίνουν επιπλέον πληροφορία για τον τρόπο κλήσης και λειτουργίας της.

```
<?xml version="1.0" encoding="WINDOWS-1252"?>
<rdf:RDF xmlns:owl = "http://www.w3.org/2002/07/owl#"
xmlns:rdfs = "http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
xmlns:rdf = "http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
xmlns:service = "http://www.daml.org/services/owl-s/1.1/Service.owl#"
xmlns:process = "http://www.daml.org/services/owl-s/1.1/Process.owl#"
xmlns:profile = "http://www.daml.org/services/owl-s/1.1/Profile.owl#"
xmlns:grounding = "http://www.daml.org/services/owl-s/1.1/Grounding.owl#"
xml:base = "http://127.0.0.1/services/1.1/isbn_bookauthor_service.owl">
<owl:Ontology rdf:about="">
<owl:imports rdf:resource="http://127.0.0.1/ontology/Service.owl" />
<owl:imports rdf:resource="http://127.0.0.1/ontology/Process.owl" />
<owl:imports rdf:resource="http://127.0.0.1/ontology/Profile.owl" />
<owl:imports rdf:resource="http://127.0.0.1/ontology/Grounding.owl" />
<owl:imports rdf:resource="http://127.0.0.1/ontology/portal.owl" />
<owl:imports rdf:resource="http://127.0.0.1/ontology/portal.owl" />
</owl:Ontology>
<service:Service rdf:ID="ISBN_BOOKAUTHOR_SERVICE">
<service:presents rdf:resource="#ISBN_BOOKAUTHOR_PROFILE"/>
<service:describedBy rdf:resource="#ISBN_BOOKAUTHOR_PROCESS_MODEL"/>
<service:supports rdf:resource="#ISBN_BOOKAUTHOR_GROUNDING"/>
</service:Service>
<profile:Profile rdf:ID="ISBN_BOOKAUTHOR_PROFILE">
<service:isPresentedBy rdf:resource="#ISBN_BOOKAUTHOR_SERVICE"/>
<profile:serviceName xml:lang="en"> BookProviderService </profile:serviceName>
<profile:textDescription xml:lang="en">
This service provides a book and its author, on the given ISBN.
</profile:textDescription>
<profile:hasInput rdf:resource="#_ISBN"/>
<profile:hasOutput rdf:resource="#_BOOK"/>
<profile:hasOutput rdf:resource="#_AUTHOR"/>
<profile:has_process rdf:resource="ISBN_BOOKAUTHOR_PROCESS" /></profile:Profile>
<process:ProcessModel rdf:ID="ISBN_BOOKAUTHOR_PROCESS_MODEL">
<service:describes rdf:resource="#ISBN_BOOKAUTHOR_SERVICE"/>
<process:hasProcess rdf:resource="#ISBN_BOOKAUTHOR_PROCESS"/>
</process:ProcessModel>
<process:AtomicProcess rdf:ID="ISBN_BOOKAUTHOR_PROCESS">
<process:hasInput rdf:resource="#_ISBN"/>
<process:hasOutput rdf:resource="#_BOOK"/>
<process:hasOutput rdf:resource="#_AUTHOR"/>
</process:AtomicProcess>
<process:Input rdf:ID="_ISBN">
<process:parameterType rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#anyURI">
http://127.0.0.1/ontology/portal.owl#ISBN</process:parameterType>
<rdfs:label></rdfs:label>
</process:Input>
<process:Output rdf:ID="_BOOK">
<process:parameterType rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#anyURI">
http://127.0.0.1/ontology/portal.owl#Book</process:parameterType>
<rdfs:label></rdfs:label>
</process:Output>
<process:Output rdf:ID="_AUTHOR">
<process:parameterType rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#anyURI">
http://127.0.0.1/ontology/books.owl#Author</process:parameterType>
<rdfs:label></rdfs:label>
</process:Output>
<grounding:WsdLGrounding rdf:ID="ISBN_BOOKAUTHOR_GROUNDING">
<service:supportedBy rdf:resource="#ISBN_BOOKAUTHOR_SERVICE"/>
</grounding:WsdLGrounding>
</rdf:RDF>
```

Εικόνα 19. Ένα παράδειγμα υπηρεσίας σε OWL-S.

Στο υπόλοιπο της ενότητας αυτής παρουσιάζονται τεχνικές που έχουν προταθεί για την αυτοματοποιημένη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών, μαζί με ενδεικτικά συστήματα τα οποία έχουν εφαρμόσει τις αντίστοιχες τεχνικές. Τα περισσότερα συστήματα αποδέχονται και χρησιμοποιούν το πρότυπο της OWL-S για τη σημασιολογική περιγραφή των διαδικτυακών υπηρεσιών.

3.4.1. Σχεδιασμός σε Ιεραρχικά Δίκτυα Διεργασιών

Οι τεχνικές σχεδιασμού ενεργειών HTN (Hierarchical Task Network) προσεγγίζουν το πρόβλημα σε διάφορα επίπεδα αφαίρεσης και βασίζονται στην ιεραρχική αποσύνθεση με βάση τα δίκτυα διεργασιών [Erol et al, 1994]. Η είσοδος σε ένα σύστημα σχεδιασμού αποτελείται από ένα αρχικό δίκτυο διεργασιών (task network) που αντιπροσωπεύει το πρόβλημα προς επίλυση δηλαδή τις απαιτήσεις σχετικά με τη σύνθετη διαδικτυακή υπηρεσία. Ένα δίκτυο διεργασιών αποτελείται από αφηρημένες διεργασίες που ορίζονται με βάση άλλες διεργασίες. Υπάρχουν τρεις τύποι διεργασιών, οι πρωταρχικές (primitive tasks) οι οποίες αντιστοιχούν σε απλούς τελεστές STRIPS και μπορούν να εκτελεστούν απευθείας, οι σύνθετες (compound tasks), οι οποίες απαρτίζονται από ένα σύνολο απλούστερων διεργασιών, και οι διεργασίες – στόχοι (goal tasks) οι οποίες περιγράφονται μέσω συνθηκών ως οι επιθυμητές ιδιότητες μιας τελικής κατάστασης, στην προκειμένη περίπτωση μιας σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας. Επιπλέον δίνεται ένα σύνολο τελεστών που περιγράφουν τα αποτελέσματα κάθε πρωταρχικής διεργασίας, δηλαδή κάθε ατομικής διαδικτυακής υπηρεσίας, καθώς και ένα σύνολο μεθόδων, που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι σύνθετες διεργασίες μπορούν να αποσυντεθούν σε απλούστερες. Η διαδικασία σχεδιασμού σε πρώτη φάση αποσυνθέτει διαδοχικά όλες τις σύνθετες διεργασίες που περιλαμβάνονται στο αρχικό δίκτυο διεργασιών σε πρωταρχικές διατηρώντας τους περιορισμούς, ενώ σε δεύτερη φάση, όταν το δίκτυο περιέχει μόνο πρωταρχικές διεργασίες, βρίσκει ένα πλάνο που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς. Το πλάνο αυτό αποτελεί περιγραφή της σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας και αποτελείται μόνο από πρωταρχικές διαδικασίες, οι οποίες αντιστοιχίζονται σε ατομικές διαδικτυακές υπηρεσίες.

Το σύστημα SHOP2 [Sirin et al, 2004] δημιουργήθηκε σαν γενικής χρήσης σύστημα σχεδιασμού ενεργειών σε ιεραρχικά δίκτυα διεργασιών, αλλά χρησιμοποιήθηκε αργότερα για να συνθέσει αυτόματα διαδικτυακές υπηρεσίες. Το SHOP2 διαφέρει από άλλα HTN συστήματα σχεδιασμού, επειδή η διαδικασία σχεδιασμού βρίσκει τις ενέργειες που αποτελούν το πλάνο ακολουθώντας την σειρά εκτέλεσης των εργασιών όπως αυτή καθορίζεται στη σύνθετη επιχειρησιακή

διεργασία. Με αυτό το τρόπο καθίσταται δυνατή η γνώση της κατάστασης του κόσμου σε κάθε βήμα της διαδικασίας σχεδιασμού, και επομένως είναι δυνατή η εφαρμογή ευριστικών τεχνικών ή τεχνικών συμπερασμού για αύξηση της απόδοσης και επιτάχυνση της διαδικασίας σύνθεσης.

Τα βήματα που ακολουθούνται κατά την επίλυση ενός προβλήματος σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών με το SHOP2 είναι τα ακόλουθα:

- *Βήμα 1: Μετατροπή των Μοντέλων Διεργασιών (Process Models) OWL-S σε πεδία ορισμού του SHOP2.* Σε αυτό το βήμα οι ατομικές διεργασίες αναπαρίστανται με τελεστές SHOP2, ενώ για κάθε σύνθετη διεργασία δημιουργείται μια ή περισσότερες αντίστοιχες μέθοδοι οι οποίες καθορίζουν πως αυτή αποσυντίθεται.
- *Βήμα 2: Μετατροπή ενός προβλήματος σύνθεσης υπηρεσιών OWL-S σε πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών SHOP2.* Το πρόβλημα περιγράφεται αφηρημένα σαν μια σύνθετη διεργασία η οποία πρέπει να αποσυντεθεί σε απλούστερες για τις οποίες υπάρχει η δυνατότητα να αντιστοιχισθούν σε πραγματικές υπηρεσίες.
- *Βήμα 3: Επίλυση του προβλήματος και εύρεση πλάνου από το σύστημα σχεδιασμού του SHOP2.* Η λύση στο πρόβλημα επιχειρείται να δοθεί με αποσύνθεση αφηρημένων διεργασιών υψηλότερων επιπέδων σε απλούστερες, κάτι για το οποίο κατά κανόνα υπάρχουν πολλές εναλλακτικές προσεγγίσεις. Προς το παρόν οι πληροφορίες για τους τρόπους με τους οποίους γίνεται μια τέτοια αποσύνθεση λαμβάνονται στατικά από τις περιγραφές των υπηρεσιών σε OWL-S.

Επιπλέον, στο σύστημα έχει συμπεριληφθεί υποσύστημα μετατροπής του πλάνου που παράγεται από το σύστημα σχεδιασμού του SHOP2 σε μορφή OWL-S, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα απευθείας εκτέλεσης της σύνθετης υπηρεσίας από συστήματα εκτέλεσης και παρακολούθησης (execution and monitoring systems).

3.4.2. Σχεδιασμός ενεργειών με Εκτίμηση Αναγωγής

Στα συστήματα αυτά στη γενική περίπτωση οι έξοδοι της επιθυμητής σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας αναπαρίστανται σαν κατάσταση - στόχος, οι είσοδοί της σαν αρχική κατάσταση, ενώ οι διαθέσιμες ατομικές διαδικτυακές υπηρεσίες αναπαρίστανται ως τελεστές που μετατρέπουν μια κατάσταση σε άλλη. Όλες οι πιθανές καταστάσεις που μπορούν να προκύψουν με εφαρμογή ενός αυθαίρετου αριθμού ενεργειών στην αρχική κατάσταση συγκροτούν τον χώρο των καταστάσεων (state space).

Τα συστήματα σχεδιασμού με εκτίμηση αναγωγής (estimated regression planners) χρησιμοποιούν ανάστροφη ανάλυση (backward analysis) της δυσκολίας του στόχου ώστε να καθοδηγήσουν μια ορθή αναζήτηση (forward search) της λύσης στον χώρο καταστάσεων. Η αναζήτηση καθοδηγείται από έναν ευριστικό εκτιμητή που καθορίζεται με χρήση ανάστροφης συλλογιστικής (backward chaining) σε έναν σε ένα χώρο προβλήματος που προκύπτει από χαλάρωση, η οποία αγνοεί της αλληλεπιδράσεις μεταξύ των τελεστών που επιτυγχάνουν στόχους, και συγκεκριμένα αγνοεί πλήρως τις διαγραφές (deletions). Ο χώρος που δημιουργείται έτσι είναι αρκετά μικρότερος από τον χώρο καταστάσεων και ένα σύστημα σχεδιασμού δύναται να τον αναπαραστήσει πλήρως μέσω ενός γράφου αναγωγής (regression graph).

Για τη χρήση τους στο πεδίο της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών έχει προταθεί η επέκταση των κλασικών συμβολισμών, όπως η PDDL. Η εκτέλεση μιας υπηρεσίας ενδέχεται να έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή πληροφορίας, ωστόσο, κάτι τέτοιο σε ορισμένες περιπτώσεις δεν αναπαρίσταται κατάλληλα με την δομή :effect της PDDL. Η πρόταση που γίνεται με τη συγκεκριμένη προσέγγιση θεωρεί τέτοιου είδους πληροφορία σαν τιμή (value) ενός τελεστή, η οποία μπορεί να δράσει σαν είσοδος σε μεταγενέστερα βήματα του πλάνου. Για τον ορισμό της, η γλώσσα PDDL επεκτείνεται συμπεριλαμβάνοντας τη δομή :value στον ορισμό των τελεστών [McDermott, 2002], η οποία εκτός από την πραγματική τιμή των δεδομένων που επιστρέφονται από μία υπηρεσία, έχει τη δυνατότητα να εκφράσει τους τύπους αυτών των δεδομένων. Η νέα γλώσσα που δημιουργήθηκε μετά από αυτές τις αλλαγές ονομάστηκε Opt [McDermott, 2003], ενώ αντίστοιχα τροποποιήθηκε ο υπάρχων σχεδιαστής ενεργειών Unpop [McDermott, 1996; 1999] δίνοντας τον Optop (Opt-based total-order), ο οποίος έχει τη δυνατότητα να χειρίζεται τις νέες απαιτήσεις της γλώσσας και χρησιμοποιείται για προβλήματα σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών.

Το σύστημα που υλοποιεί την παραπάνω πρόταση χρησιμοποιήθηκε πειραματικά για απλά προβλήματα σύνθεσης, αναπαριστώντας το πρόβλημα απευθείας σε PDDL, διευκρινίζοντας ωστόσο τη δυνατότητα αναπαράστασης σε DAML. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή δεν αντιμετώπισε θέματα όπως κλιμάκωση και πλάνα υπό προϋποθέσεις ή επαναληπτικά πλάνα, ενώ η έρευνα σε αυτόν τον τομέα βρίσκεται ακόμα σε αρχικά στάδια [Chan et al, 2007].

3.4.3. Σχεδιασμός με Έλεγχο Μοντέλων

Μια προσέγγιση της αυτοματοποιημένης σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών μέσω Σχεδιασμού με Έλεγχο Μοντέλων (Planning as Model Checking) επιχειρεί να λύσει το πρόβλημα με χρήση του συστήματος σχεδιασμού ενεργειών MBP, μετά από τροποποιήσεις και επεκτάσεις που

68

υπέστη ώστε να έχει τη δυνατότητα χειρισμού της περίπτωσης των διαδικτυακών υπηρεσιών [Pistore et al, 2004; 2005]. Στο σύστημα που προτείνεται μπορούν να εισαχθούν και να συντεθούν αυτόματα ατομικές υπηρεσίες που έχουν περιγραφεί σαν αφηρημένες διεργασίες σε BPEL4WS, δεδομένης μιας διεργασίας στόχου που αντιπροσωπεύει την σύνθετη υπηρεσία που επιθυμεί ο χρήστης, εκφρασμένης σε κάποια κατάλληλη γλώσσα. Η τελική σύνθετη υπηρεσία που παράγεται από τη διαδικασία επίλυσης εκφράζεται επίσης σε BPEL4WS.

Ο σχεδιασμός με έλεγχο μοντέλων όπως υλοποιείται στο σύστημα MBP, αλλά και γενικότερα, βασίζεται στην ιδέα της μοντελοθεωρητικής επίλυσης προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Τα πεδία ορισμού τυποποιούνται σαν σημασιολογικά μοντέλα (semantic models), οι ιδιότητές τους σαν χρονικοί τύποι (temporal formulas), ενώ ο σχεδιασμός πραγματοποιείται εξερευνώντας τον χώρο καταστάσεων του σημασιολογικού μοντέλου και επαληθεύοντας σε κάθε βήμα την αλήθεια των χρονικών τύπων. Στα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης περιλαμβάνονται το ότι είναι καλά θεμελιωμένη, η τυποποίηση των προβλημάτων είναι ξεκάθαρη, και είναι αρκετά γενική ώστε να εφαρμόζεται σε μεγάλο εύρος προβλημάτων σχεδιασμού [Giunchiglia and Traverso, 1999].

Η προσέγγιση αυτή επιχειρεί να επιλύσει προβλήματα σχεδιασμού αντιμετωπίζοντας θέματα όπως ο μη-ντετερμινισμός (non-determinism), η μερική δυνατότητα παρατήρησης (partial observability) και οι επεκταμένοι στόχοι (extended goals) [Bertoli et al, 2003], θέματα που στην περίπτωση της σύνθεσης των διαδικτυακών υπηρεσιών προκύπτουν συχνά. Ο μη-ντετερμινισμός προκύπτει από το γεγονός ότι το σύστημα σχεδιασμού ενεργειών δεν είναι σε θέση να προβλέψει τις πραγματικές αλληλεπιδράσεις που θα λάβουν χώρα με τις εξωτερικές διεργασίες, ενώ η μερική δυνατότητα παρατήρησης αναφέρεται στο γεγονός ότι το σύστημα σχεδιασμού δεν έχει πλήρη γνώση της εσωτερικής κατάστασης αυτών των διεργασιών. Οι επεκταμένοι στόχοι είναι απαραίτητοι εφόσον σε αρκετές περιπτώσεις οι επιχειρησιακές απαιτήσεις καθορίζουν σύνθετες συνθήκες που διέπουν ολόκληρη τη συμπεριφορά μιας διεργασίας και όχι μόνο την τελική της κατάσταση [Pistore et al, 2004].

Παρά τα πλεονεκτήματά του, το συγκεκριμένο σύστημα δεν είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει σημασιολογική πληροφορία κατά την σύνθεση, κάτι που αποτελεί ένα σοβαρό μειονέκτημα. Ανάμεσα στα μειονεκτήματα του συστήματος επίσης συγκαταλέγεται η δυσκολία κλιμάκωσης σε μεγαλύτερα και πιο πολύπλοκα πρωτόκολλα αλληλεπίδρασης, επειδή τα αποτελέσματα που αφορούν την απόδοση δείχνουν ότι σε τέτοιες περιπτώσεις ο χώρος καταστάσεων ενδέχεται να γίνει ιδιαίτερα μεγάλος [Chan et al, 2007].

Άλλο ένα σύστημα που ακολουθεί αυτή τη προσέγγιση είναι αυτό που περιγράφεται στο [Yu and Reiff-Marganiec, 2006]. Σε αυτή την εργασία αναγνωρίζεται η δυσκολία χρήσης της τεχνικής σχεδιασμού με έλεγχο μοντέλων στις διαδικτυακές υπηρεσίες, όπου το μοντέλο αλληλεπίδρασής τους είναι βασισμένο στα μηνύματα. Για αυτό το λόγο επιχειρείται η αναπαράσταση των διαδικτυακών υπηρεσιών με ένα μοντέλο βασισμένο σε καταστάσεις. Αυτό πραγματοποιείται θεωρώντας ότι κάθε λειτουργία (operation) μιας διαδικτυακής υπηρεσίας αντιστοιχίζεται σε μια κατάσταση η οποία εσωκλείει τις αλλαγές μετά την εκτέλεση της συγκεκριμένης λειτουργίας. Εκτός από την παραπάνω αναπαράσταση, για την περίπτωση της σύνθεσης των διαδικτυακών υπηρεσιών είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη κι άλλοι παράγοντες όπως οι ροές των μηνυμάτων, οι επιχειρησιακοί ρόλοι και οι απαιτήσεις ποιότητας. Το πλαίσιο που προτείνεται σε αυτή τη προσέγγιση αποτελείται από τέσσερις φάσεις:

- Στην πρώτη φάση καθορίζεται ο στόχος (δηλαδή η επιθυμητή σύνθετη υπηρεσία), καθώς και η γνώση για την αρχική κατάσταση.
- Η δεύτερη φάση είναι αυτή της εξαγωγής του μοντέλου. Οι υπηρεσίες που αποτελούν το πλάνο επιλέγονται αυτόματα και γίνεται χρήση οντολογιών για να αποκτηθεί σημασιολογική πληροφορία για αυτές.
- Στην τρίτη φάση εκτελείται ο αλγόριθμος αναζήτησης πλάνου, που μπορεί να δώσει ένα σύνολο κατάλληλων πλάνων.
- Στην τέταρτη και τελευταία φάση επιλέγεται το καλύτερο πλάνο, μεταφράζεται σε εκτελέσιμο χρησιμοποιώντας την γλώσσα BPEL, και η εκτέλεσή του παρακολουθείται. Σε περίπτωση αποτυχίας εκτέλεσης, επιλέγεται κάποιο εναλλακτικό πλάνο, αν υπάρχει.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης περιλαμβάνουν την αυξημένη δυνατότητα κλιμάκωσης και επαναχρησιμοποίησης, εφόσον τα παραγόμενα πλάνα μετά την εκτέλεσή τους δεν καταστρέφονται αλλά προστίθενται σε αποθετήρια για μελλοντική χρήση, αν και οι διαδικτυακές υπηρεσίες αλλάζουν με τόσο γρήγορους ρυθμούς που τα πλάνα αυτά γρήγορα ενδέχεται να θεωρηθούν απαρχαιωμένα. Ένα σημαντικό μειονέκτημα σε σχέση με τις άλλες προσεγγίσεις σύνθεσης μέσω σχεδιασμού με έλεγχο μοντέλων είναι η χρήση μόνο απλών στόχων.

3.4.4. Λογισμός Καταστάσεων

Η Golog [Levesque et al, 1997] είναι μια γλώσσα λογικού προγραμματισμού που βασίζεται στον λογισμό καταστάσεων για να ορίσει και να εκτελέσει σύνθετους τελεστές σε δυναμικά πεδία ορισμού. Στην προσέγγιση που παρουσιάζεται στα [McIlraith et al, 2001; McIlraith and Son, 2002], επιχειρείται η τροποποίηση της Golog ώστε να προσαρμοστεί στην σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών. Το πρόβλημα της σύνθεσης αντιμετωπίζεται μέσω του ορισμού γενικών αφηρημένων προτύπων διεργασιών τα οποία τροποποιούνται μέσω προσαρμοζόμενων περιορισμών. Η γενική ιδέα πίσω από αυτή τη προσέγγιση βασίζεται σε ευφυείς πράκτορες (intelligent agents) οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιούν συλλογισμούς πάνω στις διαδικτυακές υπηρεσίες με σκοπό την αυτόματη ανακάλυψη, εκτέλεση και σύνθεσή τους. Οι απαιτήσεις του χρήστη και οι περιορισμοί αναπαρίστανται με τη βοήθεια του λογισμού καταστάσεων. Κάθε διαδικτυακή υπηρεσία αντιστοιχίζεται σε έναν τελεστή, είτε πρωταρχικό, ο οποίος μπορεί να αλλάζει την κατάσταση του κόσμου ή να παράγει κάποια πληροφορία, είτε σύνθετο, ο οποίος αποτελείται από πρωταρχικούς τελεστές. Η βάση γνώσης των πρακτόρων παρέχει μια λογική κωδικοποίηση των προϋποθέσεων και των αποτελεσμάτων των διαδικτυακών υπηρεσιών με όρους λογισμού καταστάσεων. Οι πράκτορες χρησιμοποιούν δομές διαδικαστικών γλωσσών προγραμματισμού για να συνδέσουν ατομικές υπηρεσίες ώστε να δημιουργηθεί μια σύνθετη.

Ο λογισμός καταστάσεων (situation calculus) [McCarthy and Hayes, 1969; Reiter, 1991] είναι ένας λογικός φορμαλισμός που σχεδιάστηκε για αναπαράσταση και συλλογιστική σε δυναμικά πεδία ορισμού. Διαφέρει από άλλες τεχνικές σχεδιασμού ενεργειών στον τρόπο με τον οποίον περιγράφεται η κατάσταση του κόσμου, μέσω συναρτήσεων f που περιέχουν σχεσιακές μεταβλητές (relational fluents), οι οποίες περιέχουν όρους τ που περιγράφουν μια κατάσταση s : $f(\tau, s)$ [Chan et al, 2007]. Τα κύρια στοιχεία του λογισμού είναι οι τελεστές (actions) που μπορούν να εφαρμοσθούν στον κόσμο, οι μεταβλητές (fluents) που περιγράφουν την κατάσταση του κόσμου και οι καταστάσεις (situations). Ένα πεδίο ορισμού περιγράφεται από ένα σύνολο τύπων που περιλαμβάνουν για κάθε τελεστή τα αξιώματα προϋποθέσεων του, για κάθε μεταβλητή τα αξιώματα της διαδοχικής κατάστασης, τα αξιώματα που περιγράφουν τον κόσμο στις διάφορες καταστάσεις και τα θεμελιώδη αξιώματα του λογισμού καταστάσεων.

Οι περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών σε OWL-S αναπαρίστανται μέσω του λογισμού καταστάσεων, ενώ η σύνθετη υπηρεσία περιγράφεται επίσης σε OWL-S [Narayanan, McIlraith, 2002]. Η PDDL χρησιμοποιείται σαν ένα ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ των μετατροπών. Η Golog

χρησιμοποιείται για να βρεθεί ένα κατάλληλο πλάνο σύνθεσης και να εκτελεστεί σαν ένα πρόγραμμα Golog που ικανοποιεί τις ιδιότητες του στόχου.

3.4.5. Σχεδιασμός με χρήση κανόνων

Ένα σύστημα που επιχειρεί αυτοματοποιημένη σύνθεση μέσω σχεδιασμού ενεργειών βασισμένου σε κανόνες (Rule-Based Planning) είναι το SWORD [Ponnekanti and Fox, 2002]. Το σύστημα δεν χρησιμοποιεί κάποιο από τα τρέχοντα πρότυπα περιγραφής διαδικτυακών υπηρεσιών, αλλά περιγράφει τις διαδικτυακές υπηρεσίες αναφέροντας τις εισόδους και τις εξόδους τους (προϋποθέσεις και αποτελέσματα) με τη βοήθεια του μοντέλου Οντοτήτων – Συσχετίσεων (Entity – Relationship Model). Για τη κάθε διαδικτυακή υπηρεσία δημιουργείται ένας κανόνας Horn [Horn, 1951] που υποδεικνύει τα αποτελέσματα που θα επιτευχθούν αν αληθεύουν οι προϋποθέσεις του. Η διαδικασία της σύνθεσης απαιτεί τον ορισμό των αρχικών και τελικών καταστάσεων, και το πλάνο λαμβάνεται με χρήση ενός έμπειρου συστήματος βασισμένου σε κανόνες. Αν το πλάνο που δημιουργήθηκε είναι ικανοποιητικό, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ζητήσει την αναπαράστασή του σαν σύνθετη διαδικτυακή υπηρεσία, καθώς και την εκτέλεσή του. Σε περιπτώσεις που η συμπεριφορά κάποιων υπηρεσιών κατά την εκτέλεση του πλάνου αποκλίνει από την προβλεπόμενη, για παράδειγμα σε περίπτωση που κάποια υπηρεσία επιστρέψει πολλαπλές εναλλακτικές εξόδους, απαιτείται παρέμβαση του χρήστη για επίλυση του θέματος πριν την συνέχιση της εκτέλεσης.

Το σύστημα *WebDG*, το οποίο δημιουργεί σύνθετες υπηρεσίες αυτόματα χρησιμοποιώντας δηλωτικές περιγραφές υψηλού επιπέδου, αφορά το θεματικό πεδίο της ηλεκτρονικής διακυβέρνησης, ωστόσο έχει υλοποιηθεί ακολουθώντας μια γενικότερη προσέγγιση σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών με χρήση κανόνων σύνθεσης (composability rules) [Medjahed et al, 2003]. Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί ευρέως οντολογίες που έχουν οριστεί με την γλώσσα DAML+OIL [DAML+OIL, 2001] ώστε να αναπαραστήσει και να αναγνωρίσει τη σημασιολογία των διαδικτυακών υπηρεσιών. Επιπλέον, το σύστημα χρησιμοποιεί κανόνες σύνθεσης ώστε να αποφανθεί αν δύο υπηρεσίες είναι συνθέσιμες, οι οποίοι αφορούν τόσο τις συντακτικές όσο και τις σημασιολογικές τους ιδιότητες. Οι συντακτικοί κανόνες διέπουν τους τρόπους λειτουργίας (operation modes) καθώς και τα πρωτόκολλα υλοποίησης (binding protocols) (τα υποσύνολα κανόνων καλούνται mode composability και binding composability αντίστοιχα). Οι σημασιολογικοί κανόνες αφορούν: (1) τα μηνύματα (message composability), συγκρίνοντας στοιχεία όπως ο αριθμός και ο τύπος των παραμέτρων τους, δηλαδή την συμβατότητα των εξόδων μιας υπηρεσίας με τις εισόδους της άλλης, (2) την σημασιολογία των λειτουργιών

(operation semantics composability), δηλαδή τη συμβατότητα μεταξύ των πεδίων ορισμού, των κατηγοριών και των σκοπών των υπηρεσιών, (3) την ποιότητα (qualitative composability), συγκρίνοντας αν ταιριάζουν οι απαιτήσεις του χρήστη με την ποιότητα των λειτουργιών που προσφέρονται από τις διαδικτυακές υπηρεσίες, και (4) την ορθότητα σύνθεσης (composition soundness), η οποία καθορίζει αν η σύνθεση κάποιων υπηρεσιών είναι λογική και έχει νόημα από σημασιολογική σκοπιά.

Το σύστημα λειτουργεί σε τέσσερις φάσεις:

- Φάση καθορισμού (specification phase), που επιτρέπει την υψηλού επιπέδου περιγραφή των επιθυμητών σύνθετων υπηρεσιών με χρήση της γλώσσας CSSL (Composite Service Specification Language), η οποία έχει οριστεί για να εξυπηρετήσει τους σκοπούς της εν λόγω προσέγγισης.
- Φάση ταιριάσματος (matchmaking phase), στην οποία χρησιμοποιούνται οι κανόνες σύνθεσης ώστε να δημιουργηθούν πλάνα σύνθεσης που συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του χρήστη.
- Φάση επιλογής (selection phase), στην οποία επιλέγεται κάποιο πλάνο, αν στην προηγούμενη φάση έχουν δημιουργηθεί περισσότερα από ένα, με βάση παραμέτρους ποιότητας.
- Φάση δημιουργίας (generation phase), η οποία δημιουργεί μια λεπτομερή περιγραφή της σύνθετης υπηρεσίας.

3.4.6. Υβριδικός Σχεδιασμός

Ένα σύστημα που εμφανίστηκε πρόσφατα είναι το OWLS-Xplan [Klusch et al, 2005], το οποίο χρησιμοποιεί σημασιολογικές περιγραφές διαδικτυακών υπηρεσιών σε OWL-S για να δημιουργήσει το πεδίο ορισμού και το πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών και στη συνέχεια επιχειρεί να αποκτήσει λύση καλώντας το σύστημα σχεδιασμού Xplan. Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται ως υβριδικός σχεδιασμός επειδή για την επίλυση του προβλήματος το σύστημα Xplan επεκτείνει το σύστημα σχεδιασμού FastForward [FF] με ένα υποσύστημα σχεδιασμού σε ιεραρχικά δίκτυα διεργασιών (HTN) για σχεδιασμό και επανα-σχεδιασμό, όταν αυτός είναι αναγκαίος.

Για τη διαμόρφωση του προβλήματος σχεδιασμού ενεργειών, το σύστημα χρησιμοποιεί τις σημασιολογικές περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών, εκφρασμένες σε OWL-S, μαζί με τις αντίστοιχες οντολογίες. Ωστόσο δεν πραγματοποιείται πλήρης εκμετάλλευση της σημασιολογικής πληροφορίας που περιέχεται σε αυτές, αφού η χρήση των οντολογιών δεν καταλήγει σε επίγνωση της σημασιολογίας των εννοιών, παρά μόνο σε διευκόλυνση της διαμόρφωσης του πεδίου ορισμού. Ακολούθως, δεν μπορεί να επέλθει σημασιολογική χαλάρωση κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενεργειών, επομένως η απόκτηση λύσης απαιτεί την ακριβή αντιστοίχιση των εισόδων και των εξόδων των ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών στο συντακτικό επίπεδο.

Το σύστημα OWLS-Xplan συμμορφώνεται ως ένα βαθμό με το πρότυπο της PDDL, αν και το πρόβλημα δεν αναπαρίσταται ευθέως με στοιχεία της γλώσσας. Οι δημιουργοί του συστήματος έχουν αναπτύξει μια διάλεκτο της PDDL που βασίζεται στην XML, που την ονόμασαν PDDXML, η οποία χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του προβλήματος από το σύστημα και την ανταλλαγή δεδομένων.

Το συγκεκριμένο σύστημα φαίνεται σαν μια υποσχόμενη προσέγγιση στο χώρο της αυτοματοποιημένης σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, κυρίως λόγω της μελλοντικής εργασίας των δημιουργών του, η οποία φαίνεται να εντοπίζεται στον χώρο της έκφρασης πρόσθετων, μη λειτουργικών απαιτήσεων των σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών. Ωστόσο, δεν υπάρχουν δεδομένα που αφορούν τη δυνατότητα κλιμάκωσής του, καθώς πειράματα με το σύστημα έχουν γίνει για πεδία ορισμού με αριθμό τελεστών της τάξεων των μερικών δεκάδων.

3.4.7. Απόδειξη Θεωρημάτων

Μία ακόμα αυτοματοποιημένη προσέγγιση στη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών χρησιμοποιεί την Αυτόματη Απόδειξη Θεωρημάτων (Automated Theorem Proving) [Loveland, 1978], η οποία είναι ένα πεδίο της Αυτόματης Συλλογιστικής (Automated Reasoning) για την απόδειξη μαθηματικών θεωρημάτων. Στο [Waldinger, 2001] οι διαθέσιμες υπηρεσίες και οι απαιτήσεις των χρηστών περιγράφονται σε μια γλώσσα πρώτης τάξης που σχετίζεται με την κλασσική λογική, και στη συνέχεια δημιουργούνται αποδείξεις χρησιμοποιώντας το σύστημα απόδειξης θεωρημάτων SNARK [SNARK]. Τελικά, οι περιγραφές των σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών εξάγονται από συγκεκριμένες αποδείξεις.

Στο [Rao et al, 2003] προτείνεται μια μέθοδος για αυτοματοποιημένη σύνθεση σημασιολογικών διαδικτυακών υπηρεσιών χρησιμοποιώντας απόδειξη θεωρημάτων μέσω γραμμικής λογικής

(Linear Logic theorem proving). Η μέθοδος χρησιμοποιεί την σημασιολογική γλώσσα DAML-S για εξωτερική αναπαράσταση των διαδικτυακών υπηρεσιών, ενώ εσωτερικά οι υπηρεσίες αναπαρίστανται με λογικά αξιώματα και αποδείξεις γραμμικής λογικής. Η γραμμική λογική επιτρέπει τον τυπικό ορισμό των ιδιοτήτων των διαδικτυακών υπηρεσιών, ενώ έχει στενή σχέση με τον π -λογισμό (π -calculus), που αποτελεί την τυπική θεωρητική βάση πολλών γλωσσών σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών. Στην προσέγγιση αυτή ο π -λογισμός συνδυάζεται με τους κανόνες της γραμμικής λογικής, ενώ το μοντέλο διεργασίας της σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας δημιουργείται απευθείας από την απόδειξη.

3.4.8. Μετασχηματισμός προβλήματος και σύνθεση μέσω κλασικού σχεδιασμού ενεργειών

Η γενική ιδέα πίσω από την εφαρμογή αυτής της μεθόδου στη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών είναι ότι η κάθε διαδικτυακή υπηρεσία μπορεί να μετασχηματισθεί και να αναπαρασταθεί με όρους σχεδιασμού ενεργειών, αντιστοιχίζοντας απευθείας τμήματα της OWL-S περιγραφής της υπηρεσίας σε στοιχεία ενός πεδίου ορισμού και ενός αντίστοιχου προβλήματος σχεδιασμού ενεργειών, ή σε στοιχεία PDDL γενικότερα.

Ένα τυπικό πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών σε γενικές γραμμές περιγράφεται από μια αρχική και μια τελική κατάσταση, καθώς και τους διαθέσιμους τελεστές που επιτρέπουν μεταβάσεις μεταξύ καταστάσεων. Για τον κάθε τελεστή πρέπει να καθοριστούν οι προϋποθέσεις του, δηλαδή το σύνολο των γεγονότων που πρέπει να ισχύει στην τρέχουσα κατάσταση για να είναι δυνατή η εφαρμογή του τελεστή, και τα αποτελέσματά του, από τα οποία προκύπτει η κατάσταση του κόσμου μετά την εφαρμογή του τελεστή. Σε αντιστοιχία με τους τελεστές, μια ατομική διαδικτυακή υπηρεσία λαμβάνει κάποιες εισόδους και παράγει κάποιες εξόδους. Επομένως, οι είσοδοι και οι εξοδοί της διαδικτυακής υπηρεσίας μπορούν να αναπαρασταθούν σαν προϋποθέσεις και αποτελέσματα τελεστών, αντίστοιχα. Μια ατομική διαδικτυακή υπηρεσία, όπως και ένας τελεστής, μεταβάλλει την κατάσταση του κόσμου μετά την εκτέλεσή της. Αν οι είσοδοι της επιθυμητής σύνθετης υπηρεσίας, δηλαδή τα διαθέσιμα δεδομένα που είναι σε θέση να παρέχει ο χρήστης, περιγραφούν σαν αρχική κατάσταση ενώ οι εξοδοί της, δηλαδή τα αποτελέσματα που επιθυμεί να επιτύχει ο χρήστης, σαν τελική κατάσταση, τότε αλγόριθμοι σχεδιασμού ενεργειών είναι σε θέση να σχηματίσουν πλάνα σύνθεσης αυτόματα χωρίς την ανάγκη ύπαρξης προηγούμενης γνώσης ή προκαθορισμένης ροής εργασιών [Carman et al., 2003; Rao and Su, 2004].

Η λύση της απευθείας αναπαράστασης περιγραφών διαδικτυακών υπηρεσιών OWL-S σε PDDL και η επίλυση του προβλήματος της σύνθεσης με διάφορα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών συμβατά με την PDDL, ανεξαρτήτως εσωτερικής τους υλοποίησης, είναι ιδιαίτερα ελκυστική λόγω των ομοιοτήτων μεταξύ των OWL-S και PDDL αναπαραστάσεων. Εφόσον η OWL-S έχει επηρεαστεί από την PDDL, η μετάφραση από την μία γλώσσα στην άλλη είναι ευθεία και φυσική, εφόσον χρησιμοποιείται μόνο δηλωτική πληροφορία [Rao and Su, 2004; Chan et al, 2007]. Επιπλέον, με κατάλληλη επεξεργασία των οντολογιών που συνοδεύουν τις OWL-S περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών μπορεί να επιτευχθεί σημασιολογική επίγνωση κατά την αναπαράσταση του προβλήματος. Ένα ακόμα μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι ανεξαρτητοποιεί την περιγραφή του προβλήματος από την επίλυσή του, και δεν απαιτεί καμία απολύτως τροποποίηση στα ίδια τα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών, αντίθετα με πολλές από τις προαναφερθείσες προσεγγίσεις οι οποίες επέκτειναν το εκάστοτε σύστημα σχεδιασμού ώστε να έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει την περίπτωση των διαδικτυακών υπηρεσιών. Έτσι δίνεται η δυνατότητα χρήσης οποιουδήποτε αλγορίθμου ή τεχνικής σχεδιασμού ενεργειών. Για αυτούς τους λόγους η συγκεκριμένη προσέγγιση κρίθηκε ιδιαίτερα υποσχόμενη και επιλέχθηκε ως η επικρατέστερη προς μελέτη και ανάπτυξη στην παρούσα διατριβή. Περισσότερες λεπτομέρειες για την συγκεκριμένη προσέγγιση και την τοποθέτηση της διατριβής παρέχονται στην ακόλουθη και τελευταία ενότητα του Κεφαλαίου.

Στον Πίνακα 2 συνοψίζονται οι προαναφερθείσες αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις. Η λύση της χρήσης τεχνικών σχεδιασμού ενεργειών γενικά παράγει πιο απλές αναπαραστάσεις του προβλήματος, ενώ δίνει τη δυνατότητα αξιοποίησης της σημασιολογικής πληροφορίας. Επιπλέον, η προσέγγιση που προτείνεται στην παρούσα διατριβή δίνει τη δυνατότητα χρήσης οποιουδήποτε συστήματος σχεδιασμού ενεργειών, επομένως εκμεταλλεύεται την σύγχρονη έρευνα και εξελίξεις στον τομέα αυτό.

Προσέγγιση	Αναπαράσταση ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών	Αναπαράσταση σύνθετης υπηρεσίας		Έξοδος	Συστήματα	Σχόλια	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
		Είσοδοι	Έξοδοι					
Σχεδιασμός σε Ιεραρχικά Δίκτυα Διεργασιών	Πρωταρχικές διεργασίες	Δίκτυο διεργασιών, σύνθετες διεργασίες		Πλάνο που αποτελείται μόνο από πρωταρχικές διεργασίες	SHOP2 [Sirin et al, 2004]	Το πρόβλημα προσεγγίζεται σε διάφορα επίπεδα αφαίρεσης βασισμένα στην ιεραρχική αποσύνθεση μέσω δικτύων διεργασιών	Εφαρμόζονται ευριστικές τεχνικές για αύξηση απόδοσης	Προϋποθέτει καλή γνώση του πεδίου, δεν εκμεταλλεύεται σημασιολογική πληροφορία
Σχεδιασμός με εκτίμηση αναγωγής	Τελεστές μετάβασης από μια κατάσταση σε άλλη	Αρχική κατάσταση	Κατάσταση - στόχος	Περιγραφή τελικής κατάστασης	Optop [McDermott, 2002]	Χρησιμοποιείται ένας ευριστικός εκτιμητής ώστε να καθοδηγηθεί μια ορθή αναζήτηση της λύσης στον χώρο καταστάσεων, επεκτείνεται ο κλασικός ορισμός της PDDL	Ευριστικά για επιτάχυνση αναζήτησης	Απαιτεί επέκταση προτύπων και συστημάτων σχεδιασμού, δυσκολία κλιμάκωσης
Σχεδιασμός με έλεγχο μοντέλων	Αφηρημένες διεργασίες (BPEL4WS)	Σύνθετη διεργασία - στόχος		Περιγραφή σύνθετης υπηρεσίας σε BPEL4WS	MBP [Pistore et al, 2004; 2005], [Yu and Reiff-Marganiec, 2006]	Βασίζεται στην ιδέα της μοντελοθεωρητικής επίλυσης προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών	Γενική, καλά θεμελιωμένη, ξεκάθαρη τυποποίηση προβλημάτων, αντιμετωπίζει μη ντετερμινισμό	Δεν χρησιμοποιεί σημασιολογική πληροφορία, δυσκολία κλιμάκωσης
Λογισμός καταστάσεων	Λογική κωδικοποίηση μέσω λογισμού καταστάσεων	Γενικά αφηρημένα πρότυπα διεργασιών που τροποποιούνται μέσω προσαρμοζόμενων περιορισμών		Περιγραφή μέσω δομών διαδικαστικών γλωσσών προγραμματισμού	[McIlraith et al, 2001; McIlraith and Son, 2002]	Τροποποίηση της Golog για τη σύνθεση, χρήση ευφυών με δυνατότητα συλλογισμού	Εκμετάλλευση έρευνας στο πεδίο του λογισμού καταστάσεων	Πολύπλοκη κωδικοποίηση και μετατροπή προβλήματος σύνθεσης, δυσκολία κλιμάκωσης, μειωμένη διαλειτουργικότητα

Σχεδιασμός με χρήση κανόνων	Περιγραφή εισόδων και εξόδων με το μοντέλο Οντοτήτων - Συσχετίσεων και κανόνων Horn	Αρχική κατάσταση	Τελική κατάσταση	Πλάνο που δημιουργείται μέσω κανόνων σύνθεσης	SWORD [Ponnekanti and Fox, 2002], WebDG [Medjahed et al, 2003]	Επίλυση μέσω έμπειρου συστήματος βασισμένου σε κανόνες	Εκμετάλλευση της έρευνας στον χώρο των έμπειρων συστημάτων βασισμένων σε κανόνες	Απαιτεί παρέμβαση του χρήστη κατά την εκτέλεση, μη απευθείας αντιστοιχίσεις διαδικτυακών υπηρεσιών και κανόνων, προϋποθέτει καλή γνώση του πεδίου
Υβριδικός σχεδιασμός	Ενέργειες / Πρωταρχικές διεργασίες	Αρχική Κατάσταση	Τελική κατάσταση	Πλάνο	OWLS-Xplan [Klusch et al, 2005]	Επίλυση μέσω συστήματος σχεδιασμού FastForward [FF] που έχει επεκταθεί με ένα υποσύστημα HTN	Συνδυασμός τεχνικών σχεδιασμού	Δεν εκμεταλλεύεται πλήρως τη σημασιολογική πληροφορία αφού δεν κάνει χρήση οντολογιών, προϋποθέτει γνώση του πεδίου
Απόδειξη θεωρημάτων	Περιγραφή σε γλώσσα πρώτης τάξης / Λογικά αξιώματα, αποδείξεις γραμμικής λογικής	Εξάγονται μέσω αποδείξεων θεωρημάτων		Λογική περιγραφή σύνθετης υπηρεσίας	[Waldinger, 2001] / SNARK, [Rao et al, 2003]	Η σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών αντιμετωπίζεται σαν ένα θεώρημα που πρέπει να αποδειχθεί	Εκμετάλλευση της έρευνας στο πεδίο της αυτόματης συλλογιστικής / αυτόματης απόδειξης θεωρημάτων	Πολύπλοκη κωδικοποίηση και αναπαράσταση προβλήματος σύνθεσης, μη εκμετάλλευση σημασιολογικής πληροφορίας
Μετασχηματισμός προβλήματος & κλασικός σχεδιασμός ενεργειών	Ενέργειες	Αρχική κατάσταση	Τελική κατάσταση	Πλάνο	PORSCE	Η προσέγγιση της παρούσας διδακτορικής διατριβής	Εκμετάλλευση σημασιολογικής πληροφορίας, ανεξαρτητοποίηση αναπαράστασης προβλήματος από επίλυση, κλιμάκωση, εκμετάλλευση εξελίξεων έρευνας σχεδιασμού, διαλειτουργικότητα	Προς το παρόν λείπει η δυνατότητα έκφρασης μη λειτουργικών απαιτήσεων για τις σύνθετες διαδικτυακές υπηρεσίες

Πίνακας 2. Σύνοψη αυτοματοποιημένων μεθόδων σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών

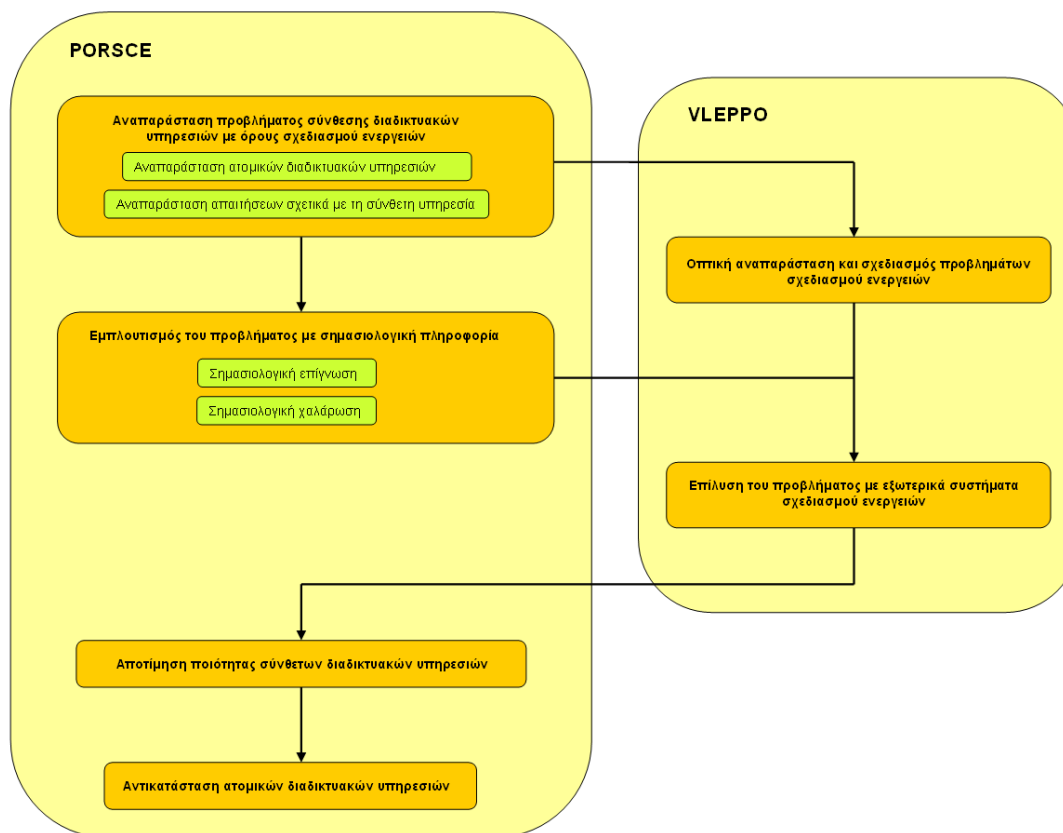
3.5. Τοποθέτηση διατριβής

Η αυτοματοποιημένη προσέγγιση για τη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών περιλαμβάνει μετασχηματισμό του προβλήματος σύνθεσης σε πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών και χρήση συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών για την επίλυσή του, και αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Αυτή η προσέγγιση εκτιμήθηκε ότι παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες, τα κυριότερα από τα οποία είναι τα εξής:

- η φυσικότητα με την οποία οι σημασιολογικές διαδικτυακές υπηρεσίες αναπαρίστανται με όρους σχεδιασμού ενεργειών, και κατά συνέπεια η ευθεία αντιστοιχία στοιχείων της OWL-S σε στοιχεία της PDDL, οι οποίες αποτελούν τα κυρίαρχα πρότυπα στον χώρο τους.
- η ευελιξία που προσφέρει αυτή προσέγγιση όσον αφορά στην εκμετάλλευση των εξελίξεων της έρευνας στον τομέα του σχεδιασμού ενεργειών, επιτυγχάνοντας την ανεξαρτητοποίηση της αναπαράστασης του προβλήματος από την διαδικασία επίλυσής του.
- η δυνατότητα που παρέχεται για πλήρη εκμετάλλευση της σημασιολογικής πληροφορίας, εφόσον οι σημασιολογικές περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών συνοδεύονται από τις αντίστοιχες οντολογίες.

Ο κυριότερος στόχος αυτής της προσέγγισης είναι η διευκόλυνση της διαδικασίας σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, έτσι ώστε να απευθύνεται ακόμα και σε μη ειδικούς χρήστες, δηλαδή χρήστες οι οποίοι δεν έχουν ειδικές γνώσεις στο πεδίο της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών. Ταυτόχρονα, επιδιώκεται μεγάλος βαθμός αυτοματοποίησης, έτσι ώστε η διαδικασία να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο διάφανη, και η εμπειρία που βιώνουν οι τελικοί χρήστες από την δημιουργία και εκτέλεση μιας σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας να μην διαφέρει σημαντικά από την εμπειρία χρήσης μιας ατομικής υπηρεσίας. Επιπλέον, όλα τα παραπάνω πρέπει να συνδυαστούν με αξιοποίηση σημασιολογικής πληροφορίας. Για την επίτευξη των στόχων αυτών απαιτούνται οι επιμέρους διαδικασίες που παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 20. Το πρόβλημα της σύνθεσης και η λύση μέσω των βημάτων αυτών μελετήθηκε κατ' αρχάς σε θεωρητικό επίπεδο και επιπλέον υποστηρίχθηκε προγραμματιστικά από συστήματα λογισμικού, ώστε να ελεγχθούν στοιχεία όπως η εφαρμοσιμότητα, η απόδοση των τεχνικών και η κλιμάκωση για μεγάλο αριθμό διαδικτυακών υπηρεσιών. Στην Εικόνα 20 φαίνονται επίσης τα συστήματα

λογισμικού που υποστηρίζουν την καθεμία από αυτές τις δραστηριότητες, καθώς και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους.



Εικόνα 20. Δραστηριότητες κατά την αυτοματοποιημένη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία που περιγράφεται στην Εικόνα 20 αποτελεί η αναπαράσταση του προβλήματος σύνθεσης με όρους σχεδιασμού ενεργειών. Σε αυτό το πλαίσιο, αναγνωρίστηκαν τα κύρια στοιχεία ενός προβλήματος σχεδιασμού ενεργειών που είναι απαραίτητα για την περιγραφή ενός προβλήματος σύνθεσης, τα οποία παραμένουν σταθερά ανεξάρτητα από αλγορίθμους, όπως τελεστές, αρχική και τελική κατάσταση. Κατά την υλοποίηση, χρησιμοποιήθηκαν οι σημασιολογικές περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών σε OWL-S, ώστε να εξαχθούν τα κύρια στοιχεία, και με βάση αυτά δημιουργήθηκε σε γλώσσα PDDL η περιγραφή του πεδίου ορισμού σχεδιασμού ενεργειών. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν προβλήματα σχεδιασμού ενεργειών που βασίζονται στο εκάστοτε πεδίο ορισμού, με βάση τις επιθυμίες υποθετικών χρηστών για σύνθετες διαδικτυακές υπηρεσίες.

Με την παραπάνω διαδικασία παρατηρήθηκε ότι σε αρκετές περιπτώσεις οι συντακτικές διαφορές εννοιών εμπόδιζαν τα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών να αντιστοιχίσουν έννοιες μεταξύ τους, ακόμη κι αν αυτές ήταν σημασιολογικά ισοδύναμες ή πολύ σχετικές. Εξάλλου, κάτι τέτοιο αποτελούσε μια σημαντική αδυναμία άλλων τεχνικών και συστημάτων σύνθεσης

διαδικτυακών υπηρεσιών που περιγράφηκαν νωρίτερα στο παρόν Κεφάλαιο. Για την αντιμετώπιση αυτού του θέματος είναι απαραίτητος ο εμπλουτισμός του προβλήματος με σημασιολογική πληροφορία, επομένως κρίθηκε σκόπιμο η έρευνα να επεκταθεί σε τρόπους ανίχνευσης ισοδυναμίας ή ομοιότητας μεταξύ εννοιών με χρήση οντολογιών [Maedche and Zacharias, 2002; Hatzi et al, 2009a]. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν ώστε να βρίσκονται εναλλακτικές σύνθετες υπηρεσίες, αλλά και προσεγγιστικές σύνθετες υπηρεσίες σε περιπτώσεις που δεν ήταν δυνατή η εύρεση μιας ακριβούς σύνθετης υπηρεσίας.

Η δυνατότητα ανίχνευσης ισοδύναμων και σχετικών εννοιών, και κατά συνέπεια εύρεσης εναλλακτικών και προσεγγιστικών σύνθετων υπηρεσιών επιβάλλει την ανάγκη αποτίμησης της ποιότητας αυτών των υπηρεσιών σε σχέση με την ιδανική επιθυμητή υπηρεσία που ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις του χρήστη με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν μέτρα ποιότητας που συνδυάζουν τις τιμές ομοιότητας μεταξύ των εννοιών για να εκτιμήσουν την τιμή της ποιότητας μιας διαδικτυακής υπηρεσίας, σε σχέση πάντα με την ιδανική. Η υλοποίηση δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει πώς θα γίνει ο συμβιβασμός μεταξύ των σύνθετων υπηρεσιών που επιστρέφονται από τη διαδικασία σύνθεσης και της ποιότητάς τους. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αποτίμηση της ποιότητας εναλλακτικών σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών είναι ένας τομέας ο οποίος δεν έχει εξερευνηθεί από άλλες προσεγγίσεις, ενώ η αντίστοιχη δυνατότητα δεν προσφέρεται από ανάλογα συστήματα αυτοματοποιημένης σύνθεσης.

Επιπλέον, η δυνατότητα ανίχνευσης ισοδύναμων ή προσεγγιστικά όμοιων ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών επιτρέπει τον χειρισμό περιπτώσεων μη διαθεσιμότητας κάποιας ατομικής υπηρεσίας που λαμβάνει μέρος στη σύνθετη χωρίς να απαιτείται ο επανασχεδιασμός όλης της σύνθετης υπηρεσίας, όπως απαιτείται σε άλλες προσεγγίσεις. Στην αντίστοιχη υλοποίηση, μετά την εύρεση και την παρουσίαση των σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών, ο χρήστης είναι σε θέση να επιλέξει αντικατάσταση οποιασδήποτε ατομικής διαδικτυακής υπηρεσίας συμμετέχει σε αυτές, ενώ το σύστημα αναλαμβάνει να εντοπίσει ισοδύναμες ή σχετικές υπηρεσίες ως υποψήφιες για αντικαταστάτες.

Η ολοκλήρωση της υλοποίησης και η ενοποίησή της είχε ως αποτέλεσμα το σύστημα PORSCE, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Το PORSCE αποτελείται από επιμέρους υποσυστήματα που αναλαμβάνουν τις δραστηριότητες που περιγράφηκαν παραπάνω.

Παράλληλα με το σύστημα PORSCE αναπτύχθηκε το σύστημα VLEPPO το οποίο συμπλήρωσε και ολοκλήρωσε το PORSCE σε θέματα που σχετίζονται με την ανεξαρτητοποίηση του προβλήματος σχεδιασμού ενεργειών από τον αλγόριθμο επίλυσης, που προσδίδει ευελιξία στην

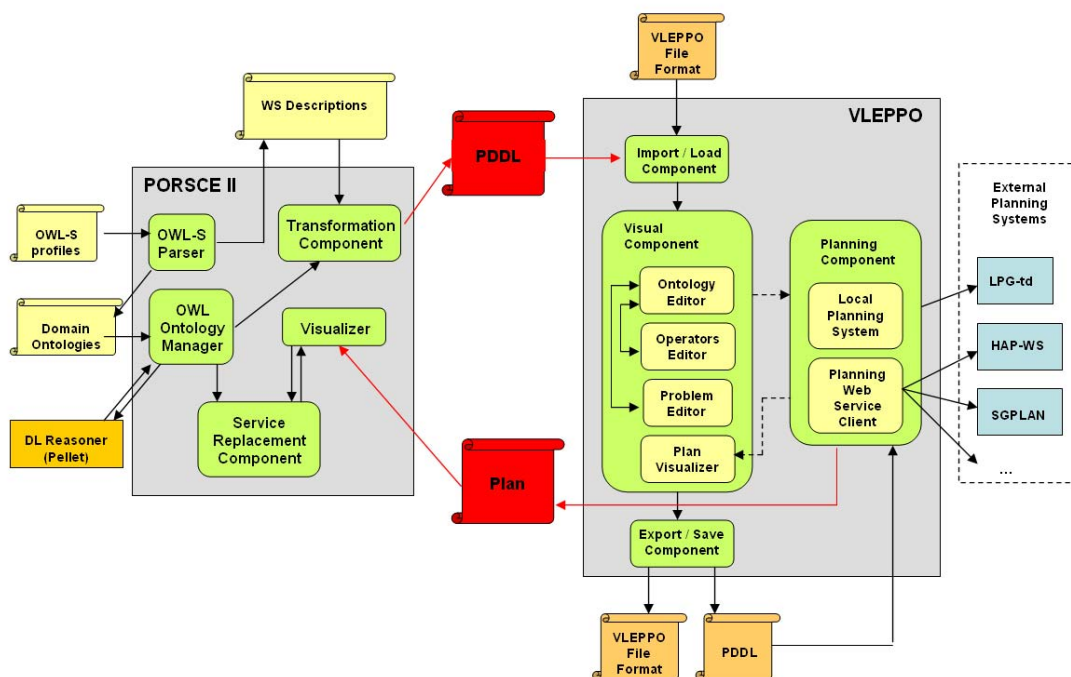
επιλογή αυτού του αλγόριθμου, καθώς και τη πρακτική και αποδοτική μοντελοποίηση προβλημάτων με γραφικό τρόπο. Όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 5 όπου περιγράφεται το VLEPPO και τα αντίστοιχα θέματα έρευνας που οδήγησαν σε αυτό, η επιλογή να αναπτυχθεί σαν ξεχωριστό σύστημα και όχι σαν υποσύστημα του PORSCHE, όπως όλες οι προαναφερθείσες λειτουργίες, δικαιολογείται από το γεγονός ότι τα θέματα που ανέκυψαν δεν αποτελούν εξειδικευμένα προβλήματα της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών μέσω σχεδιασμού ενεργειών αλλά αφορούν γενικότερα το πεδίο του σχεδιασμού ενεργειών.

Το VLEPPO καλύπτει το θέμα της ευελιξίας στην επιλογή αλγορίθμου χρησιμοποιώντας την τεχνολογία των διαδικτυακών υπηρεσιών. Τα πεδία ορισμού και προβλήματα σχεδιασμού ενεργειών που είναι εκφρασμένα στο πρότυπο της PDDL δεν επιλύονται τοπικά στο σύστημα με κάποιον ή κάποιους ενσωματωμένους αλγόριθμους αλλά εσωκλείονται σε μηνύματα SOAP και αποστέλλονται μέσω πρωτοκόλλων μεταφοράς όπως το HTTP σε εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών τα οποία είτε έχουν υλοποιηθεί εξ αρχής σαν διαδικτυακές υπηρεσίες είτε έχουν εκθέσει την λειτουργικότητά τους μέσω αυτής της τεχνολογίας. Οι λύσεις επιστρέφονται επίσης μέσω μηνυμάτων SOAP και αναπαρίστανται οπτικά για καλύτερη κατανόηση και περαιτέρω επεξεργασία. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η εξάρτηση της επίλυσης του προβλήματος από έναν συγκεκριμένο αλγόριθμο σχεδιασμού ενεργειών, κάτι που συμβαίνει στα συστήματα που περιγράφηκαν κατά την ανασκόπηση των αυτοματοποιημένων τεχνικών νωρίτερα σε αυτό το Κεφάλαιο.

Το άλλο σημαντικό ζήτημα το οποίο καλύπτεται με το σύστημα VLEPPO, ενώ δεν αναπτύσσεται καθόλου από άλλα συστήματα αυτοματοποιημένης σύνθεσης, είναι αυτό της εύκολης σχεδίασης και συντήρησης πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Δυστυχώς, η διαδικασία μοντελοποίησης ενός πεδίου ορισμού και στη συνέχεια κωδικοποίησής του σε PDDL είναι μια διαδικασία κουραστική και επιρρεπής σε λάθη όταν δεν γίνεται απευθείας με συγγραφή του κώδικα χωρίς οπτική βοήθεια. Επιπλέον, τα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών έχουν δημιουργηθεί για να λύνουν τα προβλήματα σχεδιασμού ενεργειών και όχι για να διενεργούν συντακτικούς ελέγχους, επομένως, είναι πιθανόν, συντακτικά λάθη στα πεδία ορισμού να μην είναι δυνατό να ανιχνευθούν εύκολα. Το VLEPPO διαθέτει ένα εύχρηστο γραφικό περιβάλλον το οποίο όχι μόνο βοηθάει στην κατανόηση και στον σχεδιασμό των πεδίων ορισμού και των προβλημάτων, αλλά διενεργεί συντακτικούς ελέγχους και ελέγχους εγκυρότητας σε πραγματικό χρόνο κατά τον σχεδιασμό, ώστε τα πιθανά λάθη να διορθωθούν έγκαιρα και να μην διαδοθούν στο πεδίο ορισμού. Μετά τον οπτικό σχεδιασμό ενός πεδίου ορισμού και αντίστοιχων προβλημάτων, διατίθεται η δυνατότητα εξαγωγής τους σε κώδικα PDDL σύμφωνα με τις προτιμήσεις του χρήστη, ενώ επίσης υπάρχει η λειτουργία της εισαγωγής κώδικα PDDL, έτσι

ώστε να διευκολυνθεί η κατανόηση, συντήρηση και τροποποίηση υπαρχόντων πεδίων ορισμού και προβλημάτων.

Στην Εικόνα 21 φαίνεται η συνολική αρχιτεκτονική των συστημάτων PORSCE και VLEPPO, ενώ διακρίνονται και τα υποσυστήματα, οι είσοδοι και οι έξοδοι του καθενός. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι αλληλεπιδράσεις και τα δεδομένα που ανταλλάσσουν τα συστήματα μεταξύ τους.



Εικόνα 21. Αρχιτεκτονική και αλληλεπιδράσεις των συστημάτων PORSCE και VLEPPO

Η έρευνα που εκπονήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής επεκτάθηκε σε όλες τις πτυχές του προβλήματος της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, από την αναπαράσταση του προβλήματος και την εκμετάλλευση της σημασιολογικής πληροφορίας μέχρι την επίλυση και την τροποποίηση της λύσης, ενώ τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά όσον αφορά την επιλογή της συγκεκριμένης προσέγγισης. Επιπλέον καλύφθηκαν αδυναμίες και ελλείψεις άλλων προσεγγίσεων και αντιμετωπίστηκαν επιτυχώς θέματα όπως η αποτίμηση της ποιότητας των σύνθετων υπηρεσιών. Η υλοποίηση με συνεργασία των δύο συστημάτων, PORSCE και VLEPPO επιτυγχάνει να καλύψει την αυτοματοποιημένη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών τόσο από άποψη λειτουργικότητας, υποστηρίζοντας μετασχηματισμό του προβλήματος, σημασιολογική επίγνωση και εμπλουτισμό, επίλυση και τροποποίηση της σύνθετης υπηρεσίας, όσο και από άποψη ευχρηστίας προσφέροντας λειτουργικότητα που αφορά οπτικοποίηση και εύκολη αλληλεπίδραση με τον χρήστη.

Κεφάλαιο 4

Σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών μέσω σχεδιασμού ενεργειών με το σύστημα PORSCE

4.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η προσέγγιση της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών μέσω σχεδιασμού ενεργειών, η οποία μελετήθηκε και αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Η λύση σε ένα πρόβλημα σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, δηλαδή μια περιγραφή της ζητούμενης σύνθετης υπηρεσίας, δημιουργείται με την αναπαράσταση του προβλήματος σαν πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών και την επίλυση με χρήση υπαρχόντων μεθόδων σχεδιασμού ενεργειών. Όλη η διαδικασία χαρακτηρίζεται από σημασιολογική επίγνωση (semantic awareness), η οποία πραγματοποιείται με χρήση οντολογιών. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να συμπεριληφθεί σημασιολογική πληροφορία κατά τη σύνθεση και να εφαρμοστεί σημασιολογική χαλάρωση (semantic relaxation) σε περίπτωση που κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο. Μετά τη δημιουργία των σύνθετων υπηρεσιών, προτάθηκαν μέθοδοι αποτίμησης της ποιότητάς τους, καθώς και η οπτική τους αναπαράσταση. Επίσης, διερευνήθηκε η δυνατότητα τροποποίησής τους μέσω αντικατάστασης των ατομικών υπηρεσιών από τις οποίες αποτελούνται οι σύνθετες.

Ταυτόχρονα, σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η απαραίτητη για επαλήθευση και πειραματισμό υλοποίηση της προαναφερθείσας ερευνητικής εργασίας, μέσω της οποίας εκτιμάται ότι επιτυγχάνεται καλύτερη κατανόηση της θεωρητικής ερευνητικής εργασίας. Η υλοποίηση κατέληξε στο σύστημα PORSCE [Hatzi et al, 2008], καθώς και τη νεότερη έκδοσή του, το PORSCE II [Hatzi et al, 2009a; 2009b]. Οι κύριοι στόχοι του συστήματος είναι οι ακόλουθοι:

- η πλήρης αυτοματοποίηση της διαδικασίας σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, έτσι ώστε να απαιτείται η ελάχιστη δυνατή ανθρώπινη παρέμβαση

- η αξιοποίηση της σημασιολογικής πληροφορίας που περιέχουν οι περιγραφές των ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών ώστε η σύνθεση εκτελείται με ορθό τρόπο αλλά και να δίνεται η δυνατότητα προσεγγιστικών λύσεων
- η διαλειτουργικότητα με τα σύγχρονα πρότυπα, όπως επίσης και με άλλα υπάρχοντα συστήματα
- η αποδοτικότητα της διαδικασίας σύνθεσης μέσω σχεδιασμού και η δυνατότητα κλιμάκωσης για μεγάλο αριθμό υπηρεσιών
- η αυξημένη ευχρηστία και η ευκολία αλληλεπίδρασης με τον χρήστη μέσω γραφικών διεπαφών

Το σύστημα PORSCE αποτελείται από ένα υποσύστημα σχεδιασμού ενεργειών, ένα υποσύστημα σχετικότητας εννοιών (concept relevance) για την ανίχνευση ομοιοτήτων μεταξύ εννοιών που ανήκουν σε OWL οντολογίες, και ένα γραφικό περιβάλλον, τα οποία συνεργάζονται για να εκπληρώσουν το στόχο της σημασιολογικής σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών. Το υποσύστημα σχεδιασμού ενεργειών είναι υπεύθυνο για το μετασχηματισμό του προβλήματος της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών σε πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών, και την επίλυσή του μέσω συνεργασίας με ανεξάρτητα εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών. Τα κλασικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών που χρησιμοποιεί το PORSCE επιχειρούν να δώσουν λύση στο πρόβλημα αντιστοιχίζοντας τις παραμέτρους εισόδου στις παραμέτρους εξόδου των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών, οι οποίες είναι εκφρασμένες σαν προϋποθέσεις και αποτελέσματα τελεστών σχεδιασμού ενεργειών αντίστοιχα. Οι λύσεις που λαμβάνονται αποτελούν περιγραφές της ζητούμενης σύνθετης υπηρεσίας, οι οποίες στη συνέχεια αξιολογούνται, με σκοπό να χρησιμοποιηθεί αυτή η αξιολόγηση για την αποτίμηση της ποιότητάς τους. Το υποσύστημα ομοιότητας εννοιών εκμεταλλεύεται τη γνώση που αποκτά από την επεξεργασία οντολογιών, ώστε να διοχετεύσει στο υπόλοιπο σύστημα χρήσιμες σημασιολογικές πληροφορίες, καθώς και επεκτείνει σημασιολογικά τις εισόδους και τις εξόδους των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών, συμπεριλαμβάνοντας έννοιες σχετικές με τις αρχικές, βασισμένο σε διάφορες μετρικές ομοιότητας (σχετικότητας) μεταξύ εννοιών. Το γραφικό περιβάλλον, εκτός από τα προφανή οφέλη που προσφέρει, δηλαδή την οπτικοποίηση των σύνθετων υπηρεσιών μαζί με τις τιμές που προκύπτουν από την αποτίμηση της ποιότητάς τους, εξυπηρετεί επίσης σκοπούς παρέμβασης στις σύνθετες υπηρεσίες, δίνοντας τη δυνατότητα αντικατάστασης οποιασδήποτε ατομικής υπηρεσίας περιέχεται σε αυτές. Οι ατομικές υπηρεσίες μπορούν να αντικατασταθούν με εναλλακτικές, οι οποίες μπορεί να είναι είτε ισοδύναμες είτε

σημασιολογικά σχετικές με την αρχική ατομική υπηρεσία, με την σχετικότητα αυτή να καθορίζεται από τον Διαχειριστή Οντολογιών OWL.

4.2. Σχετικές Εργασίες

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν συνοπτικά άλλα συστήματα που κάνουν χρήση τεχνικών σχεδιασμού ενεργειών για την επίλυση του προβλήματος της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, καθώς και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το PORSCE σε σχέση με αυτά. Εκτενέστερες περιγραφές των ερευνητικών προσεγγίσεων που κατέληξαν στην υλοποίηση αυτών των συστημάτων, καθώς και άλλων αυτοματοποιημένων προσεγγίσεων, μπορούν να βρεθούν στο Κεφάλαιο 3.

Ένα από τα πρώτα συστήματα που επιχείρησαν αυτόματη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών ήταν το SHOP-2 [Sirin et al, 2004]. Το SHOP-2 χρησιμοποιεί περιγραφές διαδικτυακών υπηρεσιών σε DAML-S, τον προκάτοχο της OWL-S, και εφαρμόζει σχεδιασμό ενεργειών βασισμένο σε ιεραρχικά δίκτυα διεργασιών (HTN planning) για να λάβει τη λύση του προβλήματος. Το μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής έγκειται στην διαδικασία σχεδιασμού, η οποία λόγω της ιεραρχικής της φύσης, απαιτεί κάποια εκ των προτέρων γνώση του πεδίου. Συγκεκριμένα, απαιτείται να υπάρχουν κανόνες αποσύνθεσης (ή μέθοδοι, όπως ονομάζονται στο σύστημα), κωδικοποιημένοι εκ των προτέρων με τη βοήθεια μιας οντολογίας διεργασιών DAML-S.

Το σύστημα OWLS-Xplan [Klusch et al, 2005] χρησιμοποιεί τις σημασιολογικές περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών σε OWL-S για να παράξει τα πεδία ορισμού και τα προβλήματα σχεδιασμού ενεργειών, και στη συνέχεια καλεί το υποσύστημα σχεδιασμού ενεργειών Xplan για να δημιουργήσει τις σύνθετες υπηρεσίες. Το σύστημα συμμορφώνεται έως ένα βαθμό με το πρότυπο της PDDL, καθώς οι δημιουργοί του έχουν αναπτύξει μια διάλεκτο της PDDL βασισμένη στην XML, την οποία ονόμασαν PDDXML. Ωστόσο, η σημασιολογική πληροφορία που παρέχεται από τις οντολογίες δεν χρησιμοποιείται σε πλήρη βαθμό, επομένως η διαδικασία σχεδιασμού μπορεί να προχωρήσει μόνο σε περιπτώσεις ακριβούς συντακτικής ταύτισης εισόδων και εξόδων των διαδικτυακών υπηρεσιών, πράγμα που θέτει περιορισμούς στην εύρεση της κατάλληλης σύνθετης υπηρεσίας.

Το σύστημα SWORD [Ponnekanti and Fox, 2002] αναφέρεται επίσης σε αυτή την ενότητα, αν και ασχολείται μόνο με ένα συγκεκριμένο υποσύνολο του προβλήματος της αυτοματοποιημένης σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών. Το SWORD ακολουθεί μια προσέγγιση που θυμίζει αυτή

του PORSCE για τη μοντελοποίηση του προβλήματος σύνθεσης, ωστόσο οι ατομικές υπηρεσίες αναπαρίστανται σαν κανόνες που ορίζουν ότι δεδομένων κάποιων εισόδων, η κάθε ατομική υπηρεσία είναι σε θέση να παράγει συγκεκριμένες εξόδους. Ένα έμπειρο σύστημα βασισμένο σε κανόνες χρησιμοποιείται αντί ενός κλασικού συστήματος σχεδιασμού ενεργειών για να δημιουργήσει το πλάνο σύνθεσης που περιγράφει τη σύνθετη υπηρεσία.

Άλλες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν σχεδιασμό ενεργειών βασισμένο στη γνώση (knowledge-based planning) παρουσιάζονται στην εργασία [Martinez and Lesperance, 2004], στην οποία οι διαδικτυακές υπηρεσίες συντίθενται με τη βοήθεια του συστήματος σχεδιασμού PKS. Ωστόσο, αυτή η προσπάθεια δεν αντιμετωπίζει το σημαντικό θέμα της μετάφρασης των σημασιολογικών περιγραφών των διαδικτυακών υπηρεσιών σε όρους σχεδιασμού ενεργειών. Στην εργασία [Pistore et al, 2005] οι περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών πρέπει να εκφραστούν σε κάποια πρότυπη γλώσσα μοντελοποίησης και εκτέλεσης, όπως η BPEL4WS, ενώ στη συνέχεια γίνεται χρήση της τεχνικής σχεδιασμού ενεργειών με έλεγχο μοντέλων. Το κυριότερο μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι ότι απαιτείται εκ των προτέρων γνώση, σχετική με το πεδίο ορισμού.

Ένα κύριο χαρακτηριστικό ενός συστήματος που φιλοδοξεί να λύσει με επιτυχία το πρόβλημα της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών μέσω σχεδιασμού ενεργειών πρέπει να είναι η ικανότητά του να λάβει υπόψη τις σημασιολογικές πληροφορίες που περιέχονται τόσο στις σημασιολογικές περιγραφές των υπηρεσιών όσο και στις αντίστοιχες οντολογίες, κάτι που δεν πραγματοποιείται σε κανένα από τα συστήματα που προαναφέρθηκαν. Επιπλέον, ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό που δεν καλύπτουν τα συστήματα αυτά είναι η δυνατότητα παρέμβασης στην παραγόμενη σύνθετη διαδικτυακή υπηρεσία. Μια τέτοια δυνατότητα είναι σημαντική στην περίπτωση που κάποια από τις ατομικές διαδικτυακές υπηρεσίες που απαρτίζουν τη σύνθετη αποδεικνύεται μη διαθέσιμη ή μη επιθυμητή. Τέλος, δεν έχει προταθεί κάποιος τρόπος αποτίμησης της ποιότητας των σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών για λόγους σύγκρισης μεταξύ τους, δεδομένου ότι μια διαδικασία σχεδιασμού ενεργειών μπορεί να δημιουργήσει περισσότερα του ενός πλάνα.

Το σύστημα PORSCE υιοθετεί μια προσέγγιση η οποία καλύπτει τα κενά που προαναφέρθηκαν. Τα πλεονεκτήματά του σε σχέση με τα συστήματα που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα περιλαμβάνουν το γεγονός ότι η πληροφορία που περιέχεται στις σημασιολογικές περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών σε OWL-S και στις αντίστοιχες οντολογίες είναι αρκετή ώστε το σύστημα να είναι σε θέση να σχηματίζει το πρόβλημα της σύνθεσης και να λάβει την αντίστοιχη λύση, χωρίς να χρειάζεται επιπλέον γνώση του πεδίου. Επιπλέον, το PORSCE εκμεταλλεύεται

πλήρως τις σημασιολογικές πληροφορίες, με αποτέλεσμα να έχει τη δυνατότητα να δώσει προσεγγιστικές λύσεις στην περίπτωση που δεν μπορεί να βρεθεί ακριβής λύση. Τέλος, το PORSCE είναι σε θέση να χειριστεί περιπτώσεις μη διαθεσιμότητας ατομικών υπηρεσιών μέσω αντικατάστασης, χωρίς να απαιτείται επανασχεδιασμός.

4.3. Αρχιτεκτονική και Στόχος

Ο στόχος της προσέγγισης της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών μέσω σχεδιασμού ενεργειών είναι η αυτοματοποίηση της διαδικασίας και η ανάγκη για όσο το δυνατόν μικρότερη ανθρώπινη παρέμβαση σε αυτή. Ταυτόχρονα όμως, πρέπει να συνυπολογίζονται οι απαιτήσεις του χρήστη, όσον αφορά την ακρίβεια και την ποιότητα της σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας που αναζητείται. Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες του πεδίου ορισμού των διαδικτυακών υπηρεσιών σε σχέση με τα κλασικά πεδία σχεδιασμού ενεργειών, όπως η ύπαρξη ενός ασυνήθιστα μεγάλου αριθμού τελεστών. Όλα τα παραπάνω αποτέλεσαν σημεία ιδιαίτερης προσοχής κατά τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη του συστήματος PORSCE, του οποίου οι κύριες λειτουργίες είναι:

- Ανάγνωση των OWL-S περιγραφών των διαδικτυακών υπηρεσιών και μετατροπή των ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών σε τελεστές σχεδιασμού ενεργειών στην γλώσσα PDDL.
- Αλληλεπίδραση με το χρήστη ώστε να δηλωθούν οι προτιμήσεις του όσον αφορά τη σύνθετη υπηρεσία και τα επιθυμητά μέτρα ομοιότητας μεταξύ εννοιών.
- Επέκταση του πεδίου ορισμού και του προβλήματος σχεδιασμού ενεργειών με σημασιολογικά σχετικές έννοιες χρησιμοποιώντας έναν DL Reasoner.
- Επίλυση του προβλήματος της σύνθεσης με κλήσεις σε εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών.
- Αποτίμηση της ποιότητας των παραγόμενων σύνθετων υπηρεσιών, βασισμένη στα επιλεγμένα μέτρα ομοιότητας.
- Οπτικοποίηση της λύσης ώστε να υποβοηθηθεί η αναγνώριση υπο-διεργασιών στις σύνθετες υπηρεσίες, όπως απλές ακολουθίες υπηρεσιών, και δομές ελέγχου όπως διαχωρισμοί (splits) ή διαχωρισμοί και επανενώσεις (split / join).

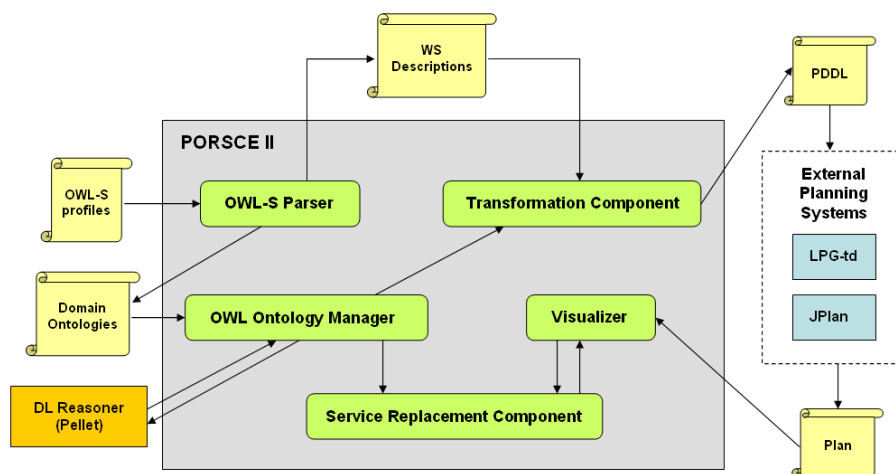
- Αναζήτηση στο χώρο των διαθέσιμων υπηρεσιών για τον εντοπισμό εναλλακτικών υπηρεσιών και αντικατάσταση οποιασδήποτε ατομικής υπηρεσίας που περιλαμβάνεται στην περιγραφή της σύνθετης κατά βούληση.

Το PORSCE [Hatzi et al, 2008] αποτέλεσε την αρχική απόπειρα προσέγγισης του προβλήματος σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών μέσω σχεδιασμού ενεργειών με χρήση σημασιολογικής χαλάρωσης, ενώ το PORSCE II [Hatzi et al 2009a; 2009b] είναι η νέα βελτιωμένη έκδοσή του. Το PORSCE II προσφέρει εκτός από τη λειτουργικότητα του πρωτοτύπου πρόσθετες δυνατότητες, όπως η υιοθέτηση ενός διαφορετικού τρόπου μοντελοποίησης της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, που α) εξαλείφει τις περιπτώσεις πλεοναζόντων τελεστών στο πλάνο, που παρατηρήθηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις κατά τη λειτουργία του PORSCE και β) μειώνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος, εφόσον ελαττώνει δραστικά τον αριθμό των τελεστών, και επομένως επιταχύνει σημαντικά τη διαδικασία σχεδιασμού ενεργειών. Προσφέρει έτσι σημαντικά πλεονεκτήματα σε ότι αφορά την αποδοτικότητα και το χρόνο που απαιτείται για το σχεδιασμό ενεργειών σε σχέση με το PORSCE.

Επιπλέον, στο PORSCE II έχουν υιοθετηθεί πιο περίπλοκα μέτρα ομοιότητας αυξάνοντας την ευελιξία στον ορισμό της έννοιας της ομοιότητας μεταξύ εννοιών στο εκάστοτε πρόβλημα. Με βάση τα επιλεγμένα μέτρα ομοιότητας, η ποιότητα της κάθε σύνθετης υπηρεσίας αποτιμάται και παρουσιάζεται στο χρήστη, ενώ προσφέρεται και η δυνατότητα αντικατάστασης ατομικών υπηρεσιών που συμμετέχουν στη σύνθετη υπηρεσία με εναλλακτικές, ισοδύναμες ή σημασιολογικά σχετικές, ώστε να αντιμετωπισθούν οι περιπτώσεις μη διαθεσιμότητας κάποιας ατομικής υπηρεσίας. Στο σύστημα έχει επίσης συμπεριληφθεί γραφικό περιβάλλον, τόσο για επικοινωνία και αλληλεπίδραση με το χρήστη όσο και για οπτικοποίηση της σύνθετης υπηρεσίας. Για να τονιστεί η ανεξαρτησία του PORSCE II από συστήματα και αλγορίθμους σχεδιασμού ενεργειών, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση οποιουδήποτε συστήματος συμμορφώνεται με το πρότυπο της PDDL [Ghallab et al, 1998], ένα δεύτερο εξωτερικό σύστημα σχεδιασμού ενεργειών έχει συμπεριληφθεί επιπρόσθετα στο αρχικό. Οι περιγραφές που ακολουθούν στο υπόλοιπο του κεφαλαίου αφορούν την κοινή λειτουργικότητα των δύο συστημάτων, εκτός αν αναφέρεται ρητώς ότι υπάρχει κάποια διαφορά μεταξύ τους.

Το PORSCE II αποτελείται από πέντε υποσυστήματα: το Υποσύστημα Ανάγνωσης OWL-S Περιγραφών (OWL-S Parser), το Υποσύστημα Μετασχηματισμού (Transformation Component), τον Διαχειριστή Οντολογιών OWL (OWL Ontology Manager - OOM), το Γραφικό Περιβάλλον (Visualizer) και το Υποσύστημα Αντικατάστασης Υπηρεσιών (Service Replacement

Component). Η αρχιτεκτονική του συστήματος και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υποσυστημάτων φαίνονται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 22. Η αρχιτεκτονική του PORSCE II.

- Το Υποσύστημα Ανάγνωσης OWL-S Περιγραφών αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του συστήματος PORSCE. Κατ' αρχάς, διαβάζει ένα σύνολο OWL-S αρχείων που περιγράφουν διαδικτυακές υπηρεσίες και εισάγει τις περιγραφές τους στο σύστημα, σε μια ενδιάμεση μορφή, ώστε αργότερα να αποτελέσουν είσοδο για το Υποσύστημα Μετασχηματισμού. Επιπλέον, καθορίζει όλες τις οντολογίες στις οποίες ανήκουν οι έννοιες που εμφανίζονται σαν είσοδοι και έξοδοι των διαδικτυακών υπηρεσιών και τις προωθεί στον Διαχειριστή Οντολογιών OWL (ΔΟΟ).
- Ο ΔΟΟ επεξεργάζεται τις οντολογίες και, χρησιμοποιώντας τον Pellet DL Reasoner [Sirin et al, 2007], εφαρμόζει αλγόριθμους για να ανακαλύψει ομοιότητες (σχετικότητες) μεταξύ των εννοιών, με βάση κάποιο επιλεγμένο μέτρο σχετικότητας. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να εντοπιστούν ισοδυναμίες ή ομοιότητες μεταξύ εννοιών που αντιπροσωπεύουν εισόδους και εξόδους διαδικτυακών υπηρεσιών. Κατόπιν, κατά τη διαδικασία σύνθεσης, επιτυγχάνεται αντιστοίχιση όχι μόνο μεταξύ ακριβώς όμοιων συντακτικά εννοιών, αλλά και μεταξύ ισοδύναμων ή σημασιολογικά όμοιων εννοιών.
- Οι λειτουργίες του Υποσυστήματος Μετασχηματισμού περιλαμβάνουν την αναπαράσταση του προβλήματος της σύνθεσης των διαδικτυακών υπηρεσιών σαν πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών, λειτουργία που αναλύεται σε αναπαράσταση των ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών και αναπαράσταση των απαιτήσεων σχετικά με τη σύνθετη υπηρεσία. Επίσης, το ίδιο υποσύστημα αναλαμβάνει την αλληλεπίδραση με το

χρήστη για να τεθούν τα επιθυμητά μέτρα και κατώφλια όσον αφορά την σχετικότητα εννοιών, και την επέκταση του προβλήματος σχεδιασμού ενεργειών με σημασιολογικές πληροφορίες από τον ΔΟΟ. Επιπρόσθετα, το υποσύστημα αυτό συνεργάζεται με τα εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών ώστε να αποκτήσει λύσεις στο εκάστοτε πρόβλημα, οι οποίες αποτελούν περιγραφές της επιθυμητής σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας. Στην παρούσα έκδοση του συστήματος έχουν συμπεριληφθεί δύο εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών, τα οποία μπορούν να λειτουργούν είτε ταυτόχρονα είτε εναλλακτικά, σύμφωνα με τις επιλογές του χρήστη. Τέλος, το Υποσύστημα Μετασχηματισμού χρησιμοποιεί πληροφορίες που του διέθεσε ο ΔΟΟ ώστε να αποτιμήσει την ποιότητα των σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών που επιστρέφονται σαν λύσεις από τα εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού.

- Ο σκοπός του Γραφικού Περιβάλλοντος είναι να παρουσιάσει στο χρήστη μια οπτική περιγραφή των σύνθετων υπηρεσιών μαζί με τα υπολογισμένα μέτρα για την ποιότητα της καθεμιάς. Στην περιγραφή αυτή φαίνονται οι ατομικές υπηρεσίες από τις οποίες αποτελείται η σύνθετη, οι εισοδοί και οι έξοδοί τους, καθώς και οι αλληλοεξαρτήσεις μεταξύ τους. Επίσης, παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία και μέτρα ποιότητας της κάθε σύνθετης υπηρεσίας, όπως έχουν υπολογιστεί από το Υποσύστημα Μετασχηματισμού.
- Το Υποσύστημα Αντικατάστασης Υπηρεσιών εντοπίζει εναλλακτικές υπηρεσίες και επιτρέπει στο χρήστη να αντικαταστήσει κάποια ατομική υπηρεσία με μια εναλλακτική της, ώστε να αντιμετωπιστούν περιπτώσεις μη διαθεσιμότητας της ατομικής υπηρεσίας.

Τα κύρια υποσυστήματα του PORSCE II παρουσιάζονται αναλυτικότερα στις ακόλουθες ενότητες.

4.4. Σημασιολογική ανάλυση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι σημασιολογικές πληροφορίες αξιοποιούνται πλήρως στο PORSCE, καθώς λαμβάνονται υπόψη τόσο κατά τη διαδικασία αναπαράστασης του προβλήματος, όσο και κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενεργειών αλλά και διαχείρισης των σύνθετων υπηρεσιών.

Αρχικά, οι σημασιολογικές πληροφορίες, όπως οι έννοιες που αντιπροσωπεύουν τις εισόδους και τις εξόδους των διαδικτυακών υπηρεσιών, πρέπει να εξαχθούν από τις σημασιολογικές περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών και να διοχετευθούν στο σύστημα. Επιπλέον, κατά την ανάγνωση των περιγραφών πρέπει να ανιχνεύονται οι οντολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται για

την οργάνωση των εννοιών, ώστε να επεξεργαστούν αργότερα για τον εντοπισμό συσχετίσεων. Τις δύο αυτές λειτουργίες τις αναλαμβάνει το Υποσύστημα Ανάγνωσης OWL-S περιγραφών.

Για να είναι δυνατή η αξιοποίηση των σημασιολογικών πληροφοριών, απαιτείται μία αρχική φάση σημασιολογικής ανάλυσης, η οποία υλοποιείται στον Διαχειριστή Οντολογιών OWL (OWL Ontology Manager). Ο ΔΟΟ επεξεργάζεται τις οντολογίες που περιέχουν τις έννοιες που αναφέρονται στις παραμέτρους εισόδου και εξόδου των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών. Η επεξεργασία των οντολογιών περιλαμβάνει δύο υπο-διαδικασίες [Hatzi et al, 2009a]:

- Την εφαρμογή τεχνικών συλλογιστικής (reasoning) στις οντολογίες ώστε να υπολογιστούν οι συσχετίσεις μεταξύ εννοιών, η οποία έχει υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας τον Pellet DL reasoner.
- Την εφαρμογή κάποιου μέτρου σχετικότητας με ένα ορισμένο κατώφλι για την απόσταση μεταξύ εννοιών, ώστε να καθοριστούν οι σχετικές έννοιες που περιέχονται στην οντολογία αναφορικά με μια δοσμένη έννοια (query concept).

Στο υπόλοιπο της ενότητας αυτής καθεμία από τις διαδικασίες αυτές αναλύεται διεξοδικά, ενώ παρουσιάζονται παραδείγματα ώστε να γίνουν πιο κατανοητές.

4.4.1. Συλλογιστική πάνω στις οντολογίες του πεδίου ορισμού (Domain Ontology Reasoning)

Ο ΔΟΟ είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό και τη σημασιολογική επεξεργασία των οντολογιών στις οποίες ανήκουν οι έννοιες που εμφανίζονται στις OWL-S περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών. Για αυτόν το σκοπό χρησιμοποιεί το εργαλείο συλλογιστικής (DL Reasoner) Pellet ώστε να υπολογίζει όλες τις σχέσεις μεταξύ εννοιών των οντολογιών που μπορούν να συμπερασθούν. Στο PORSCE II ακολουθείται ένας βελτιωμένος αρθρωτός τρόπος προσέγγισης σε σχέση με την απλή εισαγωγή των οντολογιών, που αποσκοπεί στη βελτιωμένη απόδοση και στην ελάττωση του χρόνου που καταλαμβάνει το βήμα της προεπεξεργασίας.

Η τμηματοποίηση των οντολογιών στοχεύει στον αποδοτικό χειρισμό μεγάλων και εξαιρετικά κατανεμημένων οντολογιών, όσον αφορά την απόδοση της διαδικασίας συλλογιστικής [Schlicht and Stuckenschmidt, 2008; Wang et al, 2008; Pan et al, 2006]. Η κεντρική ιδέα που ακολουθείται είναι ο διαχωρισμός της οντολογίας σε τμήματα και η δυναμική εισαγωγή μόνο των τμημάτων ενδιαφέροντος σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή. Στην προσέγγιση που ακολουθείται στο

PORSCE II, όλες οι σημασιολογικές συσχετίσεις μεταξύ των δομών των οντολογιών μπορούν να προϋπολογισθούν με τη χρήση του εργαλείου συλλογιστικής Pellet. Το σύστημα δεν είναι σε θέση να καθορίσει από πριν την τμηματοποίηση των οντολογιών, για αυτόν το λόγο ακολουθείται μια περισσότερο αφηρημένη προσέγγιση στο επίπεδο της οντολογίας, η οποία υπαγορεύει την ομαδοποίηση και την επεξεργασία χωριστά στο σύνολό τους των οντολογιών που σχετίζονται μέσω αξιωμάτων εισαγωγής (import axioms).

Κατά τα πειράματα παρατηρήθηκε ότι η απόδοση του εργαλείου συλλογιστικής Pellet σε ένα σύνολο N οντολογιών μπορεί να βελτιωθεί αν αυτές οι οντολογίες επεξεργάζονται χωριστά σε ομάδες. Αυτό είναι εφικτό μόνο στην περίπτωση που οι ομάδες αυτές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, δηλαδή δεν υπάρχουν σχέσεις εισαγωγής (import relationships) μεταξύ των οντολογιών διαφορετικών ομάδων, επομένως η διαδικασία συλλογιστικής μπορεί να εφαρμοστεί στη κάθε ομάδα ανεξάρτητα. Μια τέτοια προσέγγιση είναι αξιοσημείωτα πιο αποδοτική σε περιπτώσεις που υπάρχουν πολλοί συμπληρωματικοί ορισμοί εννοιών. Ακολουθώντας την παραπάνω προσέγγιση, οι συμπληρωματικές σχέσεις ελέγχονται μόνο στις συσχετιζόμενες οντολογίες, δηλαδή στις οντολογίες που ανήκουν στην ίδια ομάδα, και όχι με οποιαδήποτε έννοια της βάσης γνώσης που μπορεί να ανήκει σε μη συσχετιζόμενες οντολογίες, με αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης. Αν υποτεθεί ότι το αρχικό σύνολο των N οντολογιών μπορεί να χωριστεί σε M ομάδες οντολογιών (G_M), όπου $M < N$, και ότι το $DL_P(S)$ αντιπροσωπεύει το χρόνο συλλογιστικής του εργαλείου Pellet στο σύνολο ή ομάδα οντολογιών S , τότε, στην γενική περίπτωση, έχει παρατηρηθεί ότι

$$\sum_{i=1}^M DL_P(G_i) < DL_P(N) .$$

Στο υπόλοιπο της ενότητας εξηγείται ο αλγόριθμος με τον οποίον καθορίζονται οι ομάδες οντολογιών και παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα [Hatzi et al, 2008; 2009a].

4.4.1.1 Δημιουργία ομάδων οντολογιών

Η δημιουργία των ομάδων οντολογιών βασίζεται στον καθορισμό του Ελάχιστου Συνόλου Οντολογιών του Πεδίου Ορισμού (*Minimum Domain Ontology Set* - MDOS). Η έννοια του MDOS βασίζεται στο γεγονός ότι η φόρτωση μιας οντολογίας σε ένα εργαλείο συλλογιστικής προκαλεί τη φόρτωση όλων των οντολογιών που εισάγονται από την αρχική μέσω αξιωμάτων εισαγωγής (import axioms). Αυτή η διαδικασία είναι μεταβατική, δηλαδή αν η οντολογία A εισάγει την οντολογία B και η οντολογία B εισάγει την οντολογία C , τότε φορτώνοντας την οντολογία A , τόσο η B όσο και η C θα πρέπει επίσης να φορτωθούν.

Οι οντολογίες του συνόλου MDOS ονομάζονται *οντολογίες βάσης* (*base ontologies*) και έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Καμία από τις οντολογίες βάσης δεν εισάγεται (άμεσα ή έμμεσα) από κάποια άλλη οντολογία.
- Δύο οντολογίες βάσης μπορούν να εισάγουν (άμεσα ή έμμεσα) την ίδια οντολογία.

Διαισθητικά, για ένα αρχικό σύνολο οντολογιών, το σύνολο MDOS περιλαμβάνει μόνο τις οντολογίες εκείνες των οποίων η φόρτωση θα προκαλούσε τη φόρτωση ολόκληρου του αρχικού συνόλου οντολογιών με αρθρωτό τρόπο.

Έστω ότι το D είναι ένα σύνολο οντολογιών. Ο Αλγόριθμος 1 υπολογίζει το σύνολο MDOS του αρχικού συνόλου D βασιζόμενος στο μεταβατικό κλείσιμο των εισαγόμενων οντολογιών (import transitive closure) T_d κάθε οντολογίας $d \in D$. Σαν μεταβατικό κλείσιμο (transitive closure) T_d ορίζεται το σύνολο όλων των οντολογιών που θα φορτωθούν κατά τη φόρτωση της οντολογίας d στο εργαλείο συλλογιστικής. Το T_d μπορεί να υπολογιστεί εύκολα χρησιμοποιώντας υπάρχουσες Διεπαφές Προγραμματισμού Εφαρμογών (Application Programming Interfaces – APIs) για οντολογίες, όπως το OWL API [OWL API] ή το OWL-S API [OWL-S API].

Algorithm 1 Computes the Minimum Domain Ontology Set (MDOS)

Input The set D of the domain ontologies

Output The MDOS

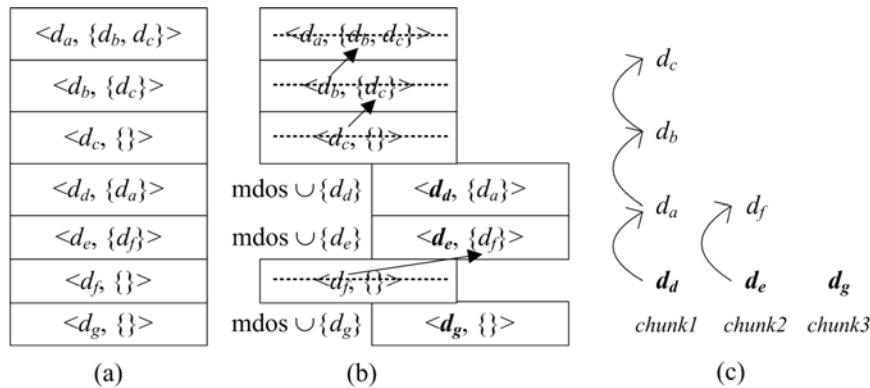
```

1: Set  $mdos \leftarrow \emptyset$ 
2: Set<Ontology  $d$ , ImportClosure  $T_d$ >  $index \leftarrow \emptyset$ 
3: for each  $d \in D$  do //step A
4:    $T_d \leftarrow getImportClosure(d)$ 
5:    $index \leftarrow index \cup \{<d, T_d>\}$ 
6: for each  $d \in D$  do //step B
7:   if  $\nexists <d', T_{d'}> \in index \mid d \in T_{d'}$  then
8:      $mdos \leftarrow mdos \cup \{d\}$ 
9: return  $mdos$ 

```

Ο Αλγόριθμος 1 ξεκινάει δημιουργώντας το *σύνολο ευρετηρίου* (*index set*), το οποίο περιέχει ζευγάρια του τύπου $<d, T_d>$ για κάθε οντολογία d (γραμμές 3 και 5). Στη συνέχεια, κάθε οντολογία d προστίθεται στο σύνολο $mdos$, αν δεν υπάρχει καμία εγγραφή $<d', T_{d'}>$ στο σύνολο ευρετηρίου, τέτοια ώστε η οντολογία d να ανήκει στο κλείσιμο (import closure) $T_{d'}$ (γραμμές 6 έως 8). Τελικά, το σύνολο $mdos$ περιέχει τις *οντολογίες βάσης* (*base ontologies*) οι οποίες και επιστρέφονται από τον αλγόριθμο.

Για την καλύτερη κατανόηση όσων περιγράφηκαν παραπάνω θα παρουσιαστεί ένα σύντομο παράδειγμα. Έστω ότι ο συμβολισμός $O_a \rightsquigarrow O_b$ δείχνει ότι η οντολογία O_a εισάγει την οντολογία O_b , και έστω το σύνολο των οντολογιών $D = \{d_a, d_b, d_c, d_d, d_e, d_f, d_g\}$ με τα ακόλουθα αξιώματα εισαγωγής: $d_a \rightsquigarrow d_b, d_b \rightsquigarrow d_c, d_d \rightsquigarrow d_a$ και $d_e \rightsquigarrow d_f$. Η Εικόνα 23 παρουσιάζει τα δύο βήματα του αλγορίθμου για τον υπολογισμό του MDOS. Αρχικά δημιουργείται το σύνολο ευρετηρίου, το οποίο περιέχει τα ζευγάρια $\langle d, T_d \rangle$ για κάθε $d \in D$ (Εικόνα 23(a)). Σε αυτό το παράδειγμα, οι οντολογίες d_a, d_b, d_c, d_f υπάρχουν τόσο σαν πρώτα στοιχεία εγγραφών στο σύνολο ευρετηρίου όσο και στο μεταβατικό κλείσιμο T_d' κάποιας άλλης οντολογίας (που σημειώνεται με βέλη), πιο συγκεκριμένα στα κλεισίματα των οντολογιών d_d, d_a, d_b και d_e , αντίστοιχα, και επομένως, δεν προστίθενται στο σύνολο *mdos* εφόσον δεν ικανοποιούν τον περιορισμό στην γραμμή 7. Οι οντολογίες που ικανοποιούν όλα τα κριτήρια είναι οι d_d, d_e και d_g και επομένως τελικά $mdos = \{d_d, d_e, d_g\}$ (Εικόνα 23(b)). Ας σημειωθεί ότι η φόρτωση καθεμιάς από τις οντολογίες βάσης θα προκαλέσει επίσης τη φόρτωση όλων των εισαγόμενων οντολογιών, με αποτέλεσμα να σχηματισθούν οι τρεις ομάδες οντολογιών που φαίνονται στην Εικόνα 23(c). Κάθε ομάδα επεξεργάζεται από διαφορετικό στιγμιότυπο του εργαλείου συλλογιστικής Pellet, το οποίο είναι υπεύθυνο για την παραγωγή σημασιολογικών συσχετίσεων, επιτυγχάνοντας την αρθρωτή προσέγγιση στη διαχείριση των οντολογιών.



Εικόνα 23. (a), (b) Οι δύο φάσεις του αλγορίθμου MDOS για τον καθορισμό των οντολογιών βάσης. (c) Οι τρεις ομάδες που δημιουργούνται φορτώνοντας κάθε μία από τις τρεις οντολογίες βάσης στο εργαλείο Pellet.

4.4.2. Σχετικότητα μεταξύ εννοιών

Ο ΔΟΟ παρέχει πληροφορίες στο υπόλοιπα υποσυστήματα σχετικά με τις ισοδυναμίες και τη σημασιολογική σχετικότητα (semantic relevance) μεταξύ ενός συνόλου εννοιών που ανήκουν σε κάποιες οντολογίες και μιας έννοιας - ερωτήματος (query concept). Οι πληροφορίες αυτές επιτρέπουν τη δημιουργία πλάνων με μειωμένη ακρίβεια, τα οποία μπορεί να είναι χρήσιμα σε

περιπτώσεις που εναλλακτικά ακριβή πλάνα δεν είναι διαθέσιμα. Για αυτόν το σκοπό υλοποιούνται δύο διαφορετικά μέτρα σχετικότητας μεταξύ εννοιών ενός πεδίου ορισμού. Δύο έννοιες θεωρούνται σχετικές από τον ΔΟΟ αν και μόνο αν (α) έχουν μια συγκεκριμένη ιεραρχική σχέση και (β) η απόστασή τους, μετρημένη με βάση κάποιο μέτρο σχετικότητας, δεν ξεπερνάει κάποιο κατώφλι ορισμένο από τον χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, ο ΔΟΟ επιτρέπει τη ρύθμιση των παραμέτρων των κριτηρίων της σχετικότητας εννοιών, ώστε να αντικατοπτρίζουν τις προτιμήσεις του χρήστη, και να επιτυγχάνουν διαφορετικούς βαθμούς σημασιολογικής χαλάρωσης.

4.4.2.1 Ιεραρχικά Φίλτρα

Τα ιεραρχικά φίλτρα του ΔΟΟ χρησιμοποιούνται για να οριστούν οι ιεραρχικές σχέσεις που μπορούν να υπάρξουν μεταξύ μιας έννοιας - ερωτήματος και των σημασιολογικά σχετικών με αυτήν εννοιών. Ο ΔΟΟ υποστηρίζει τα ακόλουθα τέσσερα ιεραρχικά φίλτρα μεταξύ δύο εννοιών A και B :

- ***exact(A, B)***: Το φίλτρο αυτό επιτρέπει δύο έννοιες να θεωρηθούν όμοιες μόνο αν έχουν ακριβώς το ίδιο URI ή αν είναι ισοδύναμες, με την έννοια της ισοδυναμίας μεταξύ εννοιών OWL, δηλαδή ισχύει $exact(A, B) \leftrightarrow A = B \vee A \equiv B$.
- ***plugin(A, B)***: Το φίλτρο plugin επιτρέπει δύο έννοιες A και B να αντιστοιχισθούν μόνο αν η έννοια A περιέχεται στην έννοια B , δηλαδή ισχύει $plugin(A, B) \leftrightarrow A \sqsubseteq B \wedge \neg(B \sqsubseteq A)$. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος «περιέχεται» δεν εφαρμόζεται για τις ισοδύναμες έννοιες. Έτσι, αν $A \equiv B$, τότε οι σχέσεις $plugin(A, B)$ και $plugin(B, A)$ δεν ισχύουν, ακόμα και αν $A \sqsubseteq B \wedge B \sqsubseteq A$ εξαιτίας της σημασιολογίας της σχετικότητας εννοιών.
- ***subsume(A, B)***: Το φίλτρο subsume αντιστοιχίζει δύο έννοιες A και B μόνο αν η έννοια A περιέχει την έννοια B , δηλαδή ισχύει $subsume(A, B) \leftrightarrow B \sqsubseteq A \wedge \neg(A \sqsubseteq B)$. Η παρατήρηση για το φίλτρο plugin σχετικά με τις ισοδύναμες έννοιες ισχύει και σε αυτή τη περίπτωση.
- ***sibling(A, B)***: Το φίλτρο αυτό επιτρέπει σε δύο έννοιες A και B να αντιστοιχισθούν αν (α) δεν έχουν κάποια ιεραρχική σχέση, (β) δεν είναι μη επικαλυπτόμενες (disjoint), όπως ορίζεται η μη επικάλυψη για τις έννοιες OWL, και (γ) διαθέτουν μια κοινή υπερκλάση C ,

επομένως ισχύει $sibling(A, B) \leftrightarrow \neg plugin(A, B) \wedge \neg subsume(A, B) \wedge A \sqcap B \sqsubseteq \top \wedge (\exists C, C \neq A \wedge C \neq B \wedge A \sqsubseteq C \wedge B \sqsubseteq C)$.

Εκτός από τις παραπάνω περιπτώσεις, υπάρχει και η περίπτωση δύο έννοιες να είναι μη επικαλυπτόμενες, δηλαδή να μην έχουν καμία ιεραρχική σχέση μεταξύ τους, επομένως για αυτές δεν υφίσταται η έννοια της σημασιολογικής ομοιότητας, ενώ η σημασιολογική τους απόσταση είναι σε κάθε περίπτωση η μέγιστη δυνατή.

4.4.2.2. Σημασιολογική απόσταση μεταξύ εννοιών (Semantic Concept Distance)

Ο ΔΟΟ υλοποιεί δύο μέτρα απόστασης μεταξύ εννοιών χρησιμοποιώντας τις ιεραρχίες εννοιών που ανήκουν σε οντολογίες, οι οποίες δημιουργούνται από το εργαλείο Pellet; την απόσταση *edge-counting* και την απόσταση *upwards ctopic* [Maedche and Zacharias, 2002]. Η χρήση αυτών των μετρικών δικαιολογείται από τη διαισθητικότητα τους και την απλότητα υλοποίησης. Στις ακόλουθες ενότητες περιγράφονται η σημασιολογία του κάθε μέτρου καθώς και οι λεπτομέρειες υλοποίησής του.

Edge-Counting Distance

Στην περίπτωση του edge-counting distance (*ec*) η απόσταση μεταξύ δύο εννοιών υπολογίζεται μετρώντας τις ακμές που σχηματίζουν το συντομότερο μονοπάτι μεταξύ τους στην ιεραρχία της οντολογίας. Σε συμφωνία με την παραδοχή που έγινε στην ενότητα 4.4.2.1 σχετικά με τις ισοδύναμες έννοιες, μια ακμή υπάρχει μεταξύ των εννοιών A και B αν η A είναι άμεση υποκλάση του B , το οποίο σημειώνεται σαν $A \sqsubseteq_d B$, και οι A και B δεν είναι ισοδύναμες, δηλαδή ισχύει

$$A \sqsubseteq_d B \leftrightarrow A \sqsubseteq B \wedge \nexists C, A \sqsubseteq C.$$

Η υλοποίηση αυτού του μέτρου απόστασης μεταξύ δύο εννοιών, που δηλώνεται σαν $d_{ec}(A, B)$, επιστρέφει μια τιμή μεταξύ 0 και 1, με το 1 να δηλώνει πλήρη ανομοιότητα, και ξεχωρίζει τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- $exact(A, B) \rightarrow d_{ec}(A, B) = 0$. Αυτή είναι η απλή περίπτωση όπου έχουμε την ίδια ή ισοδύναμες έννοιες, επομένως, δεν υπάρχει καμία ακμή μεταξύ τους.

- $A \sqcap B \sqsubseteq \perp \rightarrow d_{ec}(A, B) = 1$. Σε αυτήν την περίπτωση οι δύο έννοιες είναι μη επικαλυπτόμενες, δηλαδή δεν έχουν καμία ιεραρχική σχέση από αυτές που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Επομένως, ακόμα και αν υπάρχει μονοπάτι μεταξύ τους στην ιεραρχία εννοιών, απέχουν την μέγιστη απόσταση (πλήρης ανομοιότητα).
- $plugin(A, B) \vee subsume(A, B) \rightarrow d_{ec}(A, B) = p/p_{max}$. Αν υπάρχει κάποια ιεραρχική σχέση μεταξύ των δύο εννοιών, η απόσταση ec ισούται με τον αριθμό των ακμών που αριθμεί το συντομότερο μονοπάτι (p), κανονικοποιημένο στο $[0..1]$ χρησιμοποιώντας τη μέγιστη απόσταση ec (p_{max}) που έχει βρεθεί στην οντολογία. Για τον γρήγορο υπολογισμό του p_{max} , μπορεί να προσεγγισθεί σαν $p_{max} = 2h - 1$, όπου h είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ μιας έννοιας που βρίσκεται σε κάποιο φύλλο και της έννοιας owl:Thing ($\top$).
- $sibling(A, B) \rightarrow d_{ec}(A, B) = \min[d_{ec}(A, T) + d_{ec}(B, T)]$. Σε αυτή την περίπτωση οι σχέσεις έχουν μια ιεραρχική σχέση sibling και η απόσταση ec ορίζεται σαν το ελάχιστο των αθροισμάτων των αποστάσεων ec κάθε έννοιας από τον πιο κοντινό κοινό πρόγονο T , εφόσον μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι από ένας κοινοί πρόγονοι. Ας σημειωθεί ότι η έννοια owl:Thing δεν θεωρείται ποτέ σαν κοινός πρόγονος δύο εννοιών, εφόσον $\forall A, B : A \sqsubseteq \top \wedge B \sqsubseteq \top$ και επομένως, δεν παρέχεται καμία ειδική δομική γνώση. Για παράδειγμα, στην περίπτωση μιας επίπεδης ιεραρχίας (flat hierarchy), δεν υπάρχουν σχέσεις sibling μεταξύ των εννοιών της.

Upwards Cotopic Distance

Η απόσταση upwards cotopic μεταξύ δύο εννοιών, που δηλώνεται σαν $d_{uc}(A, B)$, ορίζεται με την βοήθεια του μέτρου *upwards cotopic*, που δηλώνεται σαν $uc(A)$ και αντιπροσωπεύει το σύνολο των υπερκλάσεων την έννοιας A στην ιεραρχία, συμπεριλαμβανομένου και της ίδιας της A :

$$d_{uc}(A, B) = 1 - \frac{|uc(A) \cap uc(B)|}{|uc(A) \cup uc(B)|}.$$

Ο ορισμός της απόστασης upwards cotopic έχει τροποποιηθεί ώστε να συμπεριλαμβάνει τη σημασιολογία μιας ιεραρχίας οντολογίας σχετικής με τις ισοδύναμες έννοιες και με την έννοια ανώτατου επιπέδου owl:Thing. Πιο συγκεκριμένα:

- Η έννοια owl:Thing δεν λαμβάνεται υπόψη στο μέτρο uc , ακολουθώντας την ίδια παραδοχή με αυτήν που έγινε στην προηγούμενη ενότητα για την απόσταση ec , αγνοώντας ομοιότητες που βασίζονται σε σχέσεις sibling με την έννοια owl:Thing.
- Οι τελεστές ένωσης και τομής συνόλων του d_{uc} λαμβάνουν υπόψη την σημασιολογία της σχετικότητας εννοιών. Με αυτόν τον τρόπο η πολλαπλότητα των εννοιών μέσα σε ένα σύνολο αγνοείται και μόνο η ιδιότητα μιας έννοιας ως μέλος ενός συνόλου ελέγχεται. Για παράδειγμα, αν $A \equiv B$, τότε $\{A, B, C\} = \{A, C\} \vee \{A, B, C\} = \{B, C\}$, ανάλογα με την σειρά με την οποία θα ελεγχθούν οι έννοιες. Επιπλέον, αν $A \equiv B$ και $D = \{A\}$, τότε $A \in D \wedge B \in D$.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, η απόσταση upwards cotopic τελικά ορίζεται ως

$$d_{uc}(A, B) = 1 - \frac{|uc(A) \cap uc(B)| - 1}{|uc(A) \cup uc(B)| - 1},$$

το οποίο διαισθητικά αντιστοιχεί σε δύο περιπτώσεις:

1. $d_{uc}(A, B) = 1$, αν $uc(A) \cap uc(B) = \{\top\} \vee A \sqcap B \sqsubseteq \perp$
2. $d_{uc}(A, B) = v \in [0..1)$, αν $A \sqsubseteq B \vee B \sqsubseteq A \vee uc(A) \cap uc(B) \supset \{\top\}$

Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση, η απόσταση d_{uc} δύο εννοιών ισούται με 1 (πλήρης ανομοιότητα) αν η (σημασιολογική) τομή των uc συνόλων τους περιέχει μόνο την κλάση owl:Thing, ή αν είναι μη επικαλυπτόμενες έννοιες. Στην δεύτερη περίπτωση, αν οι δύο έννοιες έχουν μια άμεση ιεραρχική σχέση ($A \sqsubseteq B \vee B \sqsubseteq A$) ή μια σχέση sibling, δηλαδή η (σημασιολογική) τομή των uc συνόλων τους δεν περιέχει μόνο την κλάση owl:Thing, τότε η απόσταση d_{uc} έχει μια τιμή $v \in [0..1)$.

4.4.2.3. Τυπικοί ορισμοί της σχετικότητας εννοιών

Έστω ότι το O δηλώνει το σύνολο των διαθέσιμων εννοιών που ανήκουν σε διάφορες οντολογίες, το F δηλώνει το σύνολο των επιλεγμένων ιεραρχικών φίλτρων και το a είναι το κατώφλι της απόστασης μεταξύ εννοιών. Στην περίπτωση της απόστασης edge-counting, το a δηλώνει το μέγιστο αριθμό των ακμών που επιτρέπεται να υπάρχουν στο συντομότερο μονοπάτι μεταξύ δύο εννοιών, με $a \geq 0$ ($a = 0$ σημαίνει ότι δεν επιτρέπεται να υπάρχουν καθόλου ακμές,

επομένως επιτρέπονται μόνο ακριβείς αντιστοιχίσεις. Στην περίπτωση της απόστασης upwards cotopic, το κατώφλι a , όπου $a \in [0..1]$, περιορίζει άμεσα την απόσταση μεταξύ δύο εννοιών, καθορίζοντας τη μέγιστη απόσταση που είναι αποδεκτή για να αντιστοιχιστούν αυτές οι δύο έννοιες, δηλαδή πρέπει $d_{uc}(A, B) \leq a$. Για παράδειγμα ορίζοντας $a = 0$, επιτρέπονται μόνο ακριβείς αντιστοιχίσεις. Στο υπόλοιπο της ενότητας παρουσιάζονται διάφοροι ορισμοί της σχετικότητας που χρησιμοποιούνται στις επόμενες ενότητες.

Ορισμός 1. Μια έννοια $C \in O$ θεωρείται *σχετική (relevant)* με μία έννοια $D \in O$ όσον αφορά ένα σύνολο ιεραρχικών φίλτρων F και ένα κατώφλι απόστασης a , που δηλώνονται σαν $C \sim_a^F D$, αν ικανοποιούν (α) τουλάχιστον ένα ιεραρχικό φίλτρο του F και (β) το κατώφλι a για την σημασιολογική απόστασή τους.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση της απόστασης edge-counting, αν $C \sqsubseteq_d D$ και $F = \{\text{exact}\}$, τότε $C \sim_a^F D$, εφόσον το φίλτρο exact δεν ικανοποιείται, ενώ αν $F = \{\text{exact}, \text{plugin}\}$ και $a = 1$, τότε οι δύο έννοιες θεωρούνται σχετικές, εφόσον τόσο το φίλτρο plugin όσο και το κατώφλι απόστασης ικανοποιούνται.

Ορισμός 2. Για κάθε έννοια $C \in O$ το *σύνολο σχετικών εννοιών (concept relevance set)*, που δηλώνεται σαν R_C , ορίζεται σαν το σύνολο όλων των εννοιών που θεωρούνται, σύμφωνα με τα κριτήρια, σχετικές της έννοιας C , δηλαδή

$$R_C \equiv \{T \in O : T \sim_a^F C\}.$$

Για παράδειγμα, στην περίπτωση της απόστασης edge-counting, αν $C \sqsubseteq_d D$, $D \sqsubseteq_d E$, $F = \{\text{plugin}\}$ και $a = 1$, τότε $R_C \equiv \{C, D\}$, $R_D \equiv \{D, E\}$ και $R_E \equiv \emptyset$. Πρέπει να σημειωθεί ότι $R_E \neq \{E\}$, εφόσον χρησιμοποιείται το ιεραρχικό φίλτρο plugin.

Ορισμός 3. Για κάθε σύνολο εννοιών A το *επεκταμένο σύνολο (extended set)*, που δηλώνεται σαν EX_A , ορίζεται σαν την ένωση όλων των συνόλων σχετικών εννοιών των εννοιών που περιέχονται στο A , δηλαδή

$$EX_A \equiv \bigcup_{\forall C \in A} R_C.$$

Για παράδειγμα, στην περίπτωση της απόστασης edge-counting, αν $C \sqsubseteq_d D$, $D \sqsubseteq_d E$, $F = \{\text{exact}\}$ και $A = \{C, D\}$, τότε $EX_A \equiv \{C, D\}$. Αν $F = \{\text{plugin}\}$ και $a = 1$, τότε $EX_A \equiv \{D, E\}$ και αν $F = \{\text{exact}, \text{plugin}\}$, τότε $EX_A \equiv \{C, D, E\}$.

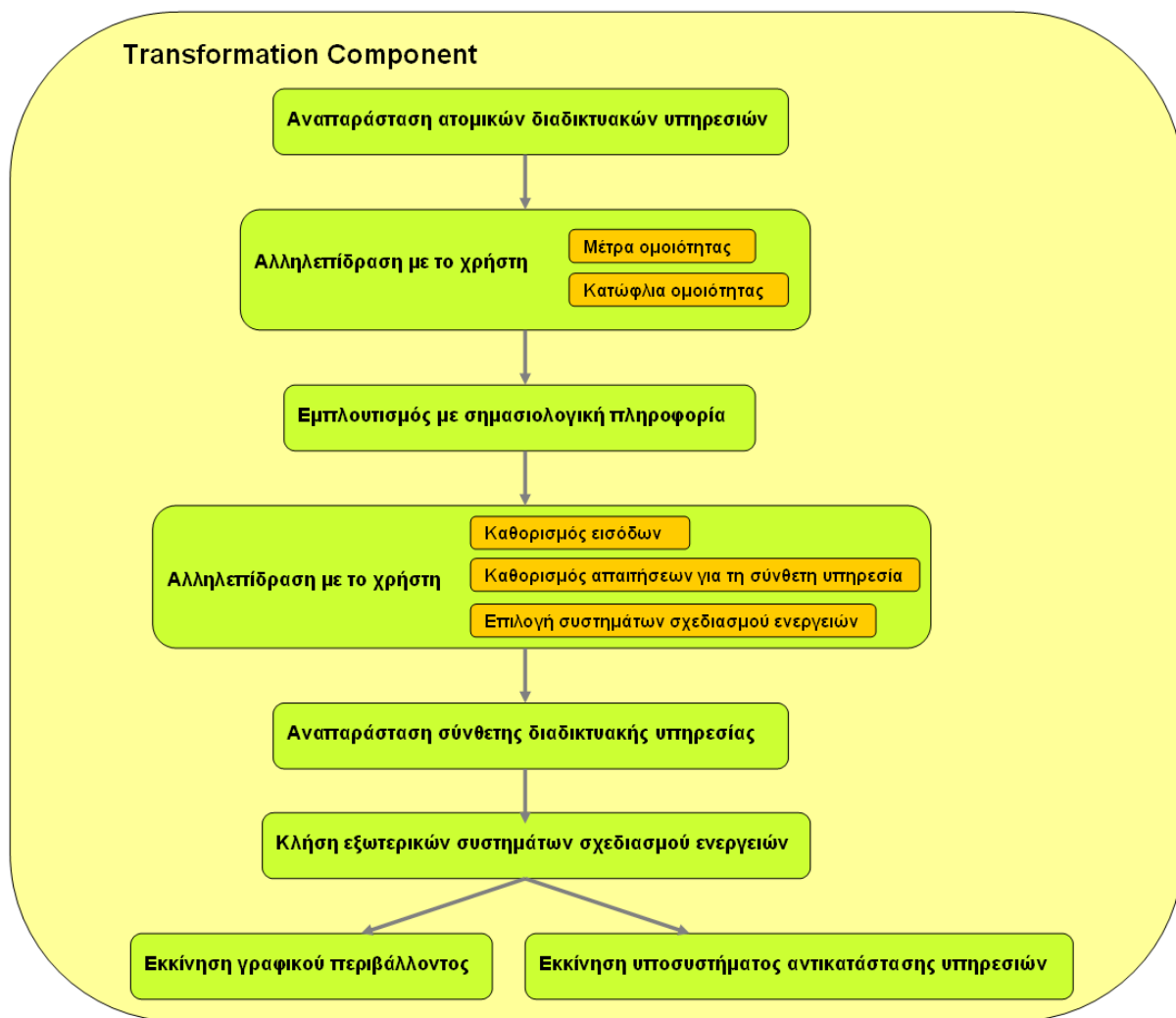
Ορισμός 4. Δύο σύνολα εννοιών A και B είναι *σχετικά (relevant)*, που δηλώνεται σαν $A \sim_a^F B$, αν όλες οι έννοιες του ενός συνόλου έχουν τουλάχιστον μια σχετική έννοια στο άλλο σύνολο και τα δύο σύνολα έχουν το ίδιο μέγεθος, δηλαδή

$$A \sim_a^F B \Rightarrow \forall C \in A, \exists D \in B : C \sim_a^F D \wedge \forall D \in B, \exists C \in A : D \sim_a^F C \wedge |A| = |B|.$$

Για παράδειγμα, στην περίπτωση της απόστασης edge-counting, αν $C \sqsubseteq_d D$, $D \sqsubseteq_d E$ και $F = \{\text{exact}\}$, τότε $\{C, D\} \sim_a^F \{D, E\}$, εφόσον η έννοια C δεν έχει σχετική έννοια στο δεύτερο σύνολο.

4.5. Μετασχηματισμός και αναπαράσταση του προβλήματος

Ένα από τα βασικότερα τμήματα του PORSCE II είναι το Υποσύστημα Μετασχηματισμού, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη μετάφραση των περιγραφών των διαδικτυακών υπηρεσιών που έχουν εξαχθεί από το Υποσύστημα Ανάγνωσης OWL-S σε τελεστές, και την επέκτασή τους με ισοδύναμες ή σημασιολογικά σχετικές έννοιες που εντοπίστηκαν από τον Διαχειριστή Οντολογιών OWL. Επιπλέον, αλληλεπιδρά με το χρήστη ώστε να σχηματίσει το πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών σύμφωνα με τις προτιμήσεις του και καλεί εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών για να λάβει λύσεις στο εκάστοτε πρόβλημα, οι οποίες αποτελούν περιγραφές της ζητούμενης σύνθετης υπηρεσίας. Στη συνέχεια, αξιολογεί τις παραγόμενες υπηρεσίες, λαμβάνοντας υπόψη τα επιλεγμένα μέτρα σχετικότητας, και τελικά εκκινεί το Γραφικό Περιβάλλον και το Υποσύστημα Αντικατάστασης Υπηρεσιών για την οπτικοποίηση και τροποποίηση των σύνθετων υπηρεσιών. Στην Εικόνα 24 φαίνεται μια σχηματική περιγραφή των βημάτων που ακολουθούνται κατά την εκτέλεση του Υποσυστήματος Μετασχηματισμού.



Εικόνα 24. Τα βήματα κατά την εκτέλεση του Υποσυστήματος Μετασχηματισμού.

4.5.1. Αναπαράσταση προβλήματος

Η περιγραφή ως πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών μιας σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας περιλαμβάνει εισόδους, που αντιστοιχούν σε δεδομένα τα οποία ο χρήστης είναι σε θέση να παρέχει στην σύνθετη υπηρεσία, και απαιτήσεις για εξόδους, που αντιστοιχούν σε αποτελέσματα της λειτουργικότητας της σύνθετης υπηρεσίας. Επίσης περιλαμβάνει έναν αριθμό από διαθέσιμες διαδικτυακές υπηρεσίες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να συνεργαστούν ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός στόχος. Το πρώτο βήμα για να επέλθει το επιθυμητό αποτέλεσμα του σχηματισμού μιας σύνθετης υπηρεσίας που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του χρήστη, είναι η αναπαράσταση των προαναφερθέντων στοιχείων ενός προβλήματος σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών με όρους σχεδιασμού ενεργειών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, ένα πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών αναπαρίσταται συνήθως με το φορμαλισμό STRIPS [Fikes and Nilsson, 1971] σαν μια τριάδα $\langle I, A, G \rangle$ όπου I η

αρχική κατάσταση, A το σύνολο των διαθέσιμων τελεστών (ενεργειών) και G το σύνολο των στόχων. Κάθε τελεστής A_i έχει τρεις λίστες γεγονότων: τις προϋποθέσεις του A_i , τα γεγονότα που προστίθενται στην κατάσταση του κόσμου και τα γεγονότα που αφαιρούνται από την κατάσταση του κόσμου, τα οποία δηλώνονται σαν $prec(A_i)$, $add(A_i)$ και $del(A_i)$ αντίστοιχα. Εκτενέστερη περιγραφή της αναπαράστασης ενός προβλήματος σε STRIPS μπορεί να βρεθεί στην ενότητα 2.2.1.

Μια ευθεία λύση [Carman et al, 2003] που υιοθετήθηκε από το PORSCCE και ακολουθήθηκε επίσης από το PORSCCE II είναι η ακόλουθη: Έστω ότι IC είναι το σύνολο όλων των εννοιών που ο χρήστης μπορεί να διαθέσει σαν εισόδους της σύνθετης υπηρεσίας και GC οι επιθυμητές έξοδοί της (στόχοι). Αν το O δηλώνει το σύνολο όλων των διαθέσιμων εννοιών στην οντολογία, τότε $IC \subseteq O$, $GC \subseteq O$ και $IC \cap GC \equiv \emptyset$. Με όρους σχεδιασμού ενεργειών, οι εισοδοί που ο χρήστης διαθέτει στην σύνθετη υπηρεσία σχηματίζουν την αρχική κατάσταση του προβλήματος, ενώ οι επιθυμητές έξοδοι της σύνθετης υπηρεσίας σχηματίζουν τους στόχους του προβλήματος: $I = IC$ και $G = GC$.

Οι διαθέσιμες περιγραφές διαδικτυακών υπηρεσιών σε OWL-S χρησιμοποιούνται για να καθοριστούν οι διαθέσιμοι τελεστές του πεδίου ορισμού σχεδιασμού ενεργειών. Πιο συγκεκριμένα, κάθε περιγραφή διαδικτυακής υπηρεσίας WSD_i μεταφράζεται σε έναν τελεστή του πεδίου ορισμού A_i , χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που αποκτήθηκαν από την επεξεργασία του αντίστοιχου στιγμιότυπου OWL-S (εφόσον κάθε περιγραφή διαδικτυακής υπηρεσίας είναι στην πραγματικότητα ένα στιγμιότυπο της κλάσης OWL-S Profile). Πιο συγκεκριμένα:

- Το όνομα του τελεστή είναι το πεδίο $rdf:ID$ του στιγμιότυπου του OWL-S profile:

$$name(A_i) = WSD_i.ID$$

- Οι προϋποθέσεις του τελεστή σχηματίζονται με βάση τους ορισμούς των εισόδων (εννοιών) της διαδικτυακής υπηρεσίας:

$$prec(A_i) \equiv \bigcup_{k=1}^n \{ WSD_i.hasInput_k \}$$

- Η λίστα προσθήκης του τελεστή αποτελείται από τους ορισμούς εξόδων (εννοιών) της σύνθετης υπηρεσίας:

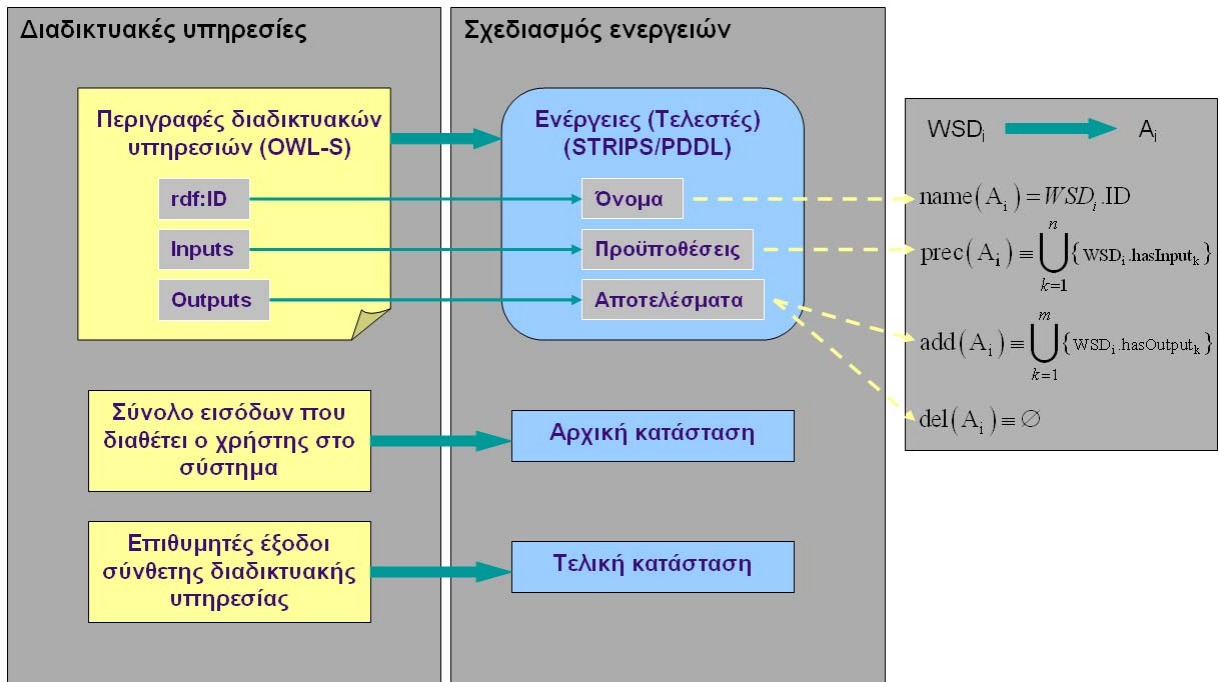
$$\text{add}(A_i) \equiv \bigcup_{k=1}^m \{ \text{WSD}_i.\text{hasOutput}_k \}$$

- Η λίστα διαγραφής παραμένει κενή, εφόσον στην παρούσα έρευνα λαμβάνονται υπόψη μόνο υπηρεσίες που δεν έχουν αρνητικά αποτελέσματα πάνω στο μοντέλο του κόσμου:

$$\text{del}(A_i) \equiv \emptyset$$

Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι διαθέσιμες διαδικτυακές υπηρεσίες που έχουν βρεθεί και μελετηθεί μέχρι στιγμής στην παρούσα έρευνα δεν έχουν αρνητικά αποτελέσματα, δηλαδή δεν αφαιρούν γνώση από την τρέχουσα κατάσταση του κόσμου.

Συνοπτικά, ο μετασχηματισμός του προβλήματος σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών σε πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών φαίνεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25. Μετασχηματισμός του προβλήματος σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών σε πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών

Η κλήση αλγορίθμων σχεδιασμού ενεργειών στα νεοσχηματισμένα προβλήματα θα δημιουργήσει πλάνα που θα συνιστούν περιγραφές της επιθυμητής σύνθετης υπηρεσίας. Τέτοιες περιγραφές μπορούν είτε να προωθηθούν κατ' ευθείαν σε ένα σύστημα εκτέλεσης και

παρακολούθησης (execution and monitoring), είτε να εκφραστούν και πάλι σε OWL-S και να προωθηθούν σε άλλα συστήματα που διαχειρίζονται σύνθετες υπηρεσίες.

4.5.2. Σημασιολογική Επίγνωση και Σημασιολογική Χαλάρωση

Η επιτυχής αναπαράσταση και επίλυση ενός προβλήματος σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών ως πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών μπορεί να ωφεληθεί σε μεγάλο βαθμό από την επίγνωση της σημασιολογίας των εννοιών που εμπλέκονται. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός εννοιών που διαφέρουν συντακτικά αλλά είναι ισοδύναμες ή σχετικές σημασιολογικά, με βάση συγκεκριμένα κριτήρια και κατώφλια απόστασης. Έτσι, τα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών είναι σε θέση να επιτύχουν αντιστοίχιση προϋποθέσεων και αποτελεσμάτων κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενεργειών, ακόμα και αν οι αντίστοιχοι όροι που χρησιμοποιούνται στις OWL-S περιγραφές διαφέρουν [Paolucci et al, 2002].

Επιπλέον, σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατόν να παραχθούν επιθυμητές λύσεις με ακριβή αντιστοίχιση των προϋποθέσεων και των αποτελεσμάτων, ο ΔΟΟ έχει τη δυνατότητα να θέσει σε εφαρμογή κάποιου είδους σημασιολογική χαλάρωση στο πρόβλημα, παρέχοντας τόσο ισοδύναμες όσο και σημασιολογικά σχετικές έννοιες, με βάση τα επιλεγμένα μέτρα ομοιότητας που περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Σε αυτή τη περίπτωση, η αντιστοίχιση μπορεί να γίνει ακόμα και μεταξύ ισοδύναμων ή σημασιολογικά σχετικών εννοιών, κάτι που προφανώς έχει σαν αποτέλεσμα μειωμένη ακρίβεια του παραγόμενου πλάνου, όμως επιτρέπει τον σχηματισμό προσεγγιστικών σύνθετων υπηρεσιών που εξυπηρετούν τους σκοπούς του χρήστη με τον καλύτερο δυνατό τρόπο για το δεδομένο πρόβλημα.

Όσον αφορά την υλοποίηση της σημασιολογικής επίγνωσης και της σημασιολογικής χαλάρωσης, υπάρχουν δύο πιθανές εναλλακτικές προσεγγίσεις:

- *Μεταβολή του συστήματος σχεδιασμού ενεργειών:* Η πρώτη προσέγγιση απαιτεί τη μεταβολή του συστήματος σχεδιασμού ενεργειών που χρησιμοποιείται για την απόκτηση λύσης ώστε να πραγματοποιεί αιτήσεις προς τον ΔΟΟ κάθε φορά που κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο. Για παράδειγμα, μια τέτοια περίπτωση είναι όταν πρέπει να αποφασιστεί η δυνατότητα εφαρμογής ενός τελεστή σε μια δεδομένη κατάσταση. Το σύστημα σχεδιασμού ενεργειών πρέπει να πραγματοποιήσει τις απαραίτητες αιτήσεις προς τον ΔΟΟ, ώστε να αποκτήσει όλες τις ισοδύναμες και σημασιολογικά σχετικές έννοιες, για τις έννοιες της τρέχουσας κατάστασης του κόσμου, ώστε να έχει όλη την απαραίτητη

σημασιολογική πληροφορία για το αν ισχύουν οι προϋποθέσεις του εν λόγω τελεστή στη δεδομένη κατάσταση.

- *Μεταβολή του πεδίου ορισμού και του προβλήματος:* Στη δεύτερη προσέγγιση οι σημασιολογικές επεκτάσεις λαμβάνουν χώρα στο πεδίο ορισμού και στο πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών. Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει ένα βήμα προεπεξεργασίας κατά το οποίο το πεδίο ορισμού και το πρόβλημα επαυξάνονται με όλες τις σημασιολογικές πληροφορίες που είναι απαραίτητες, όπως ισοδύναμες και σημασιολογικά σχετικές έννοιες, ενώ ο εκάστοτε αλγόριθμος σχεδιασμού ενεργειών που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια εφαρμόζεται απaráλλαχτος, χωρίς να απαιτείται καμία επιπλέον τροποποίηση.

Το PORSCE II υιοθετεί την δεύτερη προσέγγιση, δηλαδή την επαύξηση του προβλήματος σχεδιασμού ενεργειών με σημασιολογικές πληροφορίες, αντί για τη λύση της συνεχούς επικοινωνίας του συστήματος σχεδιασμού ενεργειών με τον ΔΟΟ για τους παρακάτω δύο σημαντικούς λόγους:

- ανεξαρτησία από το σύστημα σχεδιασμού ενεργειών, καθώς οποιοδήποτε σύστημα συμβατό με το πρότυπο της PDDL [Ghallab et al, 1998] μπορεί να χρησιμοποιηθεί (είτε είναι διαθέσιμο σαν ξεχωριστό σύστημα όπως ο LPG-td [Gerevini et al, 2004; 2005] είτε σαν διαδικτυακή υπηρεσία όπως ο HAP-WS [Tsoumakas et al, 2005; HAP-WS]), κάτι που ήταν ανάμεσα και στους αρχικούς σκοπούς του PORSCE.
- ελαχιστοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του συστήματος σχεδιασμού ενεργειών και του ΔΟΟ, οι οποίες επιφέρουν σημαντική καθυστέρηση στον συνολικό χρόνο σχεδιασμού ενεργειών.

Στη φάση της προεπεξεργασίας, το σύστημα χρησιμοποιεί τον ΔΟΟ ώστε να αποκτήσει όλες τις σχετικές έννοιες τόσο για τα γεγονότα της αρχικής κατάστασης όσο και τις εξόδους των διαθέσιμων τελεστών, σύμφωνα με τον Ορισμό 1 της ενότητας 4.4.2.3. Μια πρώιμη προσέγγιση του αρχικού προβλήματος $\langle I, A, G \rangle$ ώστε να παραχθεί το επαυξημένο πρόβλημα $\langle EIS, EAS, EGS \rangle$, η οποία ακολουθήθηκε στο PORSCE βασιζόταν στους παρακάτω κανόνες:

- Το αρχικό σύνολο των εννοιών στην αρχική κατάσταση I αντικαθίσταται από το επεκταμένο σύνολο (*extended set*), σύμφωνα με τον Ορισμό 3 της ενότητας 4.4.2.3.

$$EIS \equiv EX_I$$

- Κάθε τελεστής παράγει ένα σύνολο από σημασιολογικά σχετικούς τελεστές (τελεστές-κλώνους) οι οποίοι προκύπτουν θεωρώντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των αποτελεσμάτων του τελεστή με τις σχετικές τους έννοιες. Οι αρχικοί τελεστές μαζί με τους τελεστές-κλώνους αποτελούν το Extended Action Set (EAS) όπως περιγράφεται στον Αλγόριθμο 2.

Algorithm 2 Computes the Extended Action Set (EAS) – Version 1

Input The set A of the domain actions

Output The extended set EAS of the domain actions

```

1:  $EAS \leftarrow \emptyset$ 
2: for each action  $A_i \in A$  do
3:   for each  $F_i \in add(A_i)$  do
4:      $D \leftarrow$  the concept relevance set of  $F_i$  //According to Definition 2
5:     define an array of actions  $XA[ sizeof(D) ]$ 
6:      $k \leftarrow 0$ 
7:     for each  $d \in D$  do
8:        $XA[k] \leftarrow A_i$ 
9:        $add(XA[k]) \leftarrow add(XA[k]) \cup \{d\} - \{F_i\}$  // Replace  $F_i$  with  $d$ 
10:       $EAS \leftarrow EAS \cup \{XA[k]\}$ 
11:       $k \leftarrow k + 1$ 
12: return  $EAS$ 

```

- Οι στόχοι του προβλήματος παραμένουν απaráλλαχτοι.

$$EGS \equiv G$$

Εφόσον η σημασιολογική χαλάρωση λαμβάνει χώρα για τις έννοιες της αρχικής κατάστασης και για τις εξόδους κάθε τελεστή, η μη ακριβής αντιστοίχιση μεταξύ εννοιών είναι δυνατή χωρίς να είναι απαραίτητη καμία μεταβολή στους στόχους του προβλήματος, δηλαδή χωρίς να συμπεριληφθούν στους στόχους σημασιολογικά σχετικές έννοιες.

Η προσέγγιση που περιγράφεται παραπάνω οδήγησε στην ενσωμάτωση στο εκάστοτε πεδίο ορισμού και πρόβλημα όλων των απαιτούμενων σημασιολογικών επεκτάσεων, ωστόσο με την υλοποίηση και χρήση της ανέκυσαν δύο θέματα. Κατ' αρχάς, εφόσον τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα σχεδιασμού δεν είναι βέλτιστα, υπήρχαν περιπτώσεις όπου τα παραγόμενα πλάνα περιείχαν πλεονάζοντα αντίγραφα τελεστών, είτε στην αρχική τους μορφή είτε σε κάποια από τις σημασιολογικά σχετικές μορφές των κλώνων. Σε τέτοιες περιπτώσεις τα πλεονάζοντα αντίγραφα πρέπει να εξαλειφθούν και να παρουσιάζεται τελικά στο χρήστη μια ορθή περιγραφή της σύνθετης υπηρεσίας. Επιπλέον, ο συνυπολογισμός στην περιγραφή του προβλήματος όλων των

σημασιολογικά σχετικών τελεστών πολλές φορές κατέληγε σε έναν ιδιαίτερα μεγάλο αριθμό τελεστών, της τάξεως των εκατοντάδων ή χιλιάδων, κάτι που καθυστέρουσε σημαντικά τη διαδικασία σχεδιασμού ενεργειών και έκανε τη διαχείριση του πεδίου ορισμού προβληματική.

Η σημασιολογική χαλάρωση στο PORSCE II υλοποιήθηκε με μια τροποποιημένη προσέγγιση ώστε να παρακάμψει τα προβλήματα αυτά. Συγκεκριμένα, αντί να δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός κλώνων για τον κάθε τελεστή, στο PORSCE II παράγεται το Enhanced Action Set (EAS) τροποποιώντας τις ίδιες τις περιγραφές των τελεστών ώστε να συμπεριλάβουν την επιπλέον σημασιολογική πληροφορία, με αποτέλεσμα να διατηρείται το αρχικό μέγεθος του συνόλου τελεστών. Στην περίπτωση αυτή η λίστα αποτελεσμάτων του κάθε τελεστή αντικαθίσταται με το *επεκταμένο σύνολο* (*extended set*) σύμφωνα με τον Ορισμό 3 της ενότητας 4.4.2.3, όπως περιγράφεται στον Αλγόριθμο 3.

Algorithm 3 Computes the Extended Action Set (EAS) – Version 2

Input The set A of the domain actions

Output The extended set EAS of the domain actions

```

1:  $EAS \leftarrow \emptyset$ 
2: for each action  $A_i \in A$  do
3:    $D \leftarrow$  the extended set of  $\text{add}(A_i)$  //According to Definition 3
4:    $\text{add}(A_i) \leftarrow D$ 
5: return  $EAS$ 

```

Για την καλύτερη κατανόηση όσον περιγράφηκαν παραπάνω, ακολουθεί ένα παράδειγμα. Έστω ότι η αρχική κατάσταση I και οι στόχοι G του προβλήματος είναι οι ακόλουθοι:

$I = \{\text{Book}, \text{Author}, \text{Address}\}$

$G = \{\text{ShippingDate}\}$

και ότι υπάρχουν οι ακόλουθοι δύο διαθέσιμοι τελεστές:

BookToPublisherService: $\text{prec} = \{\text{Book}, \text{Author}\}$

$\text{effect} = \{\text{Publisher}\}$

ShippingCalculator: $\text{prec} = \{\text{PublishingHouse}, \text{Address}\}$

$\text{effect} = \{\text{DateOfArrival}\}$

Ο ΔΟΟ για ένα δεδομένο συνδυασμό ιεραρχικών φίλτρων F και κατωφλιού απόστασης α ανιχνεύει τις ακόλουθες σχετικές έννοιες:

$\text{ShippingDate} \sim_a^{\mathbb{F}} \text{DateOfArrival},$

$$\text{Publisher} \sim_a^{\mathbb{F}} \text{PublishingHouse},$$

$$\text{Book} \sim_a^{\mathbb{F}} \text{BookTitle}$$

Στη φάση της προεπεξεργασίας στο PORSCE II ο ορισμός του προβλήματος τροποποιείται ως εξής:

EIS = {Book, BookTitle, Author, Address}

EGS = {ShippingDate}

EAS:

BookToPublisherService: prec={Book, Author}

effect={Publisher, PublishingHouse}

ShippingCalculator: prec={ PublishingHouse, Address}

effect={DateOfArrival, ShippingDate}

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι στο PORSCE το σύνολο τελεστών θα διπλασιαζόταν σε μέγεθος, αφού το επεκταμένο σύνολο EAS θα ήταν το εξής:

BookToPublisherService: prec={Book, Author}

effect={Publisher}

BookToPublisherService_clone1: prec={Book, Author}

effect={PublishingHouse}

ShippingCalculator: prec={PublishingHouse, Address}

effect={DateOfArrival }

ShippingCalculator_clone1: prec={PublishingHouse, Address}

effect={ShippingDate}

Το νέο πρόβλημα <EIS, EAS, EGS> στη συνέχεια κωδικοποιείται σε PDDL και προωθείται στο σύστημα σχεδιασμού ενεργειών ώστε να ληφθεί η λύση του.

4.6. Επίλυση προβλήματος

Εφόσον το πρόβλημα σύνθεσης έχει αναπαρασταθεί σαν πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών, και έχει τυποποιηθεί σύμφωνα με το πρότυπο της PDDL, οποιοδήποτε σύστημα σχεδιασμού

ενεργειών που συμμορφώνεται με το ίδιο πρότυπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να αποκτηθούν λύσεις, δηλαδή περιγραφές των επιθυμητών σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών.

Στο PORSCE II συμπεριλήφθηκαν ενδεικτικά δύο εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών, τα JPlan [JPlan] και LPG-td [Gerevini et al, 2004; 2005]. Το JPlan είναι μια ανοικτού κώδικα υλοποίηση σε Java του αλγορίθμου σχεδιασμού ενεργειών Graphplan [Blum and Furst, 1997], ο οποίος ακολουθεί το φορμαλισμό STRIPS και χρησιμοποιεί τα πλεονεκτήματα αποδοτικών αλγορίθμων γράφων για να μειώσει τον χώρο αναζήτησης και να παρέχει καλύτερες λύσεις. Το LPG-td είναι η νέα, επεκταμένη και βελτιωμένη έκδοση του LPG, βασίζεται στην τοπική αναζήτηση και στους γράφους σχεδιασμού ενεργειών και μπορεί να παράγει πλάνα καλής ποιότητας με βάση ένα ή περισσότερα κριτήρια. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του LPG-td είναι ότι μπορεί κατά απαίτηση να παράγει περισσότερα από ένα πλάνα, επομένως, σε προβλήματα με υψηλή πολυπλοκότητα, όσο περισσότερο χρόνο αφιερεί να τρέχει, τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα έχει να βρει μια καλύτερη λύση, αν τέτοια υπάρχει.

Τα δύο παραπάνω συστήματα σχεδιασμού ενεργειών που τελικά συμπεριλήφθηκαν στο PORSCE II αποδείχθηκαν ικανοποιητικά γρήγορα ικανά να διαχειριστούν έναν αξι�σεβάστο αριθμό τελεστών, σε αντίθεση με άλλα συστήματα που δοκιμάστηκαν, όπως το PL-Plan [PL-Plan]. Μέχρι στιγμής έχουν δοκιμαστεί επιτυχώς για πάνω από 2000 τελεστές σε ένα μόνο πεδίο ορισμού, κάτι που είναι ενθαρρυντικό για την μελλοντική εξέλιξη του συστήματος εφόσον ο αριθμός των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών αναμένεται να αυξάνεται συνεχώς με το χρόνο.

Μετά την περάτωση της διαδικασίας σχεδιασμού ενεργειών, το JPlan παρέχει το πλάνο σε δική του μορφή σαν απλή σειριακή λίστα από τελεστές, επομένως τα πλάνα που παράγει θεωρούνται πάντα σειριακά και ο αριθμός των επιπέδων ισούται με τον αριθμό των τελεστών. Το LPG-td από την άλλη εξάγει το πλάνο σε μορφή συμβατή με την PDDL+, το οποίο μπορεί να είναι είτε σειριακό είτε δομημένο σε επίπεδα. Οι τελεστές που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο μπορούν να εφαρμοστούν με οποιαδήποτε σειρά ή ακόμη και ταυτόχρονα, αν το σύστημα εκτέλεσης παρέχει αυτή τη δυνατότητα, ωστόσο όλοι οι τελεστές ενός δεδομένου επιπέδου πρέπει να έχουν εφαρμοστεί πριν εφαρμοστεί οποιοσδήποτε τελεστής του επόμενου επιπέδου. Είναι προφανές ότι για τα πλάνα του LPG-td ισχύει ότι ο αριθμός των επιπέδων είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερος ή ίσος του αριθμού των τελεστών. Ο τρόπος που τα δύο συστήματα σχεδιασμού ενεργειών παρέχουν τα πλάνα έχει άμεση σχέση με την αναπαράσταση της σύνθετης υπηρεσίας, καθώς όπως είναι φανερό μόνο το LPG-td μπορεί να περιγράψει σύνθετες διαδικτυακές υπηρεσίες που περιέχουν παράλληλη εκτέλεση ατομικών υπηρεσιών.

Στα κλασικά πεδία ορισμού τα κατηγορήματα χωρίς ορίσματα αποτελούν σπάνιο φαινόμενο, ωστόσο στον κόσμο των διαδικτυακών υπηρεσιών τέτοια κατηγορήματα εμφανίζονται συχνά, καθώς πολλές διαδικτυακές υπηρεσίες αναπαρίστανται με αυτόν τον τρόπο. Η αδυναμία των δύο συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών να υποστηρίξουν κατηγορήματα χωρίς ορίσματα ήταν ένα μειονέκτημα που έπρεπε να υπερνικηθεί με την προσθήκη ενός εικονικού ορίσματος ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών. Όσον αφορά τις εισόδους, άλλο ένα τεχνικό θέμα που έπρεπε να υπερνικηθεί ήταν ότι το JPlan δεν υποστηρίζει την γλώσσα PDDL αυτήν καθεαυτήν, αλλά δέχεται σαν είσοδο αρχεία με μια μορφή αρκετά όμοια με την PDDL, επομένως πρέπει να γίνει η μετατροπή πριν τα αρχεία δοθούν προς επίλυση στο σύστημα, ενώ το LPG-td από την άλλη δέχεται τυπικές PDDL περιγραφές. Τέλος, το JPlan δεν παρέχει κάποιο τρόπο αναζήτησης εναλλακτικών πλάνων σε περίπτωση που ο χρήστης δεν ικανοποιήθηκε από το πρώτο, ενώ στο LPG-td ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον αριθμό των πλάνων που επιθυμεί, εφόσον βέβαια υπάρχουν περισσότερα του ενός.

Αν και υπήρξαν μειονεκτήματα που έπρεπε να ξεπεραστούν και τα δύο συστήματα σχεδιασμού ενεργειών αποδείχθηκαν αποδοτικά και εξυπηρετούν τους σκοπούς του συστήματος σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών. Κάποια μέτρα απόδοσης από πραγματικά πειράματα για τα συγκεκριμένα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών καθώς και σύγκριση των χρόνων που απαιτούν παρουσιάζονται στην ενότητα των παραδειγμάτων χρήσης.

4.7. Αποτίμηση ποιότητας σύνθετων υπηρεσιών

Σε πολλές περιπτώσεις το σύστημα παράγει περισσότερες της μιας σύνθετες υπηρεσίες, λόγω της σημασιολογικής χαλάρωσης αλλά και της χρήσης πολλαπλών συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Για να είναι πλήρης η παρουσίαση των σύνθετων υπηρεσιών στον χρήστη πρέπει να επαυξηθεί με στατιστικά μεγέθη και μέτρα ποιότητας που υπολογίζονται για κάθε υπηρεσία. Τέτοια μέτρα περιλαμβάνουν τον αριθμό των ενεργειών και των επιπέδων σε ένα πλάνο (σύνθετη υπηρεσία), όπως επίσης και μέτρα ποιότητας βασισμένα στην απόσταση, τα οποία αντικατοπτρίζουν την ακρίβεια του πλάνου.

Αν δεν πραγματοποιηθεί σημασιολογική χαλάρωση και οι χρόνοι εκτέλεσης κάθε τελεστή (δηλαδή κάθε ατομικής διαδικτυακής υπηρεσίας) θεωρηθούν περίπου ίσοι, ή αν δεν υπάρχουν πληροφορίες για αυτούς τους χρόνους, τότε είναι εύλογο τα πλάνα με λιγότερα επίπεδα να είναι προτιμότερα, εφόσον ο συνολικός χρόνος εκτέλεσής τους εκτιμάται ότι είναι μικρότερος. Ωστόσο, όταν εμπλέκεται σημασιολογική χαλάρωση, το μέτρο ποιότητας με βάση την απόσταση

αποκτά μεγάλη σημασία, καθώς τα ακριβή πλάνα είναι σε γενικές γραμμές προτιμότερα ακόμα κι αν περιλαμβάνουν περισσότερες ενέργειες και επίπεδα.

Για τον υπολογισμό του μέτρου ποιότητας με βάση την απόσταση, κάθε έννοια που εμφανίζεται στο πλάνο πρέπει να επισημανθεί με τη σημασιολογική της απόσταση από την αρχική έννοια από την οποία προήλθε, καθώς και με το επιλεγμένο μέτρο ομοιότητας. Όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη ενότητα, όταν η απόσταση είναι 0 τόσο για το μέτρο απόστασης edge-counting όσο και για το upwards ctopic, οι έννοιες θεωρούνται ισοδύναμες. Επιπρόσθετα, κάθε έννοια συσχετίζεται με το είδος της ιεραρχικής σχέσης που έχει με τη αρχική έννοια: υπερκλάση (superclass), υποκλάση (subclass), αδελφή (sibling).

Το μέτρο απόστασης edge-counting υπολογίζεται σαν γραμμικός συνδυασμός των αποστάσεων όλων των εννοιών που εμφανίζονται στο πλάνο. Αν υπάρχει ένα σύνολο n εννοιών, και κάθε έννοια c_i επισημαίνεται

- με μια σημασιολογική απόσταση με τιμή d_i , η οποία έχει αποκτηθεί με χρήση του ΔΟΟ
- με ένα βάρος w_i , ανάλογα με την ιεραρχική της σχέση με την αρχική έννοια,

η τιμή του μέτρου ποιότητας υπολογίζεται ως:

$$\sum_{i=0}^n w_i d_i$$

Το μέτρο απόστασης upwards ctopic υπολογίζεται σαν γινόμενο των αποστάσεων όλων των εννοιών που εμφανίζονται στο πλάνο, εξαιρώντας τις έννοιες που έχουν απόσταση 0, δηλαδή είναι ισοδύναμες με τις αρχικές τους. Όπως και πριν, για ένα σύνολο n εννοιών, όπου κάθε έννοια c_i επισημαίνεται με μια σημασιολογική απόσταση d_i , και ένα βάρος w_i , η τιμή του μέτρου ποιότητας υπολογίζεται ως:

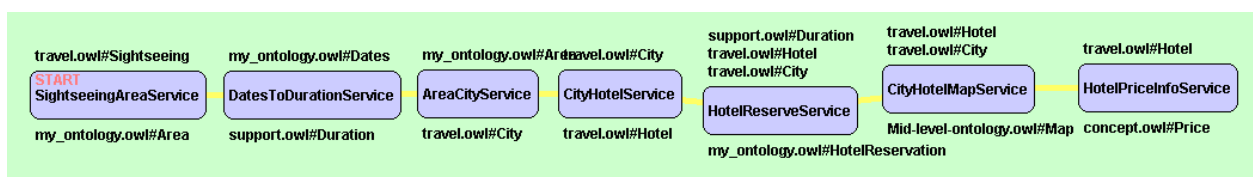
$$\prod_{i=0}^n w_i d_i, \quad d_i \neq 0$$

Αν υπάρχει ακριβής αντιστοίχιση εισόδων και εξόδων, ή αν στα πλάνα υπάρχουν μόνο ισοδύναμες έννοιες, τότε το μέτρο ποιότητας με βάση την απόσταση είναι 0, ενώ η τιμή αυτή αυξάνεται καθώς το πλάνο χάνει σε ακρίβεια.

4.8. Αναπαράσταση λύσης και Αντικατάσταση ατομικής υπηρεσίας

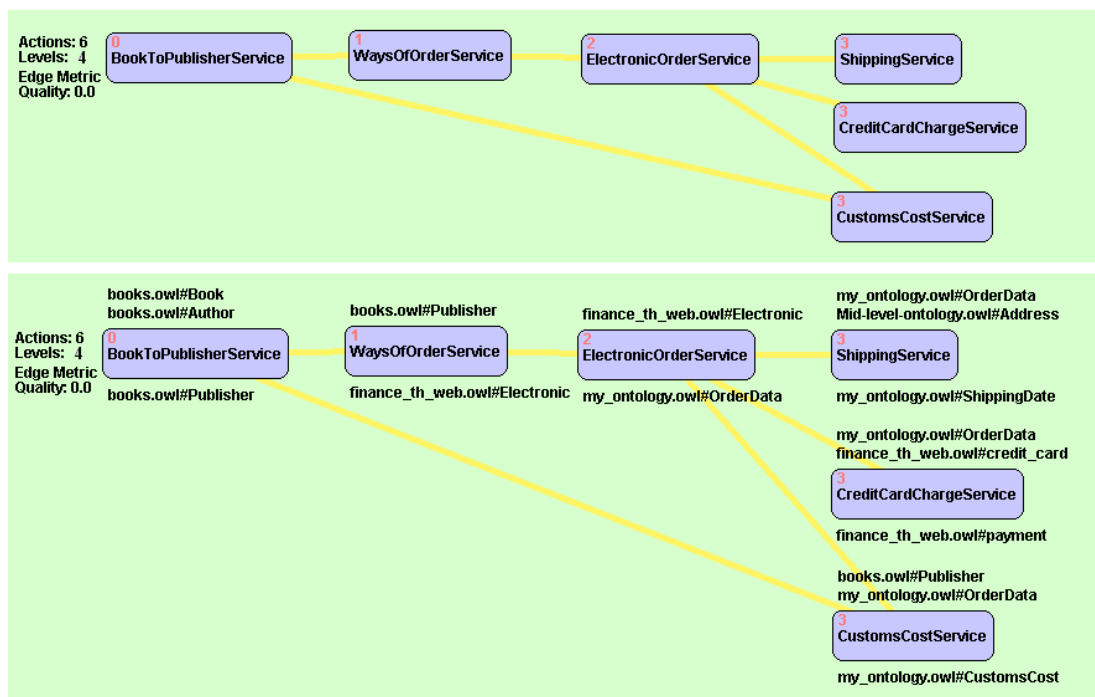
Το Γραφικό Περιβάλλον διευκολύνει την κατανόηση των σύνθετων υπηρεσιών παρέχοντας οπτική αναπαράσταση των παραγόμενων πλάνων, κάτι που επιτρέπει αναγνώριση των υποδομών που σχηματίζονται από την παράλληλη εκτέλεση ενεργειών σε αυτά. Τα οπτικοποιημένα πλάνα συνοδεύονται από τα αντίστοιχα στατιστικά στοιχεία καθώς και από τα υπολογισμένα μέτρα ποιότητας. Επιπρόσθετα, το Γραφικό Περιβάλλον επιτρέπει επεμβάσεις στο πλάνο.

Οι σύνθετες υπηρεσίες που παράγονται από το σύστημα JPlan παρουσιάζονται σχηματικά σαν μια σειριακή ακολουθία κλήσεων απλών υπηρεσιών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 26.



Εικόνα 26. Παράδειγμα σειριακού πλάνου που παρήγαγε το JPlan.

Τα αντίστοιχα πλάνα του LPG-td παρουσιάζονται δομημένα σε επίπεδα, δηλαδή κάποιες ατομικές υπηρεσίες μπορούν να εκτελεστούν παράλληλα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 27. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει αν επιθυμεί ή όχι να εμφανίζονται οι εισόδους και οι εξόδους της κάθε υπηρεσίας, ώστε να είναι σε θέση να επαληθεύσει την ορθότητα του πλάνου, αν το επιθυμεί.



Εικόνα 27. Πλάνο που παρήγαγε το σύστημα LPG-td, με και χωρίς εισόδους και εξόδους.

Μέσα από το Γραφικό Περιβάλλον καλείται και το Υποσύστημα Αντικατάστασης Υπηρεσίας, το οποίο είναι υπεύθυνο για τον εντοπισμό εκείνων των διαδικτυακών υπηρεσιών ανάμεσα στις διαθέσιμες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά αντί για κάποια συγκεκριμένη ατομική υπηρεσία που περιέχεται στο πλάνο. Η λειτουργία αυτή απαιτεί πληροφορίες που παρέχονται από τον ΔΟΟ όσον αφορά ισοδύναμες και σημασιολογικά σχετικές έννοιες. Ένας τελεστής A μπορεί να θεωρηθεί εναλλακτικός για έναν τελεστή Q , δηλαδή ισοδύναμος ή σημασιολογικά σχετικός, εφόσον δεν παραβιάζει την ορθότητα του πλάνου και τη συνέπεια των ενδιάμεσων καταστάσεων. Για να ισχύει αυτό πρέπει να είναι αληθείς και οι δύο ακόλουθες συνθήκες:

- $\text{prec}(A) \subseteq \text{prec}(Q)$
- $\text{add}(A) \supseteq \text{add}(Q)$

Όταν ο χρήστης το απαιτήσει, ανιχνεύονται οι εναλλακτικές υπηρεσίες και στη συνέχεια παρουσιάζονται σε μια λίστα από την οποία ο χρήστης είναι ελεύθερος να επιλέξει. Η εναλλακτική υπηρεσία αντικαθιστά την αρχική άμεσα τόσο στο πλάνο όσο και στην οπτική αναπαράσταση. Η λειτουργία αντικατάστασης μπορεί να εφαρμοστεί διαδοχικά όσες φορές και σε όσες υπηρεσίες επιθυμεί ο χρήστης.

Η αντικατάσταση υπηρεσίας κρίνεται απαραίτητη σε περιπτώσεις μη διαθεσιμότητας κάποιας υπηρεσίας. Από τη στιγμή της δημοσίευσης της περιγραφής OWL-S μιας υπηρεσίας σε κάποιο μητρώο UDDI μέχρι τη στιγμή της κλήσης της υπηρεσίας, ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων μπορεί να καταστήσει την υπηρεσία μη διαθέσιμη. Το PORSCE II με τη λειτουργία αντικατάστασης υπηρεσίας παρέχει έναν τρόπο παράκαμψης του προβλήματος χωρίς την απαίτηση επαναπραγματοποίησης της διαδικασίας σχεδιασμού ενεργειών. Η αντικατάσταση υπηρεσιών αποδεικνύεται επίσης χρήσιμη σε περιπτώσεις που ο χρήστης δεν επιθυμεί να χρησιμοποιήσει κάποια συγκεκριμένη υπηρεσία ακόμα και αν είναι διαθέσιμη, λόγω έλλειψης εμπιστοσύνης στον πάροχό της ή για άλλους λόγους.

4.9. Παραδείγματα χρήσης και αξιολόγηση

Αυτή η ενότητα στοχεύει στην επίδειξη της χρήσης του συστήματος μέσω παραδειγμάτων και στην παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων που αφορούν τους χρόνους που απαιτούνται από το σύστημα για τις διάφορες λειτουργίες, τη δυνατότητα κλιμάκωσης του συστήματος, καθώς και σύγκριση με προηγούμενες εκδόσεις.

Τα αρχικά test sets που χρησιμοποιήθηκαν για πειραματισμό τόσο με το PORSCE II όσο και με το PORSCE αποκτήθηκαν από τα OWLS-TC έκδοση 2.2 αναθεώρηση 1 [OWLS-TC] και περιλαμβάνουν σημασιολογικές περιγραφές διαδικτυακών υπηρεσιών εκφρασμένες σε OWL-S από διάφορα πεδία ορισμού όπως books (βιβλία), food (φαγητό) και economy (οικονομία), καθώς και τις αντίστοιχες οντολογίες. Τα σύνολα αυτά παρέχονται από το SemWebCentral [SemWebCentral], το οποίο αποτελεί μία από τις κυριότερες πηγές συστημάτων ανοικτού κώδικα, ερευνητικών έργων και δεδομένων που σχετίζονται με το Σημασιολογικό Ιστό, και αποτελούν μια αρκετά μεγάλη συλλογή σημασιολογικών διαδικτυακών υπηρεσιών για χρήση σε σημασιολογικά συστήματα.

Πειράματα με αυτά τα σύνολα δεδομένων που πραγματοποιήθηκαν στο PORSCE αποκάλυψαν ότι η φύση των πεδίων ορισμού που παράγονταν δεν επέτρεπε το σχηματισμό πλάνων μήκους μεγαλύτερου του 2 (δηλαδή με περισσότερα από δύο επίπεδα), επειδή οι ατομικές διαδικτυακές υπηρεσίες που περιγράφονται δεν προσφέρονται για τη δημιουργία πολύπλοκων σύνθετων υπηρεσιών. Η σημασιολογική χαλάρωση στις έννοιες που χρησιμοποιούνται στις περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών δεν επέφερε σημαντική αλλαγή σε αυτά τα αποτελέσματα [Hatzi et al, 2008].

Για τα πειράματα στο PORSCE II κρίθηκε αναγκαίο να τροποποιηθούν κάποιες υπάρχουσες περιγραφές διαδικτυακών υπηρεσιών και να προστεθούν κάποιες νέες. Αυτές οι παρεμβάσεις στα πεδία ορισμού εξυπηρετούν σκοπούς ελέγχου, δοκιμής και επίδειξης όλων των λειτουργιών του συστήματος, τόσο στην αναπαράσταση και στο σχηματισμό σύνθετων υπηρεσιών όσο και στην αντικατάσταση ατομικών υπηρεσιών που περιλαμβάνονται στις σύνθετες. Με αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνεται η ικανότητα του συστήματος να αντιμετωπίσει οποιαδήποτε πιθανή κατάσταση σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Οι τροποποιήσεις και προσθήκες που πραγματοποιήθηκαν για την υλοποίηση των σεναρίων θα αναφερθούν σε κάθε παράδειγμα χρήσης.

Στο υπόλοιπο της ενότητας αυτής παρουσιάζονται δύο ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης του συστήματος PORSCE II που αφορούν διαφορετικά πεδία ορισμού. Για κάθε παράδειγμα παρουσιάζονται οι διαθέσιμες υπηρεσίες που συμπεριλήφθηκαν ή τροποποιήθηκαν, μαζί με τις εισόδους και εξόδους τους. Επίσης παρουσιάζονται παραδείγματα μετατροπής OWL-S σε PDDL, η αναπαράσταση των διαδικτυακών υπηρεσιών με όρους σχεδιασμού ενεργειών, οι αποκτηθείσες λύσεις, καθώς και μέτρα απόδοσης του συστήματος.

4.9.1. Οργάνωση Ταξιδιού

Το πρώτο σενάριο αναφέρεται στο πεδίο ορισμού travel του συνόλου OWLS-TC, το οποίο σχετίζεται με ταξίδια, και περιλαμβάνει ένα χρήστη που επιθυμεί να δει αξιοθέατα σε κάποιες συγκεκριμένες ημερομηνίες. Με όρους διαδικτυακών υπηρεσιών, ο χρήστης αναζητά μια σύνθετη διαδικτυακή υπηρεσία η οποία του παρέχει την τιμή ενός δωματίου σε ένα επιθυμητό ξενοδοχείο, πραγματοποιεί μια κράτηση και εντοπίζει χάρτη της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι ατομικές υπηρεσίες που είναι διαθέσιμες καλύπτουν αυτήν τη λειτουργικότητα μόνο μερικώς, επομένως για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του χρήστη πρέπει να λυθεί ένα πρόβλημα σύνθεσης.

Μια συνοπτική παρουσίαση των διαδικτυακών υπηρεσιών που τροποποιήθηκαν ή προστέθηκαν στο συγκεκριμένο πεδίο ορισμού, και επομένως παρουσιάζουν ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο παράδειγμα, φαίνεται στον Πίνακα 3:

Service Name	Inputs	Outputs
SightseeingAreaService	Sightseeing	Area
DatesToDurationService	Dates	Duration
AreaCityService	Area	City
CityHotelService	City	Hotel
CityLuxuryHotelService	City	LuxuryHotel
CityHotelMapService	City, Hotel	Map
AlternativeCityHotelMapService	City, Hotel	Map
HotelPriceInfoService	Hotel	Price
HotelReserveService	City, Hotel, Duration	HotelReservation

Πίνακας 3. Συνοπτική παρουσίαση του υποσυνόλου των διαδικτυακών υπηρεσιών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο σενάριο.

Μεταξύ αυτών, οι υπηρεσίες που τροποποιήθηκαν με βάση αντίστοιχες υπηρεσίες του πεδίου ορισμού travel του συνόλου OWLS-TC είναι οι ακόλουθες:

- *SightseeingAreaService*: Δέχεται σαν είσοδο τη δραστηριότητα *Sightseeing* και επιστρέφει περιοχές της πόλης που παρέχουν αυτήν τη δραστηριότητα.
- *CityHotelService*: Δέχεται σαν είσοδο το όνομα μιας πόλης και επιστρέφει ξενοδοχεία στην πόλη αυτή.
- *CityLuxuryHotelService*: Δέχεται σαν είσοδο το όνομα μιας πόλης και επιστρέφει πολυτελή ξενοδοχεία (*LuxuryHotel*) σε αυτήν την πόλη. Η κλάση *LuxuryHotel* είναι άμεση υποκλάση της κλάσης *Hotel*.

- CityHotelMapService: Δέχεται σαν είσοδο το όνομα μιας πόλης και ενός ξενοδοχείου και παρέχει έναν χάρτη της περιοχής.
- AlternativeCityHotelMapService: Όπως και η προηγούμενη (εναλλακτική υπηρεσία).

Οι νέες υπηρεσίες που προστέθηκαν στο πεδίο ορισμού παρουσιάζονται παρακάτω:

- DatesToDurationService: Δέχεται σαν είσοδο κάποιες ημερομηνίες και παρέχει τη χρονική διάρκεια του διαστήματος που καθορίζουν αυτές.
- AreaCityService: Δέχεται σαν είσοδο περιοχές μιας πόλης και επιστρέφει την πόλη αυτή.
- HotelPriceInfoService: Δέχεται σαν είσοδο ένα όνομα ξενοδοχείου και παρέχει πληροφορίες για τις τιμές του.
- HotelReserveService: Δέχεται σαν είσοδο το όνομα μιας πόλης κι ενός ξενοδοχείου, καθώς και μια χρονική περίοδο, και πραγματοποιεί μια κράτηση.

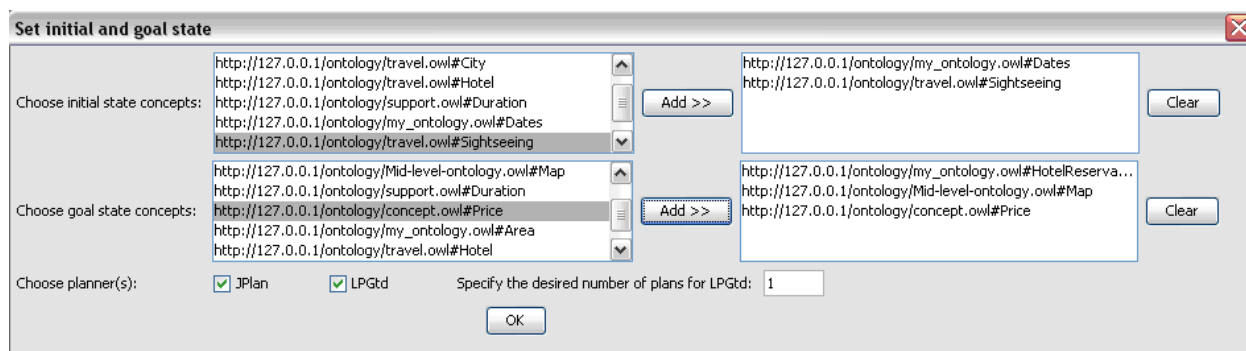
Το πρώτο βήμα για την επίλυση του προβλήματος σύνθεσης είναι η αναπαράσταση των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών με όρους σχεδιασμού ενεργειών, μία από τις λειτουργίες που αναλαμβάνει το Υποσύστημα Μετασχηματισμού. Όλες οι προαναφερθείσες υπηρεσίες, καθώς και οι περιγραφές όλων των υπόλοιπων διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών του πεδίου ορισμού travel της συλλογής OWLS-TC, μετατρέπονται σε τελεστές του πεδίου ορισμού. Με αυτόν τον τρόπο το μέγεθος του πεδίου ορισμού και επομένως οι μετρήσεις απόδοσης διατηρούνται σε ρεαλιστικά επίπεδα. Το αποτέλεσμα αυτού του βήματος είναι ένα σύνολο τελεστών σχεδιασμού ενεργειών σε PDDL.

Ένα παράδειγμα μετασχηματισμού της OWL-S περιγραφής μίας από τις προαναφερθείσες υπηρεσίες σε τελεστή εκφρασμένο σε PDDL δίνεται στην Εικόνα 28, με σημειωμένες τις αντιστοιχίες μεταξύ των δύο προτύπων. Το πεδίο `<profile:serviceName>` της περιγραφής σε OWL-S δίνει το όνομα του τελεστή σε PDDL. Επιπλέον, ο συνδυασμός των πεδίων `<profile:hasInput>`, `<process:hasInput>` και `<process:Input>` της OWL-S δίνει τις προϋποθέσεις του τελεστή, ενώ αντίστοιχα ο συνδυασμός των πεδίων `<profile:hasOutput>`, `<process:hasOutput>` και `<process:Output>` δίνει τα αποτελέσματα του τελεστή.



Εικόνα 28. Ένα παράδειγμα μετασχηματισμού OWL-S σε PDDL.

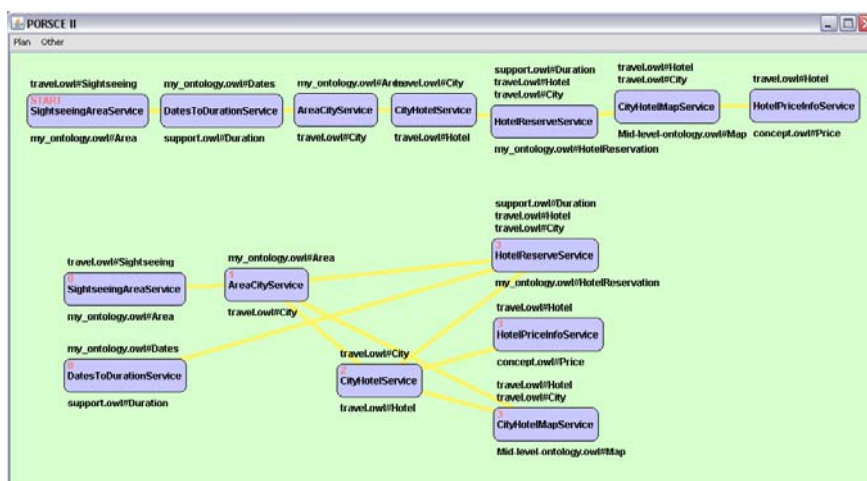
Επόμενο βήμα είναι η αναπαράσταση της σύνθετης υπηρεσίας με όρους σχεδιασμού ενεργειών, μετά από αλληλεπίδραση με το χρήστη ώστε να εκφραστούν οι απαιτήσεις, λειτουργία που επίσης πραγματοποιεί το Υποσύστημα Μετασχηματισμού σε συνεργασία με το Γραφικό Περιβάλλον. Το γραφικό περιβάλλον του PORSCE II επιτρέπει στον χρήστη να σχηματίσει με οπτικό τρόπο τις αρχικές και τελικές καταστάσεις, καθώς και να επιλέξει μεταξύ των διαθέσιμων συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 29.



Εικόνα 29. Ορισμός αρχικής και τελικής κατάστασης και επιθυμητών συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών.

Για να υλοποιηθεί αυτό, παρουσιάζονται σε παράθυρο διαλόγου όλες οι διαθέσιμες έννοιες που χρησιμοποιούνται στους τελεστές που έχουν σχηματισθεί στο προηγούμενο βήμα, και ο χρήστης καλείται να επιλέξει τα σύνολα των εννοιών που αντιπροσωπεύουν τις εισόδους και τις επιθυμητές εξόδους της σύνθετης υπηρεσίας, τα οποία θα διαμορφώσουν την αρχική και την τελική κατάσταση του προβλήματος, αντίστοιχα.

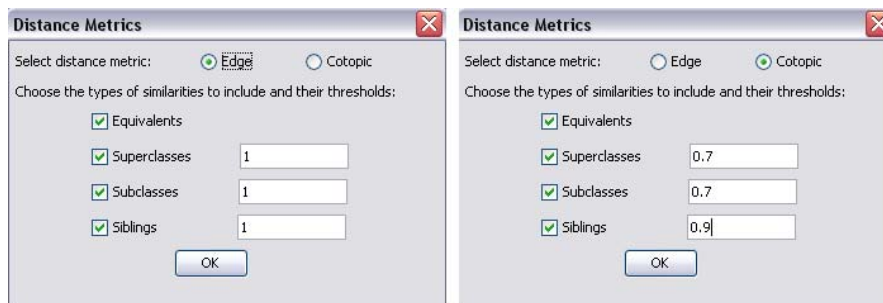
Μετά την αναπαράσταση του προβλήματος ακολουθεί η διαδικασία επίλυσής του με κλήσεις από το Υποσύστημα Μετασχηματισμού σε εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών. Το αποτέλεσμα της επίλυσης είναι ένα ή περισσότερα πλάνα που αποτελούν περιγραφές των σύνθετων υπηρεσιών που παράγονται από τα συστήματα JPlan και LPG-*td* για τις συγκεκριμένες αρχικές και τελικές καταστάσεις που φαίνονται στην Εικόνα 29, με το σύνολο τελεστών που περιγράφηκε παραπάνω, χωρίς χρήση ισοδύναμων ή σημασιολογικά σχετικών εννοιών από τον ΔΟΟ. Οι σύνθετες υπηρεσίες οπτικοποιούνται στο Γραφικό Περιβάλλον, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 30.



Εικόνα 30. Τα πλάνα από το JPlan (πάνω) και το LPG-*td* (κάτω) για το συγκεκριμένο παράδειγμα χρήσης.

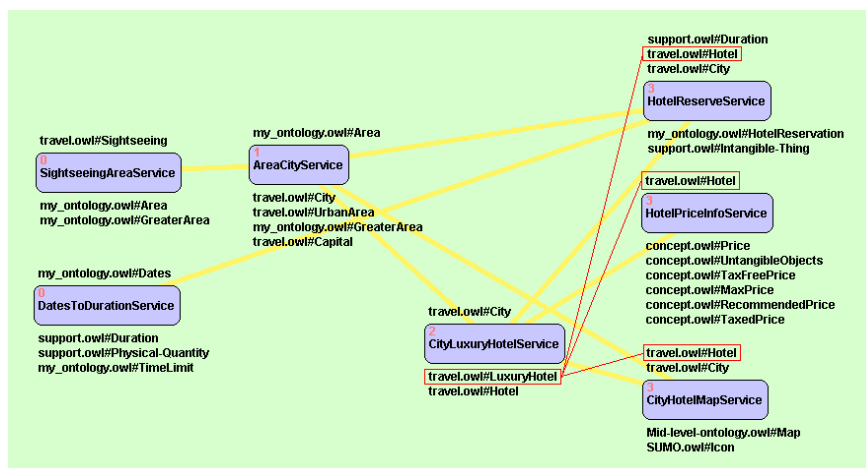
Ενώ σε κλασικά προβλήματα σχεδιασμού ενεργειών η ακριβής ταύτιση εννοιών εισόδων και εξόδων είναι υποχρεωτική, στο πεδίο των διαδικτυακών υπηρεσιών η κατάσταση διαφέρει, καθώς είναι προτιμότερο να επιστραφεί στον χρήστη κάποια σύνθετη διαδικτυακή υπηρεσία που προσεγγίζει την επιθυμητή, από το να μην επιστραφεί καμία υπηρεσία. Για αυτόν το λόγο, η επίλυση του προβλήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί κάτω από συνθήκες σημασιολογικής χαλάρωσης, με τη συνεργασία του Υποσυστήματος Μετασχηματισμού και του Διαχειριστή Οντολογιών OWL. Οι ισοδύναμες και σημασιολογικά σχετικές έννοιες που επιστρέφονται από τον ΔΟΟ επιτρέπουν στο σύστημα να συνθέσει προσεγγιστικές σύνθετες υπηρεσίες, στις

περιπτώσεις που δεν είναι δυνατό να βρεθούν ακριβείς ταυτίσεις. Για παράδειγμα, αν δεν υπήρχε η υπηρεσία CityHotelService, και το σύστημα επιχειρούσε να λύσει το δοσμένο πρόβλημα χωρίς την βοήθεια του ΔΟΟ, δεν θα παραγόταν καμία λύση. Ωστόσο, με χρήση του ΔΟΟ με τα κατάλληλα μέτρα απόστασης και κατώφλια, μέσω της γραφική διεπαφής που φαίνεται στην Εικόνα 31, το σύστημα θα ανακάλυπτε ομοιότητες που θα του επέτρεπαν να ταυτίσει προσεγγιστικά εισόδους και εξόδους.



Εικόνα 31. Παραδείγματα διεπαφής για μέτρα σημασιολογικής απόστασης μεταξύ εννοιών.

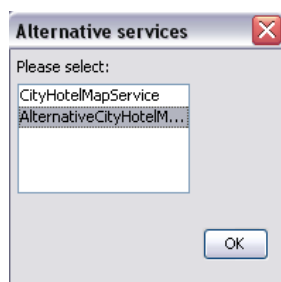
Στο συγκεκριμένο σενάριο, αν χρησιμοποιηθεί το μέτρο σημασιολογικής απόστασης edge-counting και συμπεριληφθούν όλες οι ιεραρχικές σχέσεις με κατώφλι απόστασης 2, τότε οι έννοιες *Hotel* και *LuxuryHotel* αποδεικνύονται σημασιολογικά σχετικές από τον ΔΟΟ, επομένως το σύστημα είναι σε θέση να βρει το προσεγγιστικό πλάνο που φαίνεται στην Εικόνα 32, που παρήγαγε το σύστημα LPG-td. Όπως δείχνουν οι σημειώσεις στην Εικόνα 32, παρόλο που δεν υπήρχε ακριβής ταύτιση μεταξύ εισόδων και εξόδων, χρησιμοποιήθηκαν προσεγγιστικές έννοιες.



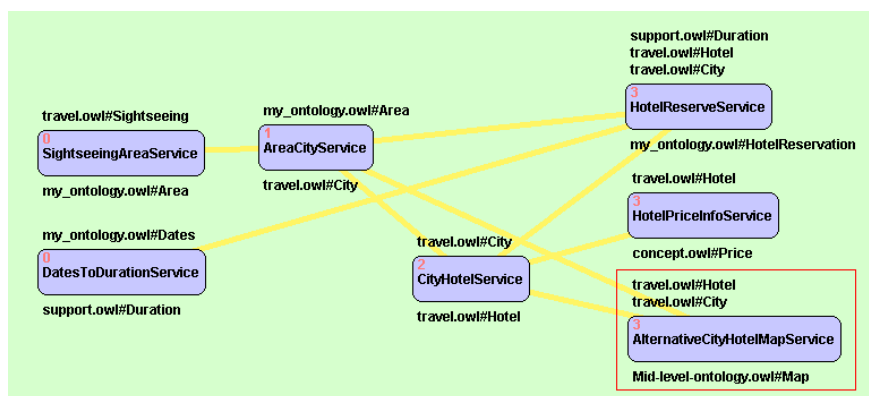
Εικόνα 32. Προσεγγιστική σύνθετη υπηρεσία με την χρήση του ΔΟΟ.

Όταν κάποια ατομική υπηρεσία είναι προσωρινά ή μόνιμα μη διαθέσιμη, επομένως εμποδίζεται η εκτέλεση της σύνθετης υπηρεσίας, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει αντικατάσταση της συγκεκριμένης ατομικής υπηρεσίας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η υπηρεσία που θα

αντικατασταθεί ενδεικτικά είναι η CityHotelMapService. Η λίστα με τις υπηρεσίες που κρίνονται ισοδύναμες ή σχετικές, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της χρήσης του ΔΟΟ φαίνεται στην Εικόνα 33, ενώ το πλάνο που παράγεται μετά την αντικατάσταση φαίνεται στην Εικόνα 34.



Εικόνα 33. Η γραφική διεπαφή αντικατάστασης υπηρεσίας.



Εικόνα 34. Η σύνθετη υπηρεσία μετά από την αντικατάσταση.

4.9.2. Ηλεκτρονική Αγορά Βιβλίου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ένα σενάριο που αφορά την ηλεκτρονική αγορά ενός βιβλίου. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι σε γενικές γραμμές όμοια με το προηγούμενο παράδειγμα χρήσης, ένας επιπλέον στόχος όμως είναι η μέτρηση της απόδοσης του συστήματος. Σε αυτό το παράδειγμα, το οποίο βασίζεται στο πεδίο ορισμού books της συλλογής OWLS-TC, ο χρήστης επιθυμεί να αγοράσει ένα βιβλίο του οποίου γνωρίζει τον τίτλο και το συγγραφέα, και το οποίο θα του αποσταλεί σε διεύθυνση που ο ίδιος θα υποδείξει, ενώ η χρέωση θα γίνει στα στοιχεία της πιστωτικής κάρτας που θα υποδείξει στο σύστημα. Ο χρήστης επιθυμεί να ενημερωθεί για την πραγματοποίηση της πληρωμής λαμβάνοντας την ηλεκτρονική απόδειξη πληρωμής, την ημερομηνία αποστολής του βιβλίου καθώς και το κόστος του τελωνείου, αν υπάρχει.

Μια συνοπτική περιγραφή αυτών των διαδικτυακών υπηρεσιών που τροποποιήθηκαν ή προστέθηκαν στο πεδίο ορισμού, μαζί με τις εισόδους και τις εξόδους τους, παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.

Service Name	Inputs	Outputs
BookToPublisherService	Book, Author	Publisher
CreditCardChargeService	OrderData, CreditCard	Payment
ElectronicOrderService	Electronic	OrderData
PublisherElectronicOrderService	PublisherInfo	OrderData
ElectronicOrderInfoService	Electronic	OrderInformation
ShippingService	Address, OrderData	ShippingDate
WaysOfOrderService	Publisher	Electronic
CustomsCostService	Publisher, OrderData	CustomsCost

Πίνακας 4. Μια συμπαγής παρουσίαση των διαδικτυακών υπηρεσιών που συμπεριλήφθηκαν στο πεδίο ορισμού για το συγκεκριμένο σενάριο.

Μεταξύ αυτών, οι υπηρεσίες που τροποποιήθηκαν με βάση υπάρχουσες υπηρεσίες του πεδίου ορισμού books της συλλογής OWLS-TC είναι οι ακόλουθες:

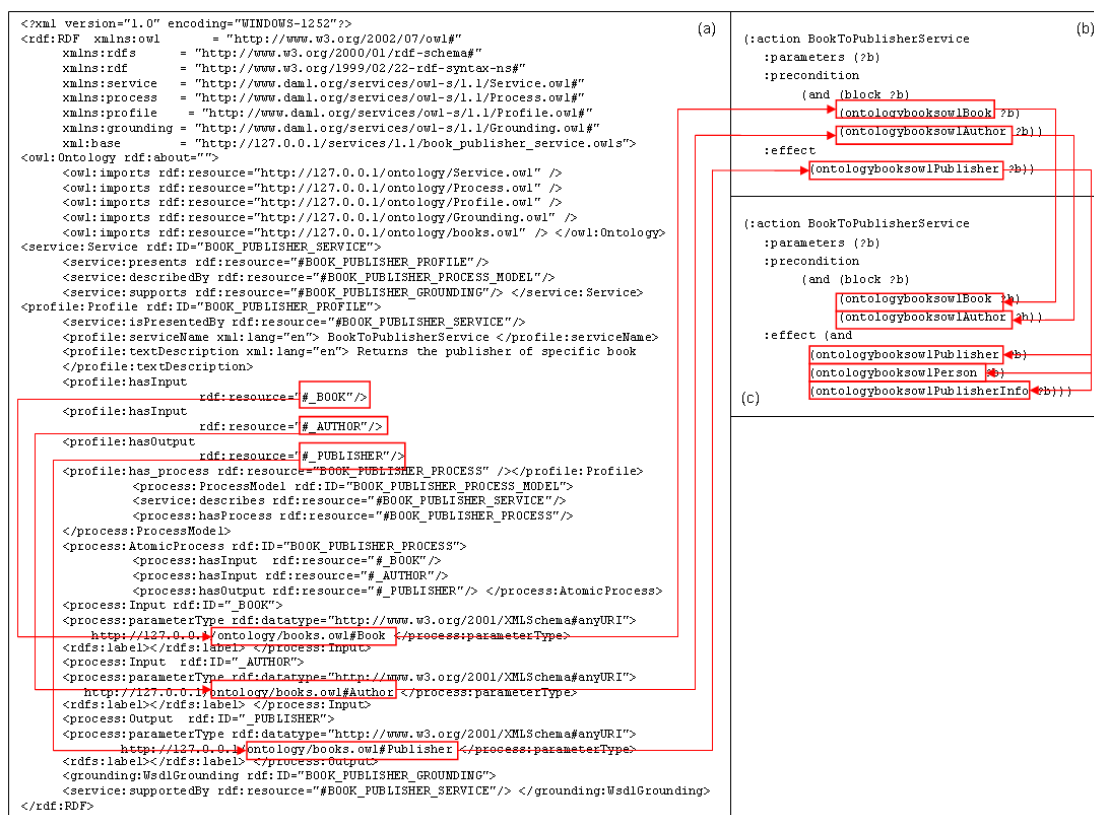
- BookToPublisherService: Δέχεται σαν είσοδο ένα τίτλο βιβλίου και τον συγγραφέα του και επιστρέφει τον εκδότη του βιβλίου.
- PublisherElectronicOrderService: Δέχεται σαν είσοδο πληροφορίες για κάποιον εκδότη και πραγματοποιεί μια ηλεκτρονική παραγγελία για ένα συγκεκριμένο αντικείμενο. Επιστρέφει ένα στιγμιότυπο της OrderData. Η κλάση PublisherInfo είναι άμεση υποκλάση της Publisher.

Οι υπηρεσίες που προστέθηκαν στο πεδίο ορισμού είναι οι ακόλουθες:

- CreditCardChargeService: Δέχεται σαν είσοδο τα στοιχεία μιας παραγγελίας και τα στοιχεία μιας πιστωτικής κάρτας και επιστρέφει απόδειξη της πληρωμής.
- ElectronicOrderService: Δέχεται σαν είσοδο την λειτουργία της ηλεκτρονικής παραγγελίας που παρέχει κάποιος εκδότης και πραγματοποιεί μια ηλεκτρονική παραγγελία για ένα συγκεκριμένο αντικείμενο. Επιστρέφει ένα στιγμιότυπο της OrderData.
- ElectronicOrderInfoService: Δέχεται σαν είσοδο την λειτουργία ηλεκτρονικής παραγγελίας που παρέχεται από έναν εκδότη και πραγματοποιεί μια ηλεκτρονική παραγγελία. Επιστρέφει ένα στιγμιότυπο της OrderInformation, που είναι άμεση υποκλάση της OrderData.

- ShippingService: Δέχεται σαν είσοδο τα στοιχεία μιας παραγγελίας και τη διεύθυνση του αγοραστή και παρέχει την εκτιμώμενη ημερομηνία αποστολής.
- WaysOfOrderService: Δέχεται σαν είσοδο έναν εκδότη και επιστρέφει τους δυνατούς τρόπους παραγγελίας για αυτόν τον εκδότη, για παράδειγμα ElectronicOrder.
- CustomsCostService: Δέχεται σαν είσοδο τον εκδότη και τα στοιχεία μιας παραγγελίας και επιστρέφει το κόστος του τελωνείου, αν υπάρχει.

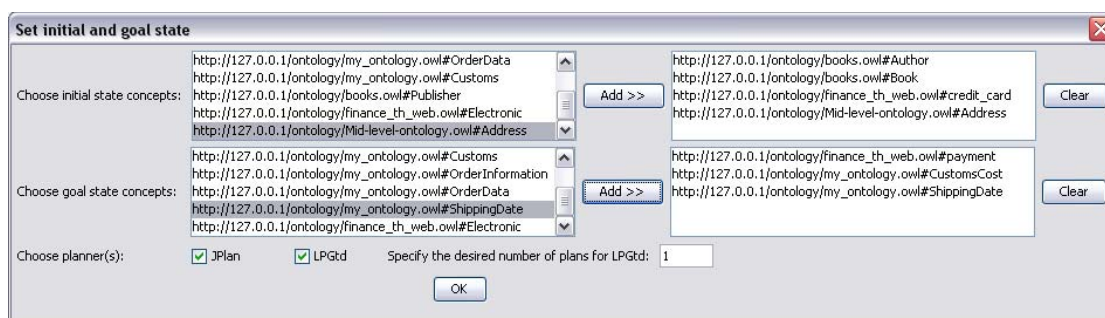
Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο παράδειγμα χρήσης, όλες οι διαθέσιμες διαδικτυακές υπηρεσίες, τόσο αυτές που περιγράφηκαν παραπάνω όσο και οι υπόλοιπες που συμπεριλαμβάνονται στο πεδίο ορισμού books της συλλογής OWLS-TC, διαβάζονται και μετασχηματίζονται σε τελεστές PDDL. Αυτό γίνεται με σκοπό να ληφθούν ρεαλιστικές μετρήσεις χρόνων, καθώς σε ένα τυπικό πεδίο ορισμού που έχει προκύψει από μετασχηματισμό προβλήματος σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, ο αριθμός των διαθέσιμων υπηρεσιών / τελεστών αναμένεται να είναι μεγάλος.



Εικόνα 35. Ένα παράδειγμα μετασχηματισμού OWL-S σε PDDL. (a) Η περιγραφή OWL-S της υπηρεσίας `BookToPublisherService`. (b) Ο παραγόμενος τελεστής PDDL. (c) Άλλος ένας τελεστής PDDL που μπορεί να παραχθεί με εφαρμογή σημασιολογικής χαλάρωσης.

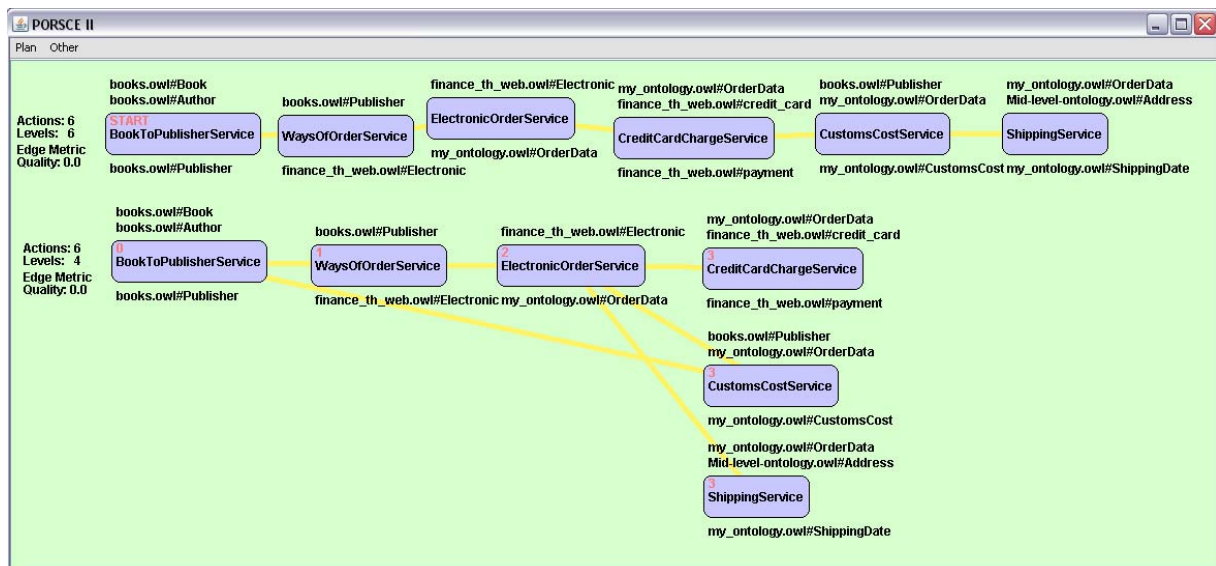
Ένα παράδειγμα του μετασχηματισμού OWL-S σε PDDL, με σημειωμένες τις αντιστοιχίες μεταξύ εισόδων / εξόδων της OWL-S και προϋποθέσεων / αποτελεσμάτων της PDDL φαίνεται στην Εικόνα 35. Η OWL-S περιγραφή της διαδικτυακής υπηρεσίας BookToPublisherService φαίνεται στην Εικόνα 35(a), ενώ ο τελεστής PDDL που προκύπτει από αυτή τη περιγραφή μέσω του Υποσυστήματος Μετασχηματισμού παρουσιάζεται στην Εικόνα 35(b). Ένας εναλλακτικός τελεστής σε PDDL που ενδέχεται να προκύψει μετά από σημασιολογική χαλάρωση με χρήση του Διαχειριστή Οντολογιών OWL για την ανακάλυψη σχετικών εννοιών φαίνεται στην Εικόνα 35(c).

Η γραφική διεπαφή του PORSCΕ II επιτρέπει στον χρήστη να σχηματίσει με οπτικό τρόπο την αρχική κατάσταση και τους στόχους του προβλήματος, καθώς και να επιλέξει τα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών που θα χρησιμοποιηθούν για την απόκτηση λύσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 36.



Εικόνα 36. Ορισμός αρχικής και τελικής κατάστασης, και επιθυμητών συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών.

Η αρχική κατάσταση αντιπροσωπεύει τις εισόδους της σύνθετης υπηρεσίας, ενώ οι στόχοι του προβλήματος αναπαριστούν τις επιθυμητές εξόδους της. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα οι εισοδοί της υπηρεσίας είναι οι έννοιες Author (συγγραφέας), Book (βιβλίο), credit_card (στοιχεία πιστωτικής κάρτας) και Address (διεύθυνση αποστολής), ενώ οι έξοδοι περιλαμβάνουν τις έννοιες payment (ηλεκτρονική απόδειξη πληρωμής), CustomsCost (κόστος τελωνείου) και ShippingDate (ημερομηνία αποστολής). Στην Εικόνα 37 παρουσιάζονται τα πλάνα που παρήχθησαν από τα συστήματα JPlan και LPG-td για την συγκεκριμένη αρχική και τελική κατάσταση, χρησιμοποιώντας το σύνολο των τελεστών που περιγράφηκε παραπάνω, και χωρίς καμία σημασιολογική χαλάρωση, δηλαδή χωρίς την χρήση σημασιολογικά σχετικών εννοιών από τον Διαχειριστή Οντολογιών OWL. Μαζί με την οπτική αναπαράσταση του κάθε πλάνου, δηλαδή της κάθε σύνθετης υπηρεσίας, παρέχονται στατιστικά στοιχεία καθώς και στοιχεία ποιότητας.

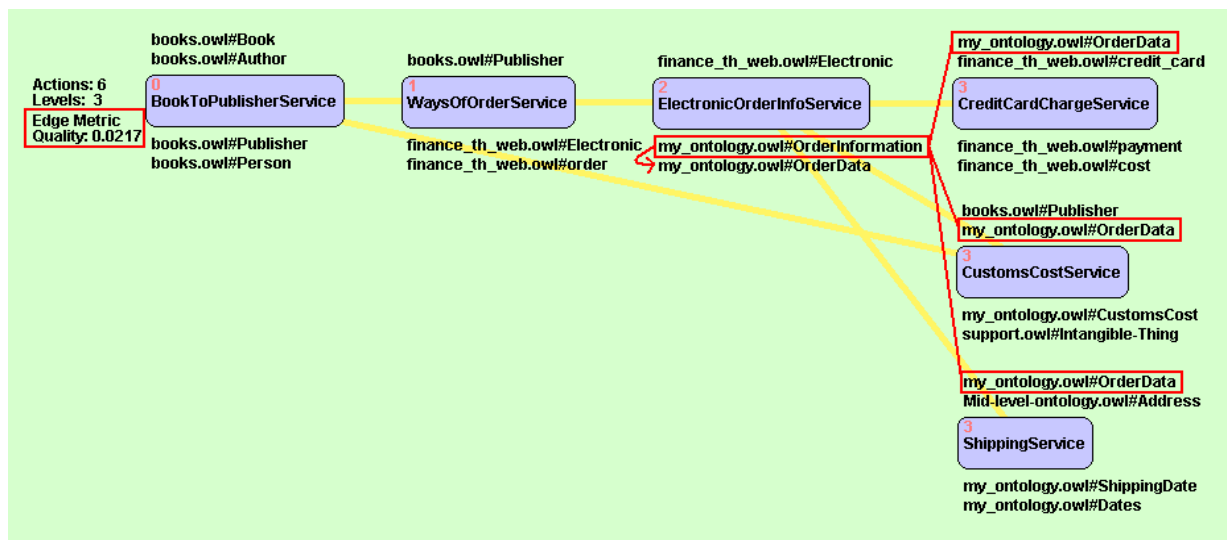


Εικόνα 37. Τα πλάνα από το JPlan (πάνω) και το LPG-td (κάτω) για το συγκεκριμένο παράδειγμα χρήσης.

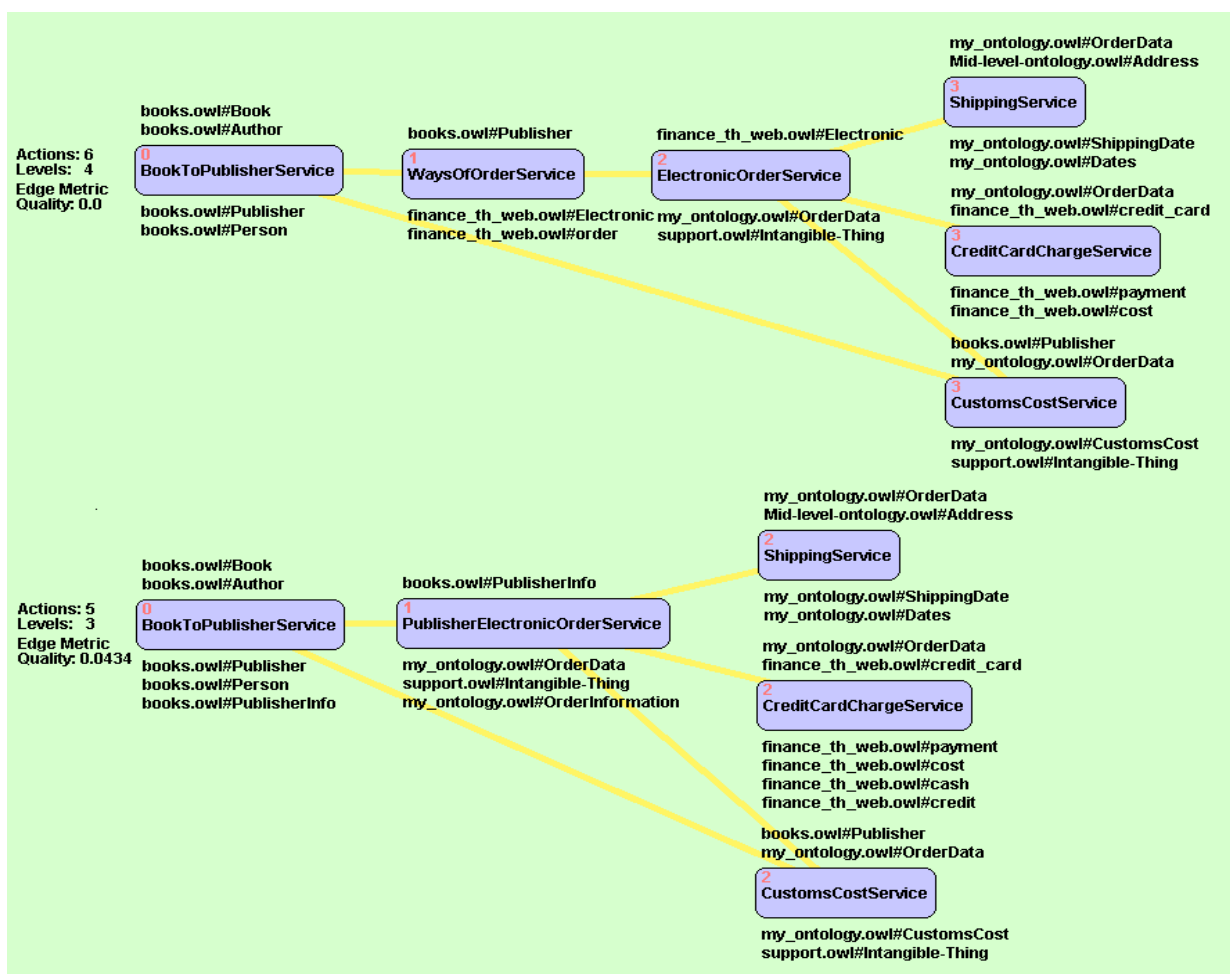
Στον χώρο των διαδικτυακών υπηρεσιών είναι προτιμότερο να παρουσιαστεί στον χρήστη μια σύνθετη υπηρεσία που προσεγγίζει την απαιτούμενη λειτουργικότητα από το να μην επιστραφεί καμία σύνθετη υπηρεσία. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, αν η υπηρεσία *ElectronicOrderService* δεν συμπεριλαμβανόταν ανάμεσα στις διαθέσιμες υπηρεσίες, και το σύστημα επιχειρούσε να λύσει το δοθέν πρόβλημα επιχειρώντας ακριβή αντιστοίχιση εννοιών, δεν θα ήταν σε θέση να επιστρέψει καμία σύνθετη υπηρεσία. Αντίθετα, η χρήση του ΔΟΟ με τα κατάλληλα μέτρα αποκάλυψε ομοιότητες μεταξύ εννοιών που διευκόλυναν την αντιστοίχιση μεταξύ τους, και επομένως την παραγωγή προσεγγιστικών πλάνων με μειωμένη ακρίβεια.

Το γραφικό περιβάλλον δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να διαμορφώσει το βαθμό και το είδος της σημασιολογικής χαλάρωσης που επιθυμεί, επιτρέποντάς του να επιλέξει τη κατάλληλη μετρική, τις ιεραρχικές σχέσεις και τα κατώφλια απόστασης που επιθυμεί. Σε περίπτωση που ο χρήστης δεν έχει καλή γνώση της διαδικασίας σημασιολογικής χαλάρωσης, του δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιήσει προκαθορισμένα μέτρα και κατώφλια. Αν χρησιμοποιηθεί το μέτρο απόστασης *edge-counting* με όλες τις διαθέσιμες ιεραρχικές σχέσεις και όλα τα κατώφλια απόστασης 1, τότε οι έννοιες *OrderData* και *OrderInformation* θεωρούνται σημασιολογικά σχετικές και επομένως ο χρήστης θα λάβει το πλάνο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 38, το οποίο παρήχθη από το σύστημα σχεδιασμού ενεργειών LPG-td. Όπως σημειώνεται στην ίδια εικόνα, αν και δεν υπήρξε ακριβής αντιστοίχιση μεταξύ εννοιών εισόδου και εξόδου, το σύστημα ήταν σε θέση να βρει προσεγγιστική λύση. Προφανώς βέβαια,

ακολουθώντας την μείωση της ακρίβειας, μειώθηκε επίσης η ποιότητα του πλάνου σε σχέση με την αρχικώς επιθυμητή σύνθετη υπηρεσία της οποίας αυτό το πλάνο είναι μόνο μια προσέγγιση.



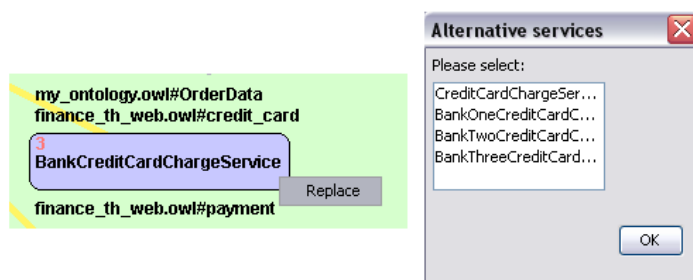
Εικόνα 38. Προσεγγιστική σύνθετη διαδικτυακή υπηρεσία με τη χρήση του ΔΟΟ.



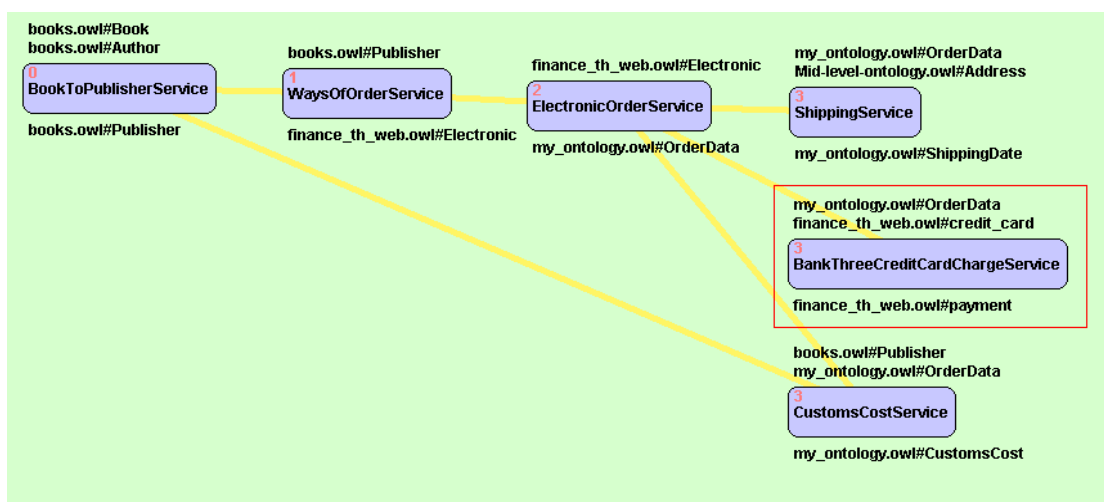
Εικόνα 39. Ποιότητα και ακρίβεια σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών.

Σε κάποιες περιπτώσεις τα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών είναι σε θέση να παράξουν τόσο ακριβή πλάνα όσο και προσεγγιστικά με την εφαρμογή σημασιολογικής χαλάρωσης, τα οποία όμως περιέχουν λιγότερα επίπεδα ή λιγότερες ενέργειες. Προφανώς η ποιότητα τέτοιων σύνθετων υπηρεσιών είναι μειωμένη, ωστόσο ορισμένες φορές μπορεί να είναι περισσότερο επιθυμητές, ειδικά αν ο χρόνος εκτέλεσης της σύνθετης υπηρεσίας αποτελεί σοβαρό θέμα. Η ισορροπία μεταξύ ποιότητας και ακρίβειας τελικά αποτελεί απόφαση του χρήστη, καθώς του παρουσιάζονται όλες οι πιθανές σύνθετες υπηρεσίες μαζί με τα μέτρα ποιότητας που έχουν υπολογιστεί για τη καθεμία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 39.

Όταν κάποια διαδικτυακή υπηρεσία είναι προσωρινά ή μόνιμα μη διαθέσιμη ή ο χρήστης επιθυμεί απλά να μην τη χρησιμοποιήσει, τότε μπορεί να υποδειχθεί αντικατάσταση της ατομικής υπηρεσίας. Στο παράδειγμα που εξετάζεται σε αυτή την ενότητα η υπηρεσία που αντικαθίσταται είναι η *CreditCardChargeService*. Μέσω της γραφικής διεπαφής ο χρήστης μπορεί να ζητήσει την λίστα των εναλλακτικών υπηρεσιών που ανακαλύπτονται με την βοήθεια του ΔΟΟ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 40. Ακολούθως, μπορεί να επιλέξει κάποια εναλλακτική υπηρεσία από αυτή τη λίστα, καταλήγοντας στο πλάνο της Εικόνα 41.



Εικόνα 40. Η διεπαφή αντικατάστασης υπηρεσίας.



Εικόνα 41. Η σύνθετη διαδικτυακή υπηρεσία μετά την αντικατάσταση.

Όπως προαναφέρθηκε, παρόλο που στο παράδειγμα που εξετάστηκε χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα μικρό ποσοστό των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών, οι OWL-S περιγραφές των υπόλοιπων διαδικτυακών υπηρεσιών που συμπεριλαμβάνονται στο πεδίο ορισμού books της συλλογής OWLS-TC επίσης διαβάζονται και μετατρέπονται σε τελεστές ώστε να διατηρηθεί ένα ρεαλιστικό μέγεθος πεδίου ορισμού και να αποκτηθούν ρεαλιστικές μετρήσεις απόδοσης.

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος καθώς ο αριθμός των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών αυξάνεται, οι περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών του πεδίου ορισμού books της συλλογής OWLS-TC προστέθηκαν στο πεδίο ορισμού προοδευτικά κατά ομάδες (batches). Τα ενδιαφέροντα μεγέθη είναι ο χρόνος προεπεξεργασίας των οντολογιών, ο συνολικός χρόνος μετασχηματισμού αλλά και ο μέσος χρόνος μετασχηματισμού ανά διαδικτυακή υπηρεσία, καθώς και ο χρόνος που απαιτείται για το σχεδιασμό ενεργειών με τα δύο εξωτερικά υποσυστήματα σχεδιασμού ενεργειών που επιλέχθηκαν.

Τα πειραματικά αποτελέσματα όσον αφορά τους χρόνους που αναφέρθηκαν παραπάνω παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 και αποκτήθηκαν από πειράματα σε υπολογιστή με επεξεργαστή Dual-Core AMD Opteron Processor στα 2.20GHz με 1GB μνήμης RAM. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν χρόνους σε milliseconds για την προεπεξεργασία, τον μετασχηματισμό των OWL-S περιγραφών σε PDDL τελεστές και τον σχεδιασμό ενεργειών με τα LPG-td και JPlan, και αποκτήθηκαν μετά από έναν αριθμό διαφορετικών εκτελέσεων του συστήματος.

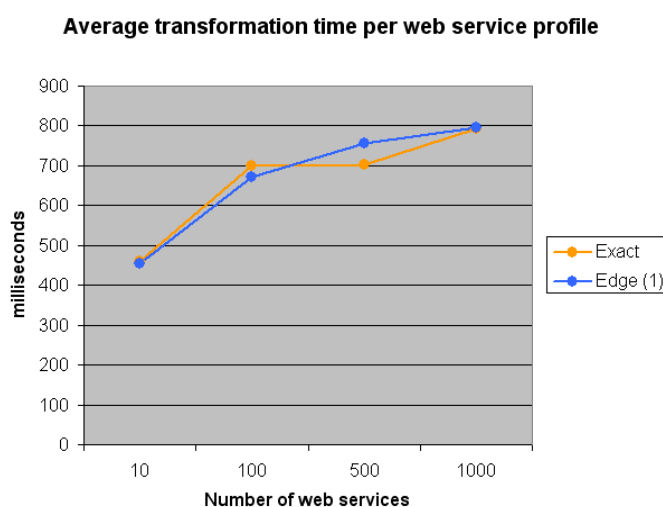
Number of web services		10	100	500	1000
Preprocessing time		5857	6104	5875	5703
Total transformation time	Exact	4594	70062	350836	792109
	Edge (1)	4531	75725	335477	796797
	Cotopic (0.9)	4585	74688	728633	3901141
Transformation time per web service	Exact	459	700	702	792
	Edge (1)	453	671	757	797
	Cotopic (0.9)	459	746	1457	3901
Planning time (JPlan)	Exact	31	63	93	172
	Edge (1)	14	37	125	176
	Cotopic (0.9)	23	22	156	375
Planning time (LPGtd)	Exact	1	13	16	17
	Edge (1)	4	6	15	16
	Cotopic (0.9)	3	5	16	16

Πίνακας 5. Μετρήσεις χρόνου σε milliseconds για πειράματα στο PORSCE II.

Οι μετρήσεις λήφθηκαν για πεδία ορισμού διαφορετικών μεγεθών, συγκεκριμένα 10, 100, 500 και 1000 OWL-S περιγραφών. Κάποια από τα πειράματα έγιναν χωρίς σημασιολογική χαλάρωση, δηλαδή με απαίτηση για ακριβή ταύτιση των εισόδων με τις εξόδους των ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών, και φαίνονται στις γραμμές του πίνακα που είναι σημειωμένες σαν

“Exact”. Σε άλλα πραγματοποιήθηκε σημασιολογική χαλάρωση, δηλαδή επιτράπηκε η εύρεση προσεγγιστικών σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών, με χρήση είτε του μέτρου απόστασης edge-counting με τα κατώφλια για όλες τις ιεραρχικές σχέσεις στο 1 (γραμμές “Edge”), είτε του μέτρου απόστασης upwards ctopic με τα κατώφλια για όλες τις ιεραρχικές σχέσεις στο 0.9 (γραμμές “Ctopic”).

Ο χρόνος προεπεξεργασίας των οντολογιών δεν έδειξε σημαντικές διακυμάνσεις μεταξύ των πειραμάτων, καθώς εξαρτάται μόνο από τον αριθμό και τη δομή των οντολογιών που επεξεργάζονται και όχι από τον αριθμό των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών.



Εικόνα 42. Μέσος χρόνος μετασχηματισμού ανά διαδικτυακή υπηρεσία για τις περιπτώσεις exact και edge-counting distance.

Ο συνολικός χρόνος μετασχηματισμού για όλες τις υπηρεσίες προφανώς αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των διαδικτυακών υπηρεσιών, ωστόσο ο μέσος χρόνος μετασχηματισμού κάθε υπηρεσίας συγκλίνει στα 0.8 δευτερόλεπτα για τις περιπτώσεις της ακριβούς αντιστοίχισης και της χρήσης του μέτρου απόστασης edge-counting, όπως δείχνει το γράφημα στην Εικόνα 42. Στην περίπτωση του μέτρου απόστασης upwards ctopic ωστόσο, παρατηρείται σημαντική αύξηση στο μέσο χρόνο μετασχηματισμού, καθώς αυξάνεται ο αριθμός διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών στο πεδίο ορισμού, εξαιτίας της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της σχετικότητας με βάση την απόσταση upwards ctopic μεταξύ δύο εννοιών.

Όσον αφορά τους χρόνους που απαιτούνται για τον σχεδιασμό ενεργειών, και τα δύο εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών δείχνουν αύξηση στο χρόνο που απαιτούν καθώς ο αριθμός των διαθέσιμων τελεστών αυξάνει, κάτι που σε γενικές γραμμές είναι αναμενόμενο. Ωστόσο, το

σύστημα LPG-td αποδεικνύεται αξιοσημείωτα πιο γρήγορο από το JPlan, τουλάχιστον στις περιπτώσεις που ελέγχθηκε και αφορούσαν εκτελέσεις του με τον διακόπτη (switch) *-speed*, ο οποίος υποχρεώνει το σύστημα να βρει λύση όσο το δυνατόν πιο γρήγορα, ακόμα κι αν αυτή δεν είναι η βέλτιστη.

Οι μετρήσεις χρόνων που παρουσιάστηκαν παραπάνω δείχνουν ότι το PORSCE II είναι σε θέση να διαχειριστεί πεδία ορισμού που περιλαμβάνουν μέχρι 1000 διαδικτυακές υπηρεσίες σε αποδεκτούς χρόνους, κάτι το οποίο έγινε εφικτό με τις βελτιώσεις που επήλθαν στους αλγορίθμους προεπεξεργασίας και μετασχηματισμού, οι οποίες περιγράφονται στις αντίστοιχες ενότητες. Μια σύγκριση του PORSCE II με τον προκάτοχό του, PORSCE, η οποία τονίζει τα αποτελέσματα των βελτιώσεων, δίνεται στον Πίνακα 6. Η σύγκριση αφορά το χρόνο προεπεξεργασίας των οντολογιών, τον αριθμό τελεστών που παράγονται τελικά, το συνολικό χρόνο μετασχηματισμού και το χρόνο σχεδιασμού ενεργειών για το σύστημα JPlan, το οποίο ήταν το μόνο που περιλαμβανόταν στο PORSCE, με χρήση σημασιολογικής χαλάρωσης με τα κατώφλια για όλες τις ιεραρχικές σχέσεις στο 1.

Η φάση της προεπεξεργασίας στο PORSCE διαρκεί περίπου 13 δευτερόλεπτα, ενώ το PORSCE II κατά προσέγγιση υποδιπλασιάζει το χρόνο που απαιτεί η αντίστοιχη φάση. Επιπλέον, ο αριθμός των τελεστών που παράγονται στο PORSCE II ισούται εξ' ορισμού σε όλες τις περιπτώσεις με τον αριθμό των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών, ενώ αντίθετα το PORSCE παράγει επιπρόσθετους τελεστές, κλώνους των αρχικών, χρησιμοποιώντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των εξόδων τους και όλων των σχετικών με αυτές εννοιών. Αυτό στην πλειοψηφία των περιπτώσεων έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός σημαντικά μεγάλου αριθμού τελεστών οι οποίοι μπορεί να θέσουν σημαντικό παράγοντα καθυστέρησης τόσο του χρόνου μετασχηματισμού όσο και του χρόνου σχεδιασμού ενεργειών.

Number of web services	10		100		500	
Systems	PORSCE	PORSCE II	PORSCE	PORSCE II	PORSCE	PORSCE II
Preprocessing time	13.1	5.9	13.4	6.1	13.3	5.7
Number of actions	43	10	3077	100	11422	500
Total transformation time	6	4.5	323	75.7	1746	728.6
Planning time (JPlan)	0.046	0.031	1.078	0.063	-	0.098

Πίνακας 6. Σύγκριση των PORSCE και PORSCE II (οι χρόνοι είναι σε δευτερόλεπτα).

Όσον αφορά τους συνολικούς χρόνους μετασχηματισμού στα δύο συστήματα, παρατηρείται ότι στο PORSCE II, είναι σημαντικά μικρότεροι. Ωστόσο, δεν παρατηρείται αναλογία μεταξύ της

μείωσης του αριθμού των τελεστών και της μείωσης του συνολικού χρόνου μετασχηματισμού στα δύο συστήματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη φάση του μετασχηματισμού εκτελούνται δύο διακριτές λειτουργίες για κάθε περιγραφή διαδικτυακής υπηρεσίας που πρόκειται να μετατραπεί σε τελεστή: κλήση προς τον ΔΟΟ ώστε να αποκτηθούν όλες οι σχετικές έννοιες και μετατροπή σε τελεστή (στην περίπτωση του PORSCE II) ή τελεστές - κλώνους (στην περίπτωση του PORSCE I). Στο PORSCE II, και οι δύο λειτουργίες λαμβάνουν χώρα για το σύνολο των υπηρεσιών που μετατρέπονται σε ισάριθμους τελεστές, ενώ στο PORSCE I η κλήση προς τον ΔΟΟ γίνεται μία φορά για την κάθε υπηρεσία, και όλοι οι υπόλοιποι τελεστές - κλώνοι δημιουργούνται μέσω συνδυασμών, χωρίς να χρειάζονται επιπλέον κλήσεις προς τον ΔΟΟ.

Τέλος, ο χρόνος σχεδιασμού ενεργειών με χρήση του συστήματος JPlan είναι σημαντικά μικρότερος στο PORSCE II, κάτι που οφείλεται στο μικρότερο αριθμό τελεστών.

4.10. Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε η προσέγγιση της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών μέσω σχεδιασμού ενεργειών. Η προσέγγιση αυτή απαιτεί μετασχηματισμό των OWL-S σημασιολογικών περιγραφών των διαδικτυακών υπηρεσιών με όρους ενός πεδίου ορισμού σχεδιασμού ενεργειών, χρησιμοποιώντας την πρότυπη γλώσσα PDDL, καθώς και επίλυση του αντίστοιχου προβλήματος με χρήση εξωτερικών συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών.

Η προσέγγιση αυτή υποστηρίχθηκε με την υλοποίηση του συστήματος PORSCE και της νεότερης έκδοσης PORSCE II, το οποίο συνδυάζει σχεδιασμό ενεργειών με εκμετάλλευση σημασιολογικών πληροφοριών για την επίλυση του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, κάθε πρόβλημα σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών αναπαρίσταται σαν πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών αντιστοιχίζοντας τις ατομικές διαδικτυακές υπηρεσίες σε τελεστές, τις εισόδους της επιθυμητής σύνθετης υπηρεσίας σαν αρχική κατάσταση του προβλήματος και τις εξόδους της επιθυμητής σύνθετης υπηρεσίας σαν τελική κατάσταση. Όλες αυτές οι πληροφορίες εξάγονται από τις OWL-S περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών. Ωστόσο, πριν το πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών μεταφραστεί σε PDDL και δοθεί προς επίλυση σε κάποιο εξωτερικό σύστημα, χρησιμοποιείται ο Διαχειριστής Οντολογιών OWL, ο οποίος έχει επεξεργαστεί τις απαραίτητες οντολογίες και είναι σε θέση να επιστρέψει σχετικές έννοιες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη σημασιολογική επέκταση του προβλήματος σχεδιασμού ενεργειών. Σαν αποτέλεσμα, εξαλείφεται η ανάγκη ακριβούς ταύτισης μεταξύ εισόδων και εξόδων των

υπηρεσιών, και εφαρμόζεται ο επιθυμητός βαθμός σημασιολογικής χαλάρωσης. Τα δεδομένα σημασιολογικών αποστάσεων μεταξύ εννοιών χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση της ποιότητας των σύνθετων υπηρεσιών. Τέλος, το σύστημα αντιμετωπίζει περιπτώσεις μη διαθεσιμότητας ατομικών υπηρεσιών δίνοντας τη δυνατότητα αντικατάστασης επιλεγμένων υπηρεσιών με ισοδύναμες ή σημασιολογικά σχετικές εναλλακτικές υπηρεσίες, οι οποίες καθορίζονται και πάλι με τη βοήθεια του Διαχειριστή Οντολογιών OWL.

Στο παρόν κεφάλαιο επίσης παρουσιάστηκαν δύο πλήρη παραδείγματα χρήσης του συστήματος για δύο διαφορετικά πεδία ορισμού. Το πρώτο παράδειγμα, από το πεδίο ορισμού travel της συλλογής OWLS-TC εξυπηρέτησε σκοπούς επίδειξης των δυνατοτήτων του συστήματος. Οι διαθέσιμες OWL-S περιγραφές διαδικτυακών υπηρεσιών μετασχηματίστηκαν σε τελεστές και οι PDDL περιγραφές του πεδίου ορισμού και του προβλήματος σχηματίστηκαν με αλληλεπίδραση του Υποσυστήματος Μετασχηματισμού και του χρήστη. Ακολούθως, δημιουργήθηκαν σύνθετες υπηρεσίες που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του χρήστη με τη χρήση εξωτερικών συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Η σημασιολογική χαλάρωση του προβλήματος κατέστη δυνατή με τη χρήση του Διαχειριστή Οντολογιών OWL, και αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη, όπως φάνηκε από το παράδειγμα, σε περιπτώσεις που δεν μπορεί να βρεθεί ακριβής λύση. Ωστόσο, η χρήση σχετικών εννοιών αντί των αρχικών μειώνει την ακρίβεια του πλάνου και ακολούθως και τα μέτρα ποιότητας της σύνθετης υπηρεσίας, τα οποία παρουσιάζονται στο Γραφικό Περιβάλλον, ώστε ο χρήστης να αποφασίζει ποια σύνθετη υπηρεσία είναι προτιμότερη. Ο χειρισμός περιπτώσεων μη διαθεσιμότητας κάποιας υπηρεσίας παρουσιάστηκε επίσης, μέσω της αντικατάστασης ατομικών υπηρεσιών με εναλλακτικές, ισοδύναμες ή σημασιολογικά σχετικές. Με το δεύτερο παράδειγμα, από το πεδίο ορισμού books της ίδιας συλλογής, δόθηκαν μετρήσεις απόδοσης με προοδευτική αύξηση του αριθμού των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών ώστε να μελετηθεί η δυνατότητα κλιμάκωσης του συστήματος. Επίσης, παρουσιάστηκε συγκριτική μελέτη των χρόνων που απαιτεί το PORSCE II με τους χρόνους του πρωτότυπου συστήματος, με σκοπό τη μελέτη των επιδράσεων των βελτιωμένων αλγορίθμων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η προσέγγιση που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό καλύπτει αρκετά θέματα που δεν καλύπτονταν από προηγούμενες προσεγγίσεις, όπως εκμετάλλευση της σημασιολογικής πληροφορίας που δίνεται από τις σημασιολογικές περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες οντολογίες. Επιπλέον, δόθηκε η δυνατότητα παρέμβασης στη σύνθετη υπηρεσία αντικαθιστώντας μία ή περισσότερες ατομικές υπηρεσίες, και έτσι λύνεται το πρόβλημα της μη διαθεσιμότητας κάποια ατομικής υπηρεσίας χωρίς να απαιτείται εκτέλεση του συστήματος και εκ νέου σχεδιασμός. Τέλος, προτάθηκαν τρόποι αποτίμησης της ποιότητας των παραγόμενων σύνθετων υπηρεσιών σε σχέση με την

ακρίβειά τους, ο έλεγχος όμως της ισορροπίας μεταξύ ποιότητας και ακρίβειας αφήνεται στον χρήστη.

Κατά την ανάπτυξη του συστήματος PORSCE διαπιστώθηκε η έλλειψη χρήσιμων χαρακτηριστικών όσον αφορά την οπτικοποίηση του πεδίου ορισμού και του προβλήματος για σκοπούς κατανόησης αλλά και συντήρησής του χωρίς να απαιτείται εκ νέου μετασχηματισμός των σημασιολογικών περιγραφών των υπηρεσιών. Επίσης οι δοκιμές περιορίστηκαν σε δύο μόνο εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών, όμως οι εξελίξεις της έρευνας στον χώρο δημιουργούν την ανάγκη για ευελιξία στη χρήση νέων συστημάτων. Αυτά τα θέματα, ωστόσο, είναι κοινά όχι μόνο για το πρόβλημα της σύνθεσης των διαδικτυακών υπηρεσιών, αλλά και για τα κλασικά πεδία σχεδιασμού ενεργειών, επομένως η λύση τους προτιμήθηκε να ερευνηθεί και να υλοποιηθεί σαν ξεχωριστό σύστημα και όχι σαν υποσύστημα του PORSCE. Η έρευνα αυτή και η υλοποίηση του συστήματος που προέκυψε περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 5

Σχεδιασμός ενεργειών με το σύστημα VLEPPO

5.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το σύστημα VLEPPO (Visual Language for Enhanced Planning Problem Orchestration), ένα ολοκληρωμένο σύστημα για τον ορισμό και την επίλυση προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Το VLEPPO αποτελεί ένα σύστημα σχεδιασμού γενικού σκοπού, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής όμως έχει χρησιμοποιηθεί κατά κύριο λόγο συμπληρωματικά με το PORSCE για διευκολύνει πτυχές του προβλήματος της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών.

Το σύστημα PORSCE οπτικοποιεί μόνο τις σύνθετες υπηρεσίες που προκύπτουν σαν λύσεις κατά την εκτέλεσή του, ενώ δεν μεριμνά για την οπτικοποίηση του πεδίου ορισμού και του προβλήματος, δηλαδή των διαθέσιμων ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών και των απαιτήσεων για τις σύνθετες υπηρεσίες. Επιπλέον, δεν δίνει τη δυνατότητα για παρεμβάσεις στο πεδίο ορισμού, δηλαδή στους τελεστές που αναπαριστούν τις διαθέσιμες ατομικές υπηρεσίες, σε πραγματικό χρόνο, μετά το πέρας της διαδικασίας μετασχηματισμού. Για να πραγματοποιηθούν τέτοιες αλλαγές απαιτείται η τροποποίηση των OWL-S περιγραφών και η επανεκτέλεση της διαδικασίας μετασχηματισμού, ώστε να προκύψουν οι τροποποιημένοι τελεστές. Τέλος, η παρούσα έκδοση του PORSCE λειτουργεί μόνο με τα δύο ενσωματωμένα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών, οι δοκιμές των οποίων δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα προς το παρόν, χωρίς όμως να υπάρχει κάποια εγγύηση για την απόδοσή τους στο μέλλον, καθώς ο αριθμός των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών αυξάνεται σημαντικά. Το σύστημα VLEPPO έρχεται να δώσει μια λύση στα παραπάνω θέματα, συμπληρώνοντας την λειτουργικότητα που λείπει από το PORSCE. Η ανάπτυξή του ωστόσο επιλέχθηκε να γίνει ανεξάρτητα από το PORSCE, εφόσον τα θέματα της οπτικοποίησης και της τροποποίησης των πεδίων ορισμού και των προβλημάτων, καθώς και της ευέλικτης διασύνδεσης με συστήματα σχεδιασμού ενεργειών, αφορούν όλα τα πεδία και τα προβλήματα σχεδιασμού ενεργειών και όχι μόνο όσα προκύπτουν κατά τη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών.

Το VLEPPO προσφέρει ένα εύχρηστο γραφικό περιβάλλον για την οπτικοποίηση αλλά και τον ορισμό πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών, έτσι ώστε να προάγει την κατανόηση και να διευκολύνει τη μοντελοποίηση και τη συντήρησή τους, ακόμα και για μη-ειδικούς. Επιπλέον, διατηρεί συμβατότητα με τα καθιερωμένα πρότυπα, και πιο συγκεκριμένα τη γλώσσα Planning Domain Definition Language (PDDL) [Ghallab et al, 1998] για περιγραφή και ορισμό προβλημάτων, και επομένως εξυπηρετεί την επικοινωνία με συστήματα σχεδιασμού ενεργειών που συμμορφώνονται με τα αντίστοιχα πρότυπα. Επίσης, το σύστημα προσφέρει υψηλό βαθμό ευελιξίας όσον αφορά την ολοκλήρωση με συστήματα σχεδιασμού ενεργειών, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία των διαδικτυακών υπηρεσιών (web services).

5.2. Στόχος και Αρχιτεκτονική

Κατά την ανάπτυξη του PORSCE διαπιστώθηκε ότι η οπτικοποίηση των πεδίων ορισμού και των προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών για σκοπούς κατανόησης και τροποποίησης είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό. Ωστόσο, μετά από έρευνα στη βιβλιογραφία παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχουν συστήματα που να καλύπτουν αυτήν την ανάγκη, ενώ γενικότερα υπάρχει έλλειψη συστημάτων τα οποία διευκολύνουν την ανάπτυξη πεδίων ορισμού σχεδιασμού ενεργειών [Vrakas et al, 2008], καθώς η μοντελοποίησή τους και η κωδικοποίησή τους απευθείας σε κάποια γλώσσα ορισμού, όπως η PDDL, είναι μια διαδικασία κουραστική και επιρρεπής σε συντακτικά και λογικά λάθη, ακόμα και για τους ειδικούς του πεδίου. Η δυνατότητα οπτικού σχεδιασμού και μοντελοποίησης μπορεί να περιορίσει τον αριθμό των λαθών και των ασυνεπειών στα πεδία ορισμού, καθώς αποδεσμεύει το σχεδιαστή από την ανάγκη να δίνει σημασία στο συντακτικό της γλώσσας ορισμού και του επιτρέπει να επικεντρωθεί περισσότερο στη σημασιολογία του προβλήματος.

Επιπλέον, ενώ οι αλγόριθμοι και οι τεχνικές σχεδιασμού ενεργειών είναι πολυάριθμοι [Hendler et al, 1990; Weld, 1999] και εξελίσσονται συνεχώς, τα αντίστοιχα συστήματα δεν είναι σε θέση να ακολουθήσουν αυτές τις εξελίξεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά κανόνα περιέχουν ή υλοποιούν έναν εξαιρετικά περιορισμένο αριθμό συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών (στις περισσότερες περιπτώσεις ένα μοναδικό σύστημα) το οποίο όσο περνάει ο χρόνος καθίσταται μη αποδοτικό στην αντιμετώπιση των συνεχώς αυξανόμενων μεγεθών και πολυπλοκοτήτων των προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Η διαπίστωση αυτή φέρνει στο προσκήνιο την ανάγκη για συστήματα τα οποία είναι ανεξάρτητα από τους αλγορίθμους σχεδιασμού ενεργειών, επομένως έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζονται στις εξελίξεις της έρευνας σε αυτόν τον τομέα.

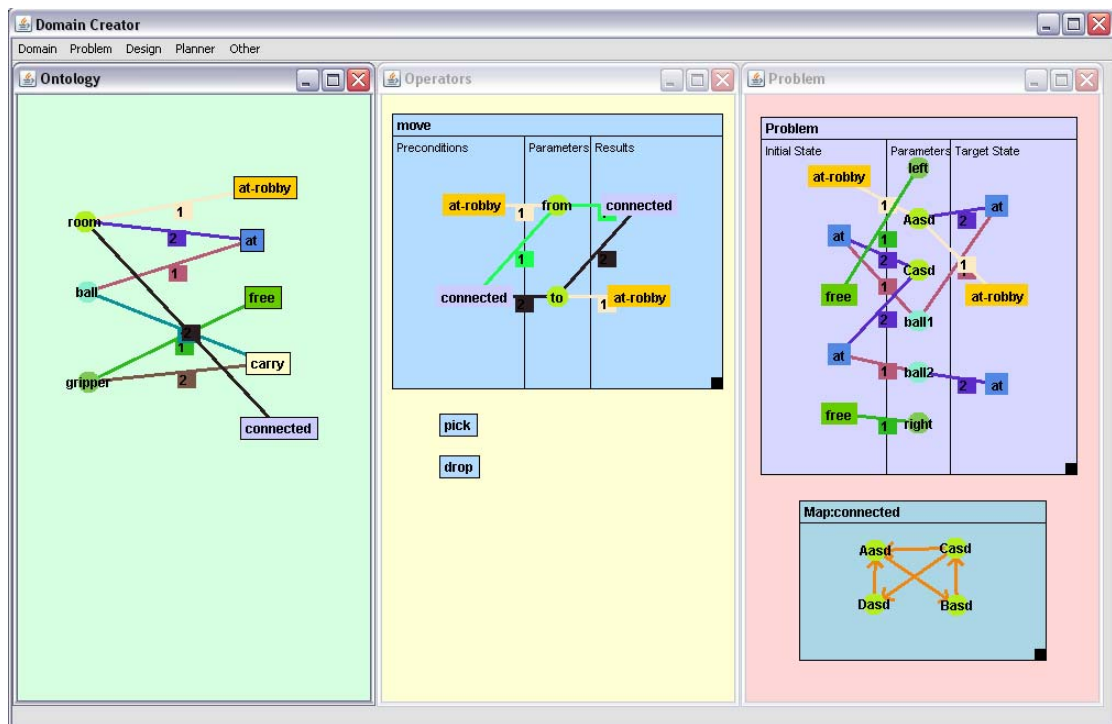
Κατά την ανάπτυξη του VLEPPO ελήφθησαν υπόψη όλα τα παραπάνω θέματα, με αποτέλεσμα ένα ολοκληρωμένο σύστημα για το σχεδιασμό και την επίλυση προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- εύχρηστο και διαισθητικό γραφικό περιβάλλον, το οποίο προάγει την κατανόηση των πεδίων ορισμού και των προβλημάτων, απλοποιεί τη μοντελοποίηση και τη συντήρησή τους, και διευκολύνει την αρθρωτή και ανεξάρτητη ανάπτυξή τους, ακόμα και για μη-ειδικούς χρήστες.
- συμμόρφωση με τα σύγχρονα πρότυπα για αναπαράσταση πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών, όπως η PDDL, επιτυγχάνοντας απρόσκοπτη επικοινωνία με συστήματα σχεδιασμού ενεργειών που ακολουθούν αυτά τα πρότυπα.
- υψηλός βαθμός ευελιξίας στην ολοκλήρωση με συστήματα σχεδιασμού ενεργειών, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία των διαδικτυακών υπηρεσιών για συνεργασία με εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών.

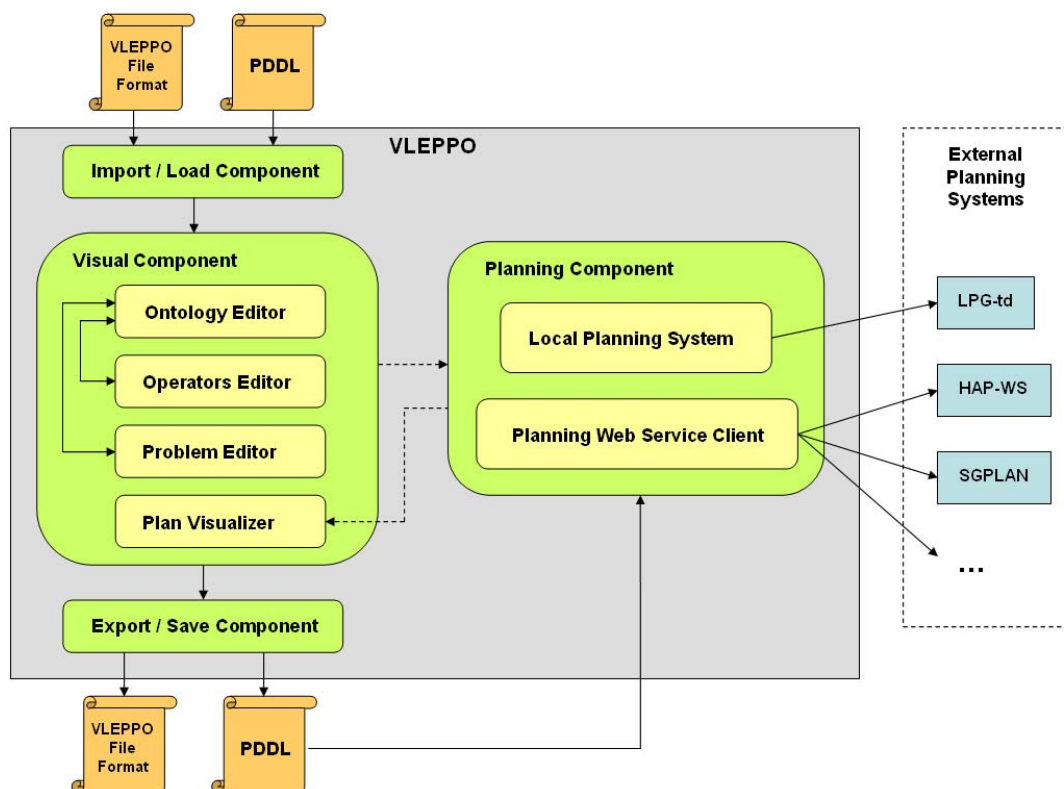
Σαν γλώσσα υλοποίησης επιλέχθηκε η Java, συνεπώς το σύστημα αποκτά την φορητότητα και την αξιοπιστία αυτής της ιδιαίτερα διαδεδομένης γλώσσας προγραμματισμού. Επιπλέον λόγοι επιλογής της συγκεκριμένης γλώσσας συνιστούν η αυξημένη της αποδοτικότητα κατά τη δημιουργία γραφικών διεπαφών καθώς και η ευκολία επικοινωνίας και χειρισμού διαδικτυακών υπηρεσιών.

Η διεπαφή του συστήματος κατά το σχεδιασμό ενός πεδίου ορισμού και ενός προβλήματος για το συγκεκριμένο πεδίο ορισμού εμφανίζεται στην Εικόνα 43. Το κεντρικό παράθυρο στην προκαθορισμένη μορφή του περιλαμβάνει το Σχεδιαστή Οντολογιών (Ontology Editor) και το Σχεδιαστή Τελεστών (Operators Editor), όπου ο χρήστης σχεδιάζει το πεδίο ορισμού, όπως επίσης και το Σχεδιαστή Προβλημάτων (Problem Editor), όπου ο χρήστης σχεδιάζει τα προβλήματα σχεδιασμού ενεργειών με βάση το εκάστοτε πεδίο ορισμού.

Η αρχιτεκτονική του συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 44. Το VLEPPO αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα: Γραφικό Περιβάλλον (Visual Component), Σχεδιασμού Ενεργειών (Planning Component), Εισαγωγής-Φόρτωσης (Import / Load Component) και Εξαγωγής / Αποθήκευσης (Export / Save Component).



Εικόνα 43. Μια πλήρης άποψη του γραφικού περιβάλλοντος του VLEPPO.



Εικόνα 44. Η αρχιτεκτονική του VLEPPO.

Το Γραφικό Περιβάλλον εξυπηρετεί την οπτική αναπαράσταση πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών, και αποτελεί τον πυρήνα του συστήματος. Η δομή του

πεδίου ορισμού περιγράφεται με χρήση οπτικών στοιχείων τα οποία αντιστοιχούν σε στοιχεία της PDDL, και να συνδυάζεται με τελεστές ώστε να παραχθεί μια πλήρης περιγραφή του. Στην συνέχεια, προβλήματα σχεδιασμού ενεργειών μπορούν να δημιουργηθούν με βάση αυτό το πεδίο ορισμού. Το σύστημα καθοδηγεί το χρήστη στον ορθό σχεδιασμό του πεδίου ορισμού ώστε να εξασφαλίσει τη συνέπειά του, καθώς εκτελεί ελέγχους εγκυρότητας (validity checks) σε πραγματικό χρόνο κατά το σχεδιασμό. Τα βασικά στοιχεία του Γραφικού Περιβάλλοντος είναι η απλότητα και η ευχρηστία του, ενώ έμφαση έχει δοθεί στην ακριβή αναπαράσταση των στοιχείων της PDDL [Hatzi et al., 2007b; 2009c]. Το σύστημα όσον αφορά την γραφική αναπαράσταση καλύπτει το μεγαλύτερο φάσμα των στοιχείων της PDDL, μέσα στα οποία συμπεριλαμβάνονται αυτά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στα σύγχρονα πεδία ορισμού και προβλήματα. Οι *απαιτήσεις* [Gerevini and Long, 2005] που καλύπτονται από το σύστημα είναι οι ακόλουθες: `:strips`, `:typing`, `:negative-preconditions`, `:fluents`, `:durative-actions`, `:derived-predicates` και `:timed-initial-literals`. Τέλος, μέσω του Γραφικού Περιβάλλοντος δίνεται η δυνατότητα οπτικοποίησης των παραγόμενων πλάνων, εφόσον αυτά συμμορφώνονται με το πρότυπο της PDDL+ [Fox and Long, 2002].

Τα υποσυστήματα Εισαγωγής / Φόρτωσης (Import / Save) και Εξαγωγής / Αποθήκευσης (Export / Save) προσφέρουν επιπλέον λειτουργικότητα που εξασφαλίζει τη συνεργασία με άλλα συστήματα και τη συμμόρφωση στα πρότυπα. Αυτές οι λειτουργίες περιλαμβάνουν την εξαγωγή των πεδίων ορισμού και των προβλημάτων σε PDDL, καθώς και την εισαγωγή τους από PDDL για σκοπούς οπτικοποίησης, τροποποίησης και συντήρησης. Η λειτουργικότητα αυτή αποδεσμεύει το σχεδιαστή από την απαίτηση να είναι γνώστης του συντακτικού της PDDL, και του δίνει τη δυνατότητα να διαχειριστεί πεδία ορισμού και προβλήματα με έναν περισσότερο διαισθητικό τρόπο από ότι προσφέρει το απλό κείμενο. Επιπλέον, οι λειτουργίες της φόρτωσης και της αποθήκευσης έχουν τη δυνατότητα, σε αντίθεση με τις λειτουργίες της εισαγωγής και εξαγωγής, να διατηρούν επιπλέον οπτικές πληροφορίες, όπως θέσεις και χρώματα των γραφικών στοιχείων. Για το σκοπό αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί έναν νέο τύπο αρχείου που ονομάζεται VLEPPO File Format (VFF). Οι λειτουργίες της αποθήκευσης και της φόρτωσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμες κατά τη διάρκεια ανάπτυξης ενός νέου πεδίου ορισμού ή προβλήματος, επειδή όσο αυτά δεν είναι πλήρως ορισμένα, υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες να μην είναι έγκυρα, επομένως αν επιχειρηθεί η εξαγωγή τους σε PDDL τα αντίστοιχα αρχεία θα έχουν ασυνέπειες.

Το υποσύστημα Σχεδιασμού Ενεργειών έχει αναπτυχθεί για να εξυπηρετήσει τη διασύνδεση με συστήματα σχεδιασμού ενεργειών τα οποία εκτελούν τη διαδικασία σχεδιασμού ενεργειών. Το υποσύστημα αυτό συμπεριλαμβάνει ένα πρόγραμμα – εξυπηρετούμενο για διαδικτυακές

υπηρεσίες (web service client) το οποίο δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιχειρήσει να αποκτήσει λύση στο πρόβλημα χρησιμοποιώντας συστήματα σχεδιασμού ενεργειών που έχουν υλοποιηθεί και προσφέρονται σαν διαδικτυακές υπηρεσίες. Επομένως ο χρήστης δεν περιορίζεται σε έναν μοναδικό αλγόριθμο αλλά έχει τη δυνατότητα να πειραματιστεί, ή ακόμα και να επιχειρήσει να λύσει το πρόβλημα με περισσότερους του ενός αλγόριθμους ταυτόχρονα χωρίς επιπλέον επιβάρυνση των διαθέσιμων πόρων στο μηχανήμα του, εφόσον αυτοί οι αλγόριθμοι δεν εκτελούνται τοπικά. Ωστόσο, για να αποφευχθεί η εξάρτηση της ολοκληρωμένης λειτουργίας του συστήματος από την ύπαρξη και τη διαθεσιμότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο, έχει προβλεφθεί η διασύνδεση και με τοπικό σύστημα σχεδιασμού ενεργειών.

5.3. Προσφερόμενη Σχεδιαστική Λειτουργικότητα και

Οπτικοποίηση

Στη συνέχεια περιγράφονται λεπτομερώς τα γραφικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν πεδία ορισμού και προβλήματα και επισημαίνονται οι αντιστοιχίες τους με στοιχεία της PDDL όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.2.2. Η κατανόηση της περιγραφής των στοιχείων υποστηρίζεται από τη χρήση γνωστών παραδειγμάτων σχεδιασμού ενεργειών.

5.3.1. Οντότητες και Συσχετίσεις στα Πεδία Ορισμού

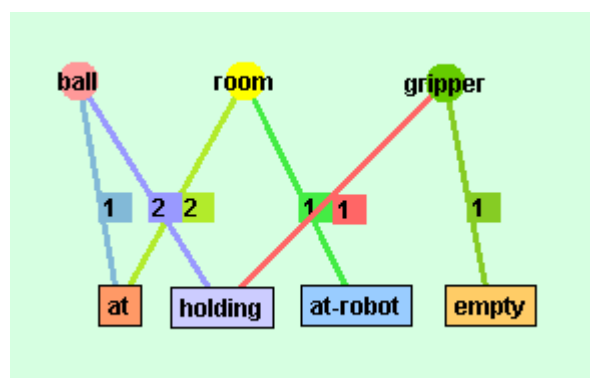
Το σύστημα VLEPPO χρησιμοποιεί το γνωστό και πολύ διαδεδομένο φορμαλισμό του μοντέλου Οντοτήτων – Συσχετίσεων (Entity – Relationship Model) [Chen, 1976], προσαρμοσμένο στο πρότυπο της PDDL, ώστε να περιγράψει τη δομή των πεδίων ορισμού και των προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Έτσι, οι κλάσεις (classes) σε ένα πεδίο ορισμού είναι οι οντότητες, ενώ τα κατηγορήματα είναι οι συσχετίσεις. Αυτά τα στοιχεία περιγράφονται οπτικά με κατάλληλα διακριτά γραφικά σχήματα και συνδέσεις μεταξύ τους.

Μια κλάση (class) στη PDDL, που υποδεικνύεται οπτικά με έναν χρωματισμένο κύκλο, αναπαριστά τον τύπο ενός αντικειμένου του πεδίου ορισμού ή μιας παραμέτρου ενός τελεστή. Με βάση μια κλάση μπορούν να δημιουργηθούν σχετικές παράμετροι στους τελεστές και αντικείμενα στα προβλήματα. Το χρώμα αυτών των παραμέτρων ή των αντικειμένων είναι ίδιο με το χρώμα της αρχικής κλάσης, ώστε να είναι δυνατή η άμεση αναγνώριση του τύπου τους.

Μία *συσχέτιση (relationship)*, η οποία αναπαρίσταται από ένα χρωματισμένο ορθογώνιο, αντιστοιχεί σε ένα κατηγορημα του πεδίου ορισμού στη PDDL, και χρησιμοποιείται για να περιγράψει συσχετίσεις μεταξύ δύο ή περισσότερων κλάσεων, ή ιδιότητες των κλάσεων, στην περίπτωση μοναδιαίων κατηγορημάτων. Κατά τη δημιουργία της, μία συσχέτιση θεωρείται ότι δεν έχει κανένα όρισμα. Όπως και με τις κλάσεις, το χρώμα της συσχέτισης είναι ενδεικτικό των εμφανίσεών της σε τελεστές ή προβλήματα.

Οι συσχετίσεις ενώνονται με τις κλάσεις με τη βοήθεια των *συνδέσεων (connections)*. Κάθε σύνδεση αντιστοιχεί σε ένα όρισμα της συσχέτισης, ενώ η κλάση καθορίζει τον τύπο του. Μια συσχέτιση μπορεί να έχει αυθαίρετο αριθμό ορισμάτων οποιουδήποτε τύπου, ενώ επιτρέπονται πολλαπλά ορίσματα του ίδιου τύπου. Η αρίθμηση των ορισμάτων γίνεται με αύξουσα σειρά κατά τη δημιουργία τους, και σημειώνεται πάνω στην αντίστοιχη σύνδεση. Η σειρά των ορισμάτων σε μια συσχέτιση λαμβάνεται υπόψη όταν το πεδίο ορισμού εξάγεται σε κώδικα PDDL.

Οι κλάσεις και οι συσχετίσεις του πεδίου ορισμού Gripper, μαζί με τις μεταξύ τους συνδέσεις, εμφανίζονται στην Εικόνα 45. Το πεδίο ορισμού αυτό έχει περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Συνοπτικά, στο παράδειγμα αυτό υπάρχει ένα ρομπότ με N λαβίδες το οποίο κινείται σε ένα χώρο K δωματίων τα οποία είναι όλα συνδεδεμένα μεταξύ τους έτσι ώστε το ρομπότ να μπορεί να μετακινηθεί από δωμάτιο σε δωμάτιο με μία κίνηση (μία ενέργεια). Υπάρχουν επίσης L αριθμημένες σφαίρες τις οποίες το ρομπότ μπορεί να μεταφέρει από την αρχική τους θέση σε κάποιον προορισμό κρατώντας μία σφαίρα ανά λαβίδα. Το πεδίο ορισμού Gripper συμπεριλαμβάνει τέσσερις συσχετίσεις: *at*, η οποία καθορίζει ότι κάποια σφαίρα βρίσκεται σε κάποιο δωμάτιο, *holding*, η οποία χρησιμοποιείται για να δείξει ότι κάποια λαβίδα κρατάει κάποια σφαίρα, *at-robot*, που υποδεικνύει τη θέση του ρομπότ, και *empty*, που δηλώνει ότι κάποια λαβίδα δεν κρατάει καμία σφαίρα.



Εικόνα 45. Οι κλάσεις και οι συσχετίσεις του πεδίου ορισμού Gripper.

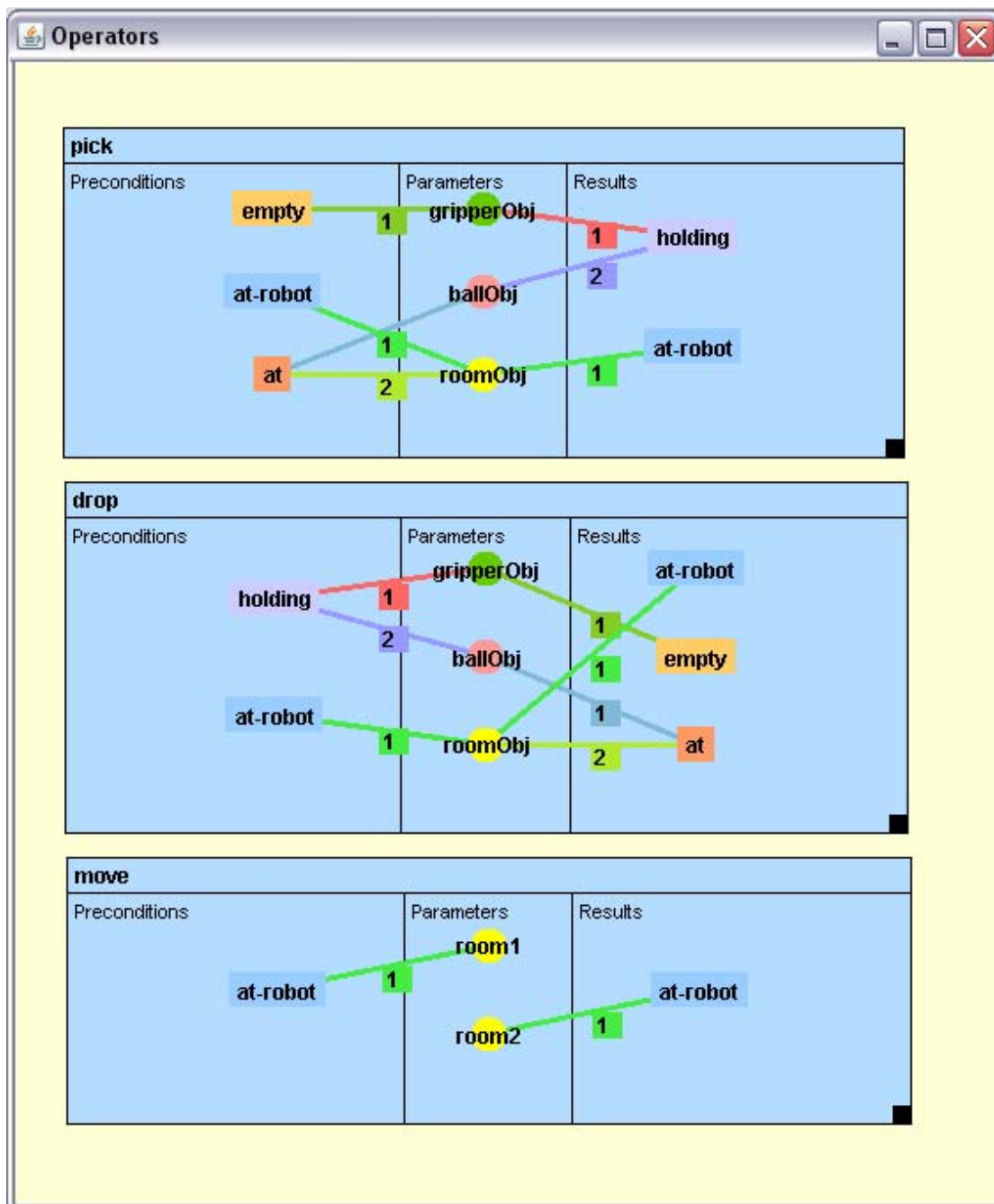
Τα προαναφερθέντα στοιχεία - οι κλάσεις, οι συσχετίσεις και οι μεταξύ τους συνδέσεις - όταν συνδυάζονται μαζί σχηματίζουν το μοντέλο Οντοτήτων - Συσχετίσεων των δεδομένων του εκάστοτε πεδίου ορισμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι αν και υπάρχουν διάφοροι διαθέσιμοι φορμαλισμοί που μπορούν να περιγράψουν τη δομή των δεδομένων ενός πεδίου ορισμού, όπως η UML [UML], το μοντέλο Οντοτήτων – Συσχετίσεων προτιμήθηκε ανάμεσά τους, καθώς εκτιμάται ότι προσεγγίζει πιο φυσικά τη δομή των δεδομένων που υπονοείται από τη PDDL.

5.3.2. Αναπαράσταση Τελεστών

Οι τελεστές στο VLEPPO έχουν σαφή αντιστοιχία με τους τελεστές (actions) στην PDDL, οι οποίοι επιτρέπουν τις μεταβάσεις μεταξύ διαδοχικών καταστάσεων. Τα ουσιαστικά και απαραίτητα στοιχεία του ορισμού τους περιλαμβάνουν τις *παραμέτρους* τους, τις *προϋποθέσεις*, δηλαδή το σύνολο των κατηγορημάτων που πρέπει να ισχύουν ώστε να μπορεί να εφαρμοσθεί ο τελεστής, και τα *αποτελέσματα*, δηλαδή το σύνολο των κατηγορημάτων που ισχύουν μετά την εφαρμογή του τελεστή. Εναλλακτικά, αλλά ισοδύναμα, η κατάσταση του κόσμου μετά την εφαρμογή του τελεστή μπορεί να περιγραφεί όχι ρητά αλλά μέσω των κατηγορημάτων που προστίθενται σε αυτή ή αφαιρούνται από αυτή, δηλαδή μέσω *λίστών προσθήκης / διαγραφής*.

Οι τελεστές αναπαρίστανται γραφικά στο Σχεδιαστή Τελεστών (Operator Editor) με ορθογώνια, το καθένα από τα οποία χωρίζεται σε τρεις στήλες που περιέχουν τις προϋποθέσεις, τις παραμέτρους και τα αποτελέσματα του κάθε τελεστή. Οι προϋποθέσεις και οι τελεστές δημιουργούνται από τα αντίστοιχα κατηγορήματα που έχουν δημιουργηθεί στον Σχεδιαστή Οντολογιών (Ontology Editor), ενώ οι παράμετροι δημιουργούνται από τις αντίστοιχες κλάσεις. Η ύπαρξη κάποια σύνδεσης στην οντολογία επιτρέπει στον χρήστη να προσθέσει αντίστοιχες συνδέσεις και στους τελεστές, ενώ σε ένα πλήρως ορισμένο πεδίο, για κάθε σύνδεση μεταξύ συσχέτισης και κλάσης που υπάρχει στην οντολογία, πρέπει να υπάρχει αντίστοιχη σύνδεση σε κάθε εμφάνιση της συγκεκριμένης συσχέτισης στους τελεστές. Επιπλέον στοιχεία που μπορούν να προστεθούν στους τελεστές θα συζητηθούν με λεπτομέρεια στην παράγραφο για τα εξελιγμένα χαρακτηριστικά.

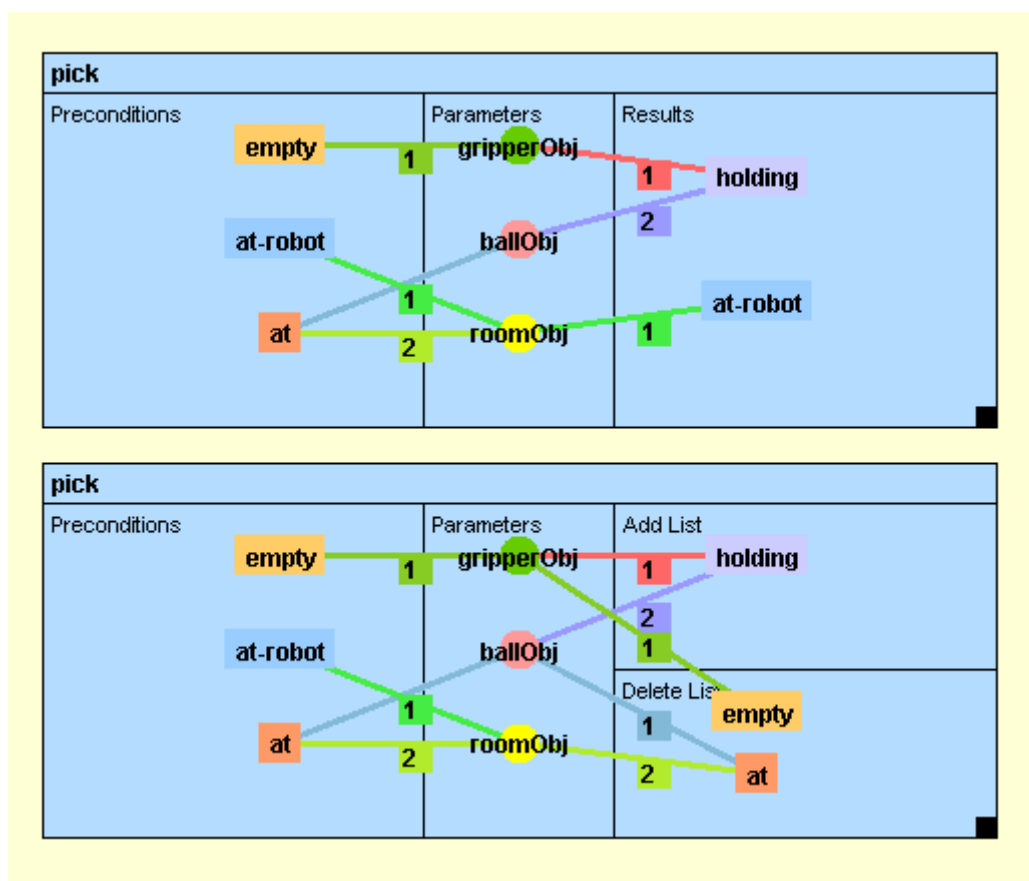
Το πεδίο ορισμού Gripper περιλαμβάνει τρεις τελεστές, που φαίνονται στην Εικόνα 46: *move*, που επιτρέπει το ρομπότ να κινείται μεταξύ των δωματίων, *pick*, που επιτρέπει σε μια λαβίδα του ρομπότ να σηκώσει και να κρατήσει μια σφαίρα, και *drop*, που είναι ο αντίστροφος του pick και χρησιμοποιείται όταν μια λαβίδα απελευθερώνει μια σφαίρα.



Εικόνα 46. Οι τελεστές του πεδίου ορισμού Gripper (προβολή προϋποθέσεων / αποτελεσμάτων).

Ο προεπιλεγμένος τρόπος προβολής για κάθε τελεστή είναι η *προβολή προϋποθέσεων / αποτελεσμάτων* (*preconditions / results view*). Σε αυτόν τον τύπο προβολής η στήλη στα αριστερά δείχνει τις προϋποθέσεις του τελεστή, ενώ η στήλη στα δεξιά τα αποτελέσματά του. Ωστόσο, επειδή σε ορισμένες περιπτώσεις αυτός ο τρόπος προβολής δεν είναι κατατοπιστικός ή επιθυμητός, το σύστημα προσφέρει έναν ακόμα τρόπο προβολής πιστότερο στον τυπικό ορισμό της PDDL, την *προβολή λιστών προσθήκης / διαγραφής* (*add / delete lists view*). Αν επιλεγεί αυτός ο τύπος προβολής, η στήλη στα αριστερά δείχνει, όπως και πριν, τις προϋποθέσεις του τελεστή, η στήλη στα δεξιά όμως είναι χωρισμένη σε δύο τμήματα, το ανώτερο που περιέχει τα

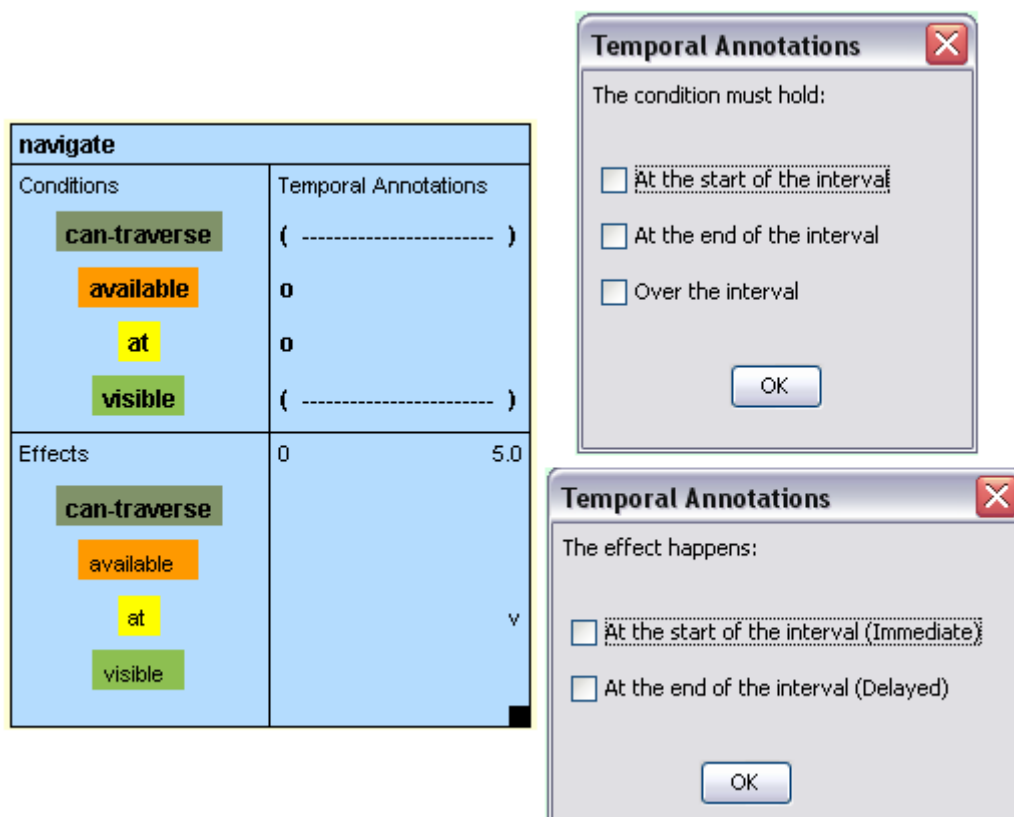
κατηγορήματα που θα προστεθούν στην κατάσταση του κόσμου, και το κατώτερο που περιέχει τα κατηγορήματα που θα αφαιρεθούν από την κατάσταση του κόσμου μετά την εφαρμογή του τελεστή. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ των δύο τρόπων προβολής ανά πάσα στιγμή, ωστόσο η επεξεργασία του τελεστή είναι δυνατή μόνο στην προβολή προϋποθέσεων / αποτελεσμάτων. Για καλύτερη κατανόηση των δύο τρόπων προβολών των τελεστών επιλέχθηκε και παρουσιάζεται στην Εικόνα 47 ο τελεστής *pick* του πεδίου ορισμού Gripper.



Εικόνα 47. Οι δύο προβολές του τελεστή Pick για το πεδίο ορισμού Gripper.

Στα νεότερα πεδία ορισμού είναι πολύ συχνοί οι τελεστές που έχουν κάποια διάρκεια, επομένως το σύστημα διαθέτει και έναν τρίτο τρόπο προβολής ειδικά για τελεστές διάρκειας (durative actions). Ο ορισμός ενός τέτοιου τελεστή, εκτός από τα βασικά στοιχεία των παραμέτρων, προϋποθέσεων και αποτελεσμάτων, περιλαμβάνει την διάρκεια του τελεστή καθώς και χρονικές σημάνσεις (temporal annotations) στις προϋποθέσεις και τα αποτελέσματά του. Κατά αντιστοιχία με τον ορισμό της PDDL, οι χρονικές σημάνσεις για τις προϋποθέσεις μπορεί απαιτούν κάποια προϋπόθεση να ισχύει στην αρχή, στο τέλος ή καθ' όλη τη διάρκεια του διαστήματος που διαρκεί ο τελεστής, ενώ οι χρονικές σημάνσεις στα αποτελέσματα τα χωρίζουν σε άμεσα και καθυστερημένα, δηλαδή καθορίζουν αν λαμβάνουν χώρα στην αρχή ή στο τέλος

της διάρκειας του τελεστή. Ένας τελεστής σε προβολή διαρκείας, μαζί με τα στοιχεία του γραφικού περιβάλλοντος για ορισμό των χρονικών σημάνσεων φαίνεται στην Εικόνα 48.

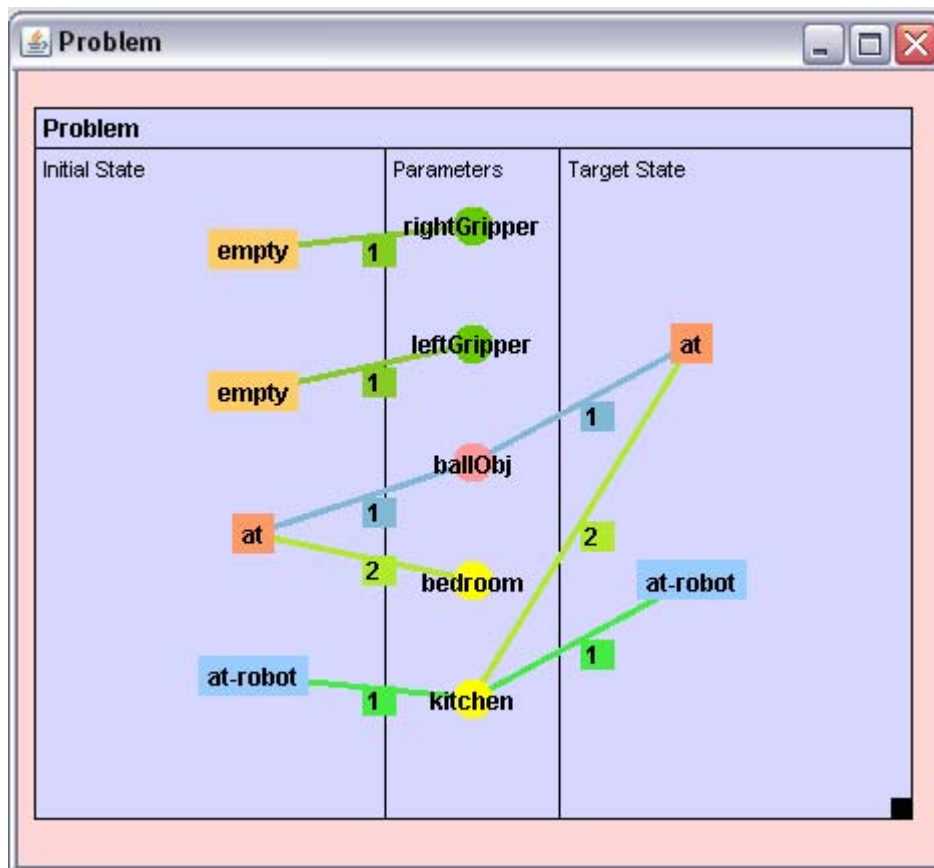


Εικόνα 48. Ένας τελεστής διαρκείας και οι διάλογοι για τις χρονικές σημάνσεις.

5.3.3. Αναπαράσταση Προβλημάτων

Ένα πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών μπορεί να οριστεί με βάση κάποιο πεδίο ορισμού, καθορίζοντας μια αρχική και μια τελική κατάσταση, και αναζητώντας την αλληλουχία των ενεργειών, οι οποίες αν εφαρμοσθούν διαδοχικά στην αρχική κατάσταση θα παράγουν την τελική κατάσταση. Η γραφική αναπαράσταση ενός προβλήματος στο Σχεδιαστή Προβλημάτων (Problems Editor) του VLEPPO μοιάζει αρκετά με την γραφική αναπαράσταση των τελεστών που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, αλλά διαφέρει σημασιολογικά. Τα πρόβλημα αναπαρίσταται από ένα ορθογώνιο με τρεις στήλες, η αριστερή από τις οποίες περιέχει τα κατηγορήματα της αρχικής κατάστασης, η δεξιά τα κατηγορήματα της τελικής κατάστασης και η μεσαία τα αντικείμενα που συμμετέχουν στον ορισμό του προβλήματος. Όπως και με τους τελεστές, κατηγορήματα, αντικείμενα και συνδέσεις μπορούν να δημιουργηθούν με βάση τα αντίστοιχα στοιχεία στον Σχεδιαστή Οντολογιών.

Ένα παράδειγμα προβλήματος βασισμένο στο πεδίο ορισμού Gripper παρουσιάζεται στην Εικόνα 49. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα υπάρχουν δύο δωμάτια (Bedroom, Kitchen), μία σφαίρα (Ball1) και το ρομπότ διαθέτει δύο λαβίδες (rightGripper, leftGripper). Η αρχική κατάσταση του προβλήματος καθορίζει την θέση του ρομπότ και της σφαίρας, που είναι το δωμάτιο Kitchen και το δωμάτιο Bedroom, αντίστοιχα, καθώς και ότι οι δύο λαβίδες είναι άδειες (empty). Η τελική κατάσταση απαιτεί η σφαίρα και το ρομπότ να βρεθούν και τα δύο στο δωμάτιο Kitchen.



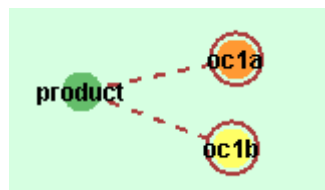
Εικόνα 49. Ένα πρόβλημα για το πεδίο ορισμού Gripper.

5.3.4. Εξελεγμένα Χαρακτηριστικά

Η υποστήριξη των βασικών χαρακτηριστικών της PDDL, όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες είναι επαρκής για την περιγραφή και αναπαράσταση ενός μεγάλου αριθμού απλών πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Καθώς όμως ο σχεδιασμός ενεργειών είναι ένα πεδίο που αναπτύσσεται συνεχώς, προκύπτουν νέες προκλήσεις με αποτέλεσμα να υπάρχει ανάγκη για αναπαράσταση πιο σύνθετων εννοιών. Για αυτόν το λόγο η γλώσσα PDDL έχει επεκταθεί στις νεότερες εκδόσεις της ώστε να συμπεριλάβει πολλά νέα στοιχεία χωρισμένα σε υποσύνολα *απαιτήσεων*. Το σύστημα VLEPPO επεκτάθηκε επίσης, ώστε

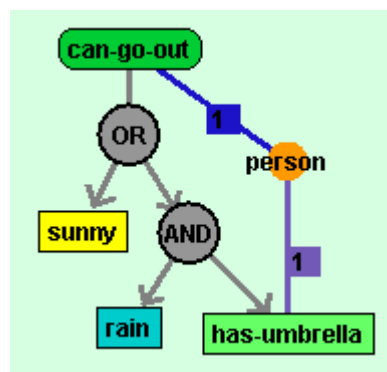
να συμπεριλάβει τα περισσότερα από αυτά τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται ευρέως στα σύγχρονα προβλήματα σχεδιασμού ενεργειών.

Ένα από αυτά τα εξελιγμένα χαρακτηριστικά που προσφέρονται από το σύστημα, το οποίο έχει σαφή αντιστοιχία στην PDDL είναι οι σταθερές (*constants*), οι οποίες αναπαρίστανται γραφικά με παρόμοιο τρόπο με τις κλάσεις, αλλά με κόκκινο περίγραμμα ώστε να ξεχωρίζουν από αυτές (Εικόνα 50). Οι σταθερές μπορεί να είναι κάποιου τύπου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους τελεστές και στα προβλήματα στην θέση των παραμέτρων και των αντικειμένων, αντίστοιχα.



Εικόνα 50. Ένα παράδειγμα δύο σταθερών του τύπου “product”.

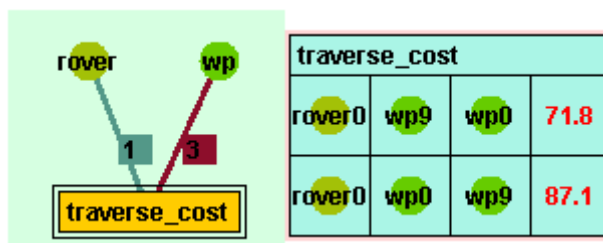
Ένα *παραγόμενο κατηγορήμα* (*derived predicate*) είναι ένα εξελιγμένο χαρακτηριστικό της PDDL που αναπαρίσταται οπτικά σαν ένα σύνολο σχεδιαστικών στοιχείων στο VLEPPO, τα οποία περιλαμβάνουν ένα AND/OR δένδρο [Nilsson, 1998], που συμπυκνώνει τους κανόνες με τους οποίους ένα παραγόμενο κατηγορήμα παράγεται από άλλα κατηγορήματα. Το δένδρο αποτελείται από δυαδικούς κόμβους AND και OR και μοναδιαίους κόμβους NOT, καθένα από τα ορίσματα των οποίων μπορεί να είναι κάποιος άλλος κόμβος ή οποιοδήποτε κατηγορήμα, επομένως τα δένδρα μπορεί να γίνουν όσο πολύπλοκα επιθυμεί ο χρήστης. Ένα παράδειγμα παραγόμενου κατηγορήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 51, το οποίο δηλώνει ότι κάποιος μπορεί να βγει έξω αν ο καιρός είναι ηλιόλουστος, ή εάν βρέχει και υπάρχει διαθέσιμη κάποια ομπρέλα.



Εικόνα 51. Παράδειγμα παραγόμενου κατηγορήματος.

Ανάμεσα στα εξελεγμένα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι η δυνατότητα να υποδείξει ο χρήστης ότι κάποιο κατηγορημα είναι πάντα αληθές (timeless), έτσι ώστε η ιδιότητα αυτή να χρησιμοποιηθεί πιθανώς από τα συστήματα σχεδιασμού. Αυτή η δυνατότητα απαιτεί έναν μεγάλο αριθμό ελέγχων εγκυρότητας οι οποίοι θα αναλυθούν στην ανάλογη ενότητα.

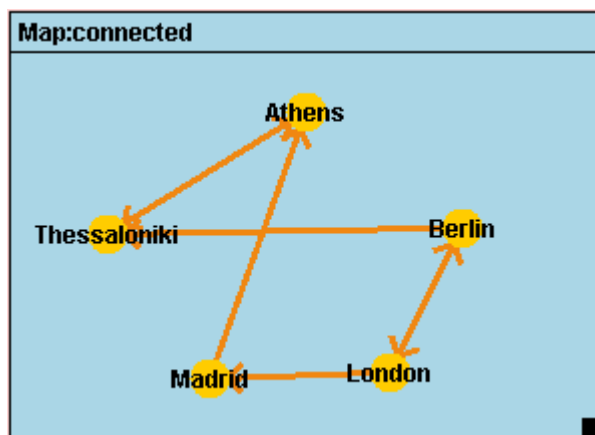
Άλλο ένα χαρακτηριστικό της PDDL που υλοποιήθηκε στο VLEPPO είναι οι αριθμητικές εκφράσεις. Για τον σωστό ορισμό και λειτουργία των αριθμητικών εκφράσεων απαιτείται η χρήση ενός συνόλου στοιχείων, ανάμεσα στα οποία περιλαμβάνονται οι συναρτήσεις στον Σχεδιαστή Οντολογιών, καθώς και συνθήκες (conditions) ή αναθέσεις (assignments) στους τελεστές στον Σχεδιαστή Τελεστών. Επιπλέον, για κάθε συνάρτηση που ο χρήστης εισάγει στον Σχεδιαστή Οντολογιών, ένα αντίστοιχο σχήμα εμφανίζεται στον Σχεδιαστή Προβλημάτων, το οποίο χρησιμοποιείται κατά τον ορισμό προβλημάτων ώστε να δηλώσει τις αρχικές τιμές της συνάρτησης στο συγκεκριμένο πρόβλημα, καθώς αυτές δεν αποτελούν μέρος της περιγραφής του πεδίου ορισμού, αλλά αποτελούν μέρος του προβλήματος. Ως παράδειγμα παρουσιάζεται μια συνάρτηση από το πεδίο ορισμού Rover [IPC-5], η οποία συνδέει δύο σημεία με το κόστος για ένα όχημα να διανύσει την απόσταση μεταξύ τους. Ο ορισμός της συνάρτησης στον Σχεδιαστή Οντολογιών, καθώς και κάποιες ενδεικτικές τιμές στον Σχεδιαστή Προβλημάτων παρουσιάζονται στην Εικόνα 52.



Εικόνα 52. Παράδειγμα συνάρτησης και ορισμού αρχικών τιμών.

Τέλος, ένα ιδιαίτερα χρήσιμο στοιχείο στον σχεδιασμό προβλημάτων είναι οι χάρτες (maps). Οι χάρτες αναπαριστούν ένα ιδιαίτερο είδος συσχετίσεων που διαθέτουν ακριβώς δύο ορίσματα του ίδιου τύπου, και αναμένεται να έχουν πολλά στιγμιότυπα στην αρχική κατάσταση ενός προβλήματος. Το κίνητρο για τον ορισμό ενός τόσο ειδικού στοιχείου προέκυψε από την παρατήρηση ότι συσχετίσεις με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά είναι πολύ κοινές στον ορισμό προβλημάτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο στοιχείο της PDDL το οποίο αντιπροσωπεύουν οι χάρτες, γι' αυτόν τον λόγο η χρήση τους είναι προαιρετική, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα διατήρησης πλήρους συμβατότητας με τη γλώσσα όταν κάτι τέτοιο απαιτείται. Οι χάρτες εκφράζουν ένα τμήμα της αρχικής κατάστασης ενός προβλήματος με πιο συμπαγή και ευνόητο τρόπο ώστε να γίνει πιο εύκολα κατανοητό. Για κάθε συσχέτιση

στον Σχεδιαστή Οντολογιών που έχει τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, μπορεί να δημιουργηθεί ένας αντίστοιχος χάρτης στον Σχεδιαστή Προβλημάτων, ενώ στον κάθε χάρτη μπορούν να εισαχθούν αντικείμενα και να δημιουργηθούν συνδέσεις μεταξύ τους. Η έννοια της σύνδεσης ανάμεσα σε δύο αντικείμενα στους χάρτες είναι διαφορετική από την έννοια της σύνδεσης ανάμεσα σε μια συσχέτιση και μια κλάση, αφού η κάθε σύνδεση σε ένα χάρτη αναπαριστά ένα στιγμιότυπο (instance) της συσχέτισης που αντιπροσωπεύει ο χάρτης. Ένα παράδειγμα ενός χάρτη φαίνεται στην Εικόνα 53.



Εικόνα 53. Ένας χάρτης για τη συσχέτιση connected(C1, C2).

5.3.5. Αναπαράσταση Πλάνων

Τα πλάνα που εξάγονται από το σύστημα παρουσιάζονται στον χρήστη σε παράθυρο διαλόγου, μαζί με στατιστικά στοιχεία που παράγονται από τον σχεδιαστή ενεργειών, όπως χρονική διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού και πλήθος επιπέδων. Ωστόσο, για καλύτερη κατανόηση, τα πλάνα οπτικοποιούνται με μια τροποποιημένη μορφή δικτύων ενεργειών. Στα δίκτυα ενεργειών, τα οποία περιγράφονται εκτενέστερα στην Ενότητα 2.4, οι ενέργειες αναπαρίστανται οπτικά σαν ένα πλαίσιο που περιέχει το όνομά τους, ενώ κάτω από το πλαίσιο εμφανίζεται στα αριστερά η λίστα προϋποθέσεων και στα δεξιά η λίστα αποτελεσμάτων. Για καλύτερη εκμετάλλευση του χώρου, το σύστημα VLEPPO οπτικοποιεί τα πλάνα με μια τροποποιημένη μορφή, εμφανίζοντας την λίστα προϋποθέσεων πάνω από την ενέργεια και την λίστα αποτελεσμάτων κάτω από την ενέργεια. Επιπλέον, το πλάνο παρουσιάζεται δομημένο σε επίπεδα, στις περιπτώσεις που είναι μερικώς διατεταγμένο, με το κάθε επίπεδο να αντιπροσωπεύεται από διαφορετική στήλη. Μια παρόμοια προσέγγιση για την αναπαράσταση των πλάνων υιοθετείται από το σύστημα PORSCE, ωστόσο σε εκείνη την περίπτωση παρουσιάζονται οπτικά πρόσθετα στοιχεία τα οποία είναι ιδιαίτερα στην περίπτωση των

διαδικτυακών υπηρεσιών, όπως μέτρα ποιότητας και αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των ατομικών υπηρεσιών.

Παραδείγματα οπτικοποιημένων πλάνων θα δοθούν στην ενότητα των παραδειγμάτων χρήσης (Ενότητα 5.6), μαζί με τα αντίστοιχα πεδία ορισμού και προβλήματα των οποίων αποτελούν λύση.

5.3.6. Συντακτικός Έλεγχος και Έλεγχος Εγκυρότητας

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό είναι οι έλεγχοι σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια σχεδίασης και δημιουργίας πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Οι δομές που συμπεριλαμβάνονται σε ένα πεδίο ορισμού πρέπει να ελεγχθούν, ώστε να ανιχνευθούν τυχόν ασυνέπειες μεταξύ τους, ενώ κάθε πρόβλημα πρέπει να αντιπαρατεθεί με το αντίστοιχο πεδίο ορισμού ώστε να εξασφαλιστεί η συμφωνία τους. Επιπλέον, η πληρότητα των πεδίων ορισμού και των προβλημάτων, δηλαδή το κατά πόσο ο χρήστης έχει ορίσει σωστά όλα τα στοιχεία που είναι αναγκαίο να οριστούν, πρέπει να ελέγχονται πριν την μετάφρασή τους σε κώδικα PDDL.

Το σύστημα VLEPPO επιχειρεί να ανιχνεύσει τις ασυνέπειες τη στιγμή που αυτές προκύπτουν και να ειδοποιήσει τον χρήστη, έτσι ώστε να μην επιτρέπεται η διάδοση των ασυνεπειών στο εν λόγω πεδίο ορισμού ή πρόβλημα. Στο υπόλοιπο της ενότητας αυτής θα περιγραφούν οι διαδικασίες ελέγχου που συμπεριλαμβάνονται στο σύστημα με τη βοήθεια κατατοπιστικών παραδειγμάτων.

Στις περιπτώσεις που ο χρήστης επιχειρεί να εισάγει μια νέα σύνδεση (connection) μεταξύ ενός κατηγορήματος και μιας παραμέτρου ενός τελεστή, ή μεταξύ ενός κατηγορήματος και ενός αντικειμένου ενός προβλήματος, πρέπει να ελεγχθεί η ισχύς ορισμένων προϋποθέσεων, όπως της ύπαρξης αντίστοιχης σύνδεσης στην οντολογία. Εκτός από την ύπαρξη της σύνδεσης, πρέπει να συμφωνούν οι τύποι της κλάσης και της παραμέτρου, στην περίπτωση του τελεστή, ή της κλάσης και του αντικειμένου, στην περίπτωση του προβλήματος. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση ο χρήστης ενημερώνεται ώστε να διορθωθεί η ασυνέπεια.

Όσον αφορά τα κατηγορήματα που είναι εξ' ορισμού πάντα αληθή (timeless predicates), ή ανθεκτικά στο χρόνο, όπως αναφέρονται στην παρούσα διατριβή, είναι προφανές ότι μπορούν να εμφανιστούν μόνο στις προϋποθέσεις κάποιου τελεστή και όχι στις λίστες προσθήκης / διαγραφής, εφόσον δεν μπορούν ούτε να προστεθούν ούτε να αφαιρεθούν από την κατάσταση του κόσμου, γιατί κάτι τέτοιο θα ήταν αντίθετο με τον ορισμό τους. Ο μηχανισμός ελέγχου του

συστήματος στην περίπτωση τέτοιων κατηγορημάτων λειτουργεί σε ποικίλες περιπτώσεις: αν ο χρήστης επιχειρήσει να εισάγει ένα τέτοιο κατηγορημα στις προϋποθέσεις ενός τελεστή, τότε ο μηχανισμός ελέγχου του συστήματος αυτομάτως θα το προσθέσει και στα αποτελέσματα του τελεστή, εφόσον αυτός είναι ο μόνος τρόπος να μην επηρεαστούν καθόλου οι λίστες προσθήκης / διαγραφής και να μην συμπεριλάβουν το κατηγορημα αυτό. Από την άλλη μεριά, αν ο χρήστης υποδείξει ένα κατηγορημα ως πάντα αληθές, ο μηχανισμός ελέγχου θα επιθεωρήσει όλες τις λίστες προσθήκης / διαγραφής όλων των τελεστών του πεδίου ορισμού ώστε να επιβεβαιώσει ότι το κατηγορημα δεν εμφανίζεται σε καμία τέτοια λίστα, και δεν θα επιτρέψει την λειτουργία αυτή σε αντίθετη περίπτωση. Τέλος, ο μηχανισμός ελέγχου θα αποτρέψει τους χρήστες από το να εισάγουν κατηγορήματα ανθεκτικά στο χρόνο στα προβλήματα, εφόσον κάτι τέτοιο δεν επιτρέπεται.

Άλλη μια περίπτωση, όπου δρα ο μηχανισμός ελέγχου είναι οι σταθερές (constants), οι οποίες ελέγχονται ότι έχουν συσχετισθεί με κάποια κλάση (τύπο) πριν χρησιμοποιηθούν σε κάποιον τελεστή ή πρόβλημα, ενώ στη συνέχεια, όπως και στην περίπτωση των συνδέσεων, ελέγχεται η συμφωνία αυτού του τύπου με τους τύπους των παραμέτρων του τελεστή ή των αντικειμένων του προβλήματος αντίστοιχα.

5.4. Λειτουργίες Εισαγωγής και Εξαγωγής

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η διασύνδεση του συστήματος με την γλώσσα PDDL μέσω των λειτουργιών εισαγωγής και εξαγωγής, αλλά και οι λειτουργίες φόρτωσης και αποθήκευσης οι οποίες δεν εξυπηρετούν την διασύνδεση με άλλα συστήματα αλλά διευκολύνουν την προσωρινή αποθήκευση κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού.

5.4.1. Εξαγωγή σε PDDL

Η συνεργασία με εξωτερικά συστήματα και η αυξημένη ευελιξία στην ολοκλήρωσή τους δεν θα ήταν δυνατές χωρίς την συμμόρφωση με τη πρότυπη γλώσσα περιγραφής πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών, την PDDL. Όλα τα οπτικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση του πεδίου ορισμού και του προβλήματος, όπως κατηγορήματα και τελεστές, μαζί με τα σχόλια που μπορεί να έχει συμπεριλάβει ο χρήστης, εξάγονται σε ένα αρχείο PDDL. Το αρχείο αυτό επαυξάνεται αυτόματα με τις κατάλληλες απαιτήσεις (requirements) στις οποίες εντάσσονται τα στοιχεία που το VLEPPO ανιχνεύει ότι έχουν χρησιμοποιηθεί κατά την περιγραφή του πεδίου ορισμού. Η απαίτηση που αφορά την χρήση ή

όχι τύπων (:typing) αποτελεί εξαίρεση, εφόσον δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εκφράσει την προτίμησή του. Στο υπόλοιπο της παραγράφου δίνονται ορισμένες λεπτομέρειες για την εξαγωγή σε PDDL που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

Μια κλάση στο VLEPPO αντιπροσωπεύει πάντα την ίδια έννοια, δηλαδή τον τύπο ενός αντικειμένου ή μιας παραμέτρου, ωστόσο κατά την εξαγωγή σε PDDL, μπορούν να ακολουθηθούν δύο διαφορετικές εναλλακτικές προσεγγίσεις, ανάλογα με την προτίμηση του χρήστη σχετικά με την χρήση ή όχι τύπων, όπως προαναφέρθηκε, επομένως από κάθε πεδίο ορισμού μπορούν να εξαχθούν δύο διαφορετικά αρχεία PDDL. Στην περίπτωση που γίνεται χρήση τύπων και δηλώνεται η απαίτηση *:typing*, το όνομα κάθε κλάσης συμπεριλαμβάνεται στην δομή (:types) του πεδίου ορισμού και για κάθε αντικείμενο, παράμετρο και σταθερά είναι απαραίτητο να δηλώνεται ο τύπος της. Στην αντίθετη περίπτωση, οι κλάσεις αντιμετωπίζονται σαν μοναδιαία κατηγορήματα ανθεκτικά στο χρόνο (timeless unary predicates). Επιπλέον, για κάθε παράμετρο ενός τελεστή στο γραφικό περιβάλλον, πρέπει να προστεθεί μια προϋπόθεση που αφορά τον τύπο της παραμέτρου στον τελεστή κατά την μετάφρασή του σε PDDL. Αντίστοιχα, για κάθε αντικείμενο ενός προβλήματος, ένα νέο κατηγορήμα που αφορά τον τύπο του αντικειμένου πρέπει να προστεθεί στην αρχική κατάσταση.

Κατά την εξαγωγή του πεδίου ορισμού, περισσότερα από ένα στοιχεία του Σχεδιαστή Οντολογιών συνδυάζονται, ώστε να σχηματίσουν τις δομές του πεδίου ορισμού στο συντακτικό που επιβάλλει η γλώσσα PDDL. Για παράδειγμα, οι συσχετίσεις, οι συνδέσεις, και (αν χρησιμοποιούνται τύποι) οι κλάσεις συνδυάζονται για να σχηματίσουν την δομή ενός κατηγορήματος. Παρομοίως σχηματίζονται οι συναρτήσεις και τα παραγόμενα κατηγορήματα. Η εξαγωγή των τελεστών είναι λίγο πιο περίπλοκη, εφόσον πρέπει να συνδυαστεί ένας αριθμός στοιχείων από τον Σχεδιαστή Οντολογιών με κάποια στοιχεία του Σχεδιαστή Τελεστών.

Η εξαγωγή του προβλήματος μοιάζει αρκετά με την εξαγωγή των τελεστών σαν διαδικασία, ωστόσο τα προβλήματα αποθηκεύονται εξ' ορισμού σε διαφορετικά αρχεία PDDL με δική τους δομή, έτσι ώστε ένα πεδίο ορισμού να μπορεί να συσχετισθεί με πολλά προβλήματα. Αν έχει γίνει η χρήση χαρτών (maps), πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε η πληροφορία που εκφράζουν να ενσωματωθεί σωστά στην αρχική κατάσταση του προβλήματος. Επιπλέον, αν έχουν ορισθεί συναρτήσεις, οι αρχικές τιμές τους που ορίζονται στον Σχεδιαστή Προβλημάτων πρέπει να συμπεριληφθούν στην κατάλληλη δομή στον ορισμό του προβλήματος.

5.4.2. Εισαγωγή από PDDL

Άλλη μια δυνατότητα που προσφέρει το σύστημα VLEPPO όσον αφορά τη διασύνδεσή του με τα τρέχοντα πρότυπα είναι η εισαγωγή πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών από αρχεία PDDL και η οπτικοποίησή τους, με απώτερο σκοπό την ευκολότερη κατανόηση, συντήρηση και τροποποίησή τους. Ωστόσο, η εισαγωγή από αρχεία PDDL υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς. Για τα πεδία ορισμού και τα προβλήματα που χρησιμοποιούν τύπους η διαδικασία της εισαγωγής από PDDL είναι σχετικά απλή, αφού ο κάθε τύπος απεικονίζεται στο σύστημα σαν κλάση. Όταν όμως δεν γίνεται χρήση τύπων αυτή η διαδικασία αποκτά αυξημένη πολυπλοκότητα χωρίς να υπάρχουν εγγυήσεις ότι θα είναι απολύτως επιτυχής σε όλες τις περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη σημασιολογικής πληροφορίας σχετικά με το πεδίο ορισμού, αφού μόνο η συντακτική πληροφορία δεν είναι πάντα αρκετή για τον διαχωρισμό των κατηγορημάτων που έχουν την θέση τύπων και πρέπει να αναπαρασταθούν σαν κλάσεις από τα απλά μοναδιαία κατηγορήματα.

Στο VLEPPO έχει αναπτυχθεί ένα υποσύστημα το οποίο εισάγει επιτυχώς τα πεδία ορισμού που χρησιμοποιούν τύπους, όπως και αυτά που δεν χρησιμοποιούν, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Για να είναι δυνατή η εισαγωγή πεδίων ορισμού στα οποία δεν γίνεται χρήση τύπων, η προσέγγιση που ακολουθείται από το VLEPPO κάνει χρήση μιας βασικής ιδιότητας που έχουν οι τύποι όταν αναπαρίστανται στην PDDL μοναδιαία κατηγορήματα ανθεκτικά στο χρόνο (timeless unary predicates): ότι δεν μπορούν να εμφανιστούν στις λίστες προσθήκης / διαγραφής κάποιου τελεστή. Επομένως, από όλα τα μοναδιαία κατηγορήματα που είναι υποψήφια να μετατραπούν σε τύπους, το σύστημα αποδέχεται ως τέτοιους μόνο όσα δεν περιέχονται σε καμία λίστα προσθήκης / διαγραφής κάποιου τελεστή. Στην συνέχεια, μετατρέποντας αυτά σε τύπους, μπορεί να ακολουθηθεί η διαδικασία εισαγωγής που εφαρμόζεται στα αρχεία PDDL που χρησιμοποιούν τύπους. Η παραπάνω διαδικασία είναι επιτυχής μόνο κάτω από την προϋπόθεση ότι το πεδίο ορισμού είναι πλήρες και δεν υπάρχουν απλά μοναδιαία κατηγορήματα τα οποία δεν εμφανίζονται σε κανέναν τελεστή, τα οποία θα μεταφραστούν λανθασμένα σε τύπους. Ωστόσο, ακόμα και στις περιπτώσεις που η διαδικασία δεν είναι απόλυτα επιτυχής, η απαιτούμενη παρέμβαση του χρήστη είναι σημαντικά λιγότερη από την προσπάθεια που θα απαιτούσε η μοντελοποίηση του πεδίου ορισμού από την αρχή.

5.4.3. Λειτουργίες αποθήκευσης και ανάκτησης

Η εισαγωγή από PDDL και η εξαγωγή σε PDDL που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες είναι ουσιαστικές λειτουργίες του συστήματος καθώς παρέχουν την απαραίτητη τυπική (formal) περιγραφή των πεδίων ορισμού και των προβλημάτων, και επιτρέπουν την επικοινωνία και την συνεργασία με άλλα συστήματα που συμμορφώνονται με τα πρότυπα του χώρου του σχεδιασμού ενεργειών. Ωστόσο, η PDDL δεν έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης οπτικής πληροφορίας, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις είναι σημαντική, εφόσον ο χρήστης ενδέχεται να έχει επενδύσει πολύτιμο χρόνο ώστε να προσαρμόσει τα οπτικά στοιχεία του συστήματος, φέρνοντάς τα σε μια κατάσταση που ευνοεί την κατανόηση. Επιπλέον, λόγω των ελέγχων εγκυρότητας, η PDDL δεν ενδείκνυται για την αποθήκευση πεδίων ορισμού και προβλημάτων των οποίων η σχεδίαση δεν έχει ολοκληρωθεί και δεν μπορούν να θεωρηθούν πλήρη. Για τους παραπάνω λόγους κρίθηκε σκόπιμη η ανάπτυξη ενός νέου τύπου αρχείου με επέκταση “.vff” (VLEPPO File Format), που αποθηκεύει τα πεδία ορισμού και τα προβλήματα ακριβώς στην κατάσταση που βρίσκονται στο σύστημα, διατηρώντας με ακρίβεια τόσο τις ουσιαστικές πληροφορίες για τα στοιχεία που απαρτίζουν το πεδίο όσο και τις οπτικές πληροφορίες όπως χρώματα και θέσεις στοιχείων. Η λειτουργία αποθήκευσης μπορεί να δημιουργήσει τέτοια αρχεία σε οποιαδήποτε φάση δημιουργίας του συστήματος. Ακολούθως, η λειτουργία ανάκτησης διαβάζει αυτά τα αρχεία και επαναφέρει το σύστημα στην ακριβή κατάσταση που βρισκόταν τη στιγμή της αποθήκευσης.

5.5 Διασύνδεση με Συστήματα Σχεδιασμού Ενεργειών

5.5.1. Διασύνδεση με συστήματα σχεδιασμού ενεργειών υλοποιημένα σαν διαδικτυακές υπηρεσίες

Το VLEPPO στοχεύει στο να αποτελέσει ένα ολοκληρωμένο σύστημα τόσο ορισμού όσο και επίλυσης προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Οι δύο αυτές λειτουργίες, ωστόσο, πρέπει να είναι διακριτές ώστε το σύστημα να είναι ανεξάρτητο από αλγορίθμους σχεδιασμού ενεργειών και να έχει τη δυνατότητα να είναι ευέλικτο στην επιλογή της τεχνικής σχεδιασμού ενεργειών που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος. Με αυτόν τον τρόπο το VLEPPO καταφέρνει να εκμεταλλευτεί τις βελτιωμένες δυνατότητες καινούριων συστημάτων και αλγορίθμων σχεδιασμού ενεργειών που αναπτύσσονται συνεχώς. Η χρήση των προτύπων,

και συγκεκριμένα της PDDL αποτελεί ένα βήμα προς αυτή την κατεύθυνση, εφόσον επιτρέπει τη χρήση οποιουδήποτε συστήματος σχεδιασμού ενεργειών συμμορφώνεται με αυτή.

Όσον αφορά την επικοινωνία με συστήματα σχεδιασμού ενεργειών κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν σύγχρονα πρότυπα με βάση τις διαδικτυακές υπηρεσίες. Χρησιμοποιώντας αυτά τα πρότυπα το VLEPPO μπορεί να ανακαλύψει και να καλέσει διαδικτυακές υπηρεσίες που προσφέρουν την λειτουργικότητα αλγορίθμων σχεδιασμού ενεργειών [HAP-WS]. Ακόμα και υπάρχοντα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών μπορούν να τροποποιηθούν ώστε να προσφέρουν την λειτουργικότητά τους μέσω προτύπων διαδικτυακών υπηρεσιών [Axis, 2002; WSDP], επομένως η ευελιξία στην επιλογή τρόπου επίλυσης είναι αυξημένη.

Για να εξυπηρετηθεί η διασύνδεση με τα προαναφερθέντα συστήματα έχει αναπτυχθεί ένα δυναμικό πρόγραμμα – εξυπηρετούμενος (client program) για διαδικτυακές υπηρεσίες σαν υποσύστημα του VLEPPO. Η αναγκαιότητα για ευελιξία στην επιλογή διαδικτυακής υπηρεσίας επιβάλλει την ανάπτυξη ενός δυναμικού προγράμματος – εξυπηρετούμενου αντί για κάποιο στατικό. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει περισσότερες από μία διαδικτυακές υπηρεσίες σχεδιασμού ενεργειών, ανάλογα με το εκάστοτε πρόβλημα, και ταυτόχρονα να αντιμετωπίσει με επιτυχία πιθανές αλλαγές στους ορισμούς αυτών των διαδικτυακών υπηρεσιών.

Η επικοινωνία με τις διαδικτυακές υπηρεσίες πραγματοποιείται μέσω μηνυμάτων του πρωτοκόλλου επικοινωνίας SOAP (Simple Object Access Protocol) [SOAP], όπως τα πρότυπα των διαδικτυακών υπηρεσιών επιβάλλουν. Σε υψηλότερο επίπεδο, η επικοινωνία εξυπηρετείται από την γλώσσα PDDL, η οποία αποτελεί το μέσο επικοινωνίας του VLEPPO και των εξωτερικών συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών. Ένα βασικό πλεονέκτημα που προκύπτει από τη χρήση της PDDL είναι ότι το VLEPPO απαλλάσσεται από την υποχρέωση καθορισμού των χαρακτηριστικών της γλώσσας που το κάθε σύστημα σχεδιασμού ενεργειών είναι σε θέση να διαχειριστεί, και η απόφαση αυτή αφήνεται αποκλειστικά στα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών, με βάση τις απαιτήσεις που δηλώνονται στα αρχεία PDDL που ανταλλάσσονται.

Η περιγραφή των διαδικτυακών υπηρεσιών σχεδιασμού ενεργειών γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο που ακολουθείται για όλες τις διαδικτυακές υπηρεσίες, δηλαδή το WSDL (Web Service Description Language) [WSDL]. Ένα παράδειγμα περιγραφής μιας τυπικής διαδικτυακής υπηρεσίας σε WSDL φαίνεται στην Εικόνα 54.

Τα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών που υλοποιούνται σαν διαδικτυακές υπηρεσίες δέχονται ανάμεσα στα ορίσματά τους σαν είσοδο τις περιγραφές του πεδίου ορισμού και του

προβλήματος σχεδιασμού ενεργειών σε PDDL, ακολουθούν τη διαδικασία του εκάστοτε αλγορίθμου σχεδιασμού ενεργειών που υλοποιούν και αποκρίνονται με μία ή περισσότερες λύσεις (πλάνα) για το συγκεκριμένο πρόβλημα, συνήθως εκφρασμένα σε PDDL+.

```
<definitions targetNamespace="PPP-WS">
  <types>
    <s:schema elementFormDefault="qualified" targetNamespace="PPP-WS">
      <s:element name="PPP"> <s:complexType> <s:sequence>
        <s:element minOccurs="0" maxOccurs="1" name="domain" type="s:string"/>
        <s:element minOccurs="0" maxOccurs="1" name="problem" type="s:string"/>
      </s:sequence> </s:complexType>
      <s:element name="PPPResponse"> <s:complexType> <s:sequence>
        <s:element minOccurs="0" maxOccurs="1" name="PPPResult" type="s:string"/>
      </s:sequence> </s:complexType>
    </s:element>
  </s:schema>
</types>
<message name="SoapIn">
  <part name="parameters" element="s0:PPP"/>
</message>
<message name="SoapOut">
  <part name="parameters" element="s0:PPPResponse"/>
</message>
<portType name="PPPWClassSoap">
  <operation name="PPP">
    <documentation> Example WSDL document for planner </documentation>
    <input message="s0: SoapIn"/>
    <output message="s0:SoapOut"/>
  </operation>
</portType>
<binding name="PPPWClassSoap" type="s0:PPPWClassSoap">
  <soap:binding style="document" transport="http://schemas.xmlsoap.org/soap/http"/>
  <operation name="PPP">
    <soap:operation soapAction="PPP-WS/PPP" style="document"/>
    <input> <soap:body use="literal"/> </input>
    <output> <soap:body use="literal"/> </output>
  </operation>
</binding>
<service name="PPPWClass">
  <documentation> Example Web Service interface of a planner </documentation>
  <port name="PPPWClassSoap" binding="s0:PPPWClassSoap">
    <soap:address location="http://exampleLocation.com"/>
  </port>
</service>
</definitions>
```

Εικόνα 54. Ένα παράδειγμα περιγραφής μιας τυπικής διαδικτυακής υπηρεσίας σχεδιασμού ενεργειών σε WSDL [HAP-WS].

Η χρήση της τεχνολογίας των διαδικτυακών υπηρεσιών έχει ως αποτέλεσμα την ανεξαρτητοποίηση του VLEPPO από το υποσύστημα επίλυσης προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών, επομένως παρέχει αυξημένη ευελιξία. Ένας τέτοιος διαχωρισμός είναι απαραίτητος καθώς νέα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών που αποδεικνύονται αποδοτικότερα από τα υπάρχοντα αναμένεται να εμφανίζονται συνεχώς. Μέσω της έκθεσής τους σαν διαδικτυακές υπηρεσίες, αυτά τα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το VLEPPO χωρίς καμία

αλλαγή στο ίδιο το σύστημα ή στα πεδία ορισμού που έχουν σχεδιαστεί και εξαχθεί σε PDDL με την βοήθειά του.

5.5.2. Τοπική Επίλυση Προβλημάτων Σχεδιασμού Ενεργειών

Παρόλο που η εκμετάλλευση της τεχνολογίας των διαδικτυακών υπηρεσιών επιτρέπει στο VLEPPO να ανεξαρτητοποιηθεί από τις τεχνικές σχεδιασμού ενεργειών, η χρήση της θέτει κάποιους περιορισμούς στο σύστημα, με κυριότερο αυτό της αναγκαίας σύνδεσης στο δίκτυο κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενεργειών και λήψης των πλάνων. Για αυτό το λόγο κρίθηκε σκόπιμο να προσφέρεται στο σύστημα και εναλλακτικός τρόπος επίλυσης προβλημάτων τοπικά, ώστε ο χρήστης να είναι σε θέση να λάβει έγκυρα πλάνα ανά πάσα στιγμή ακόμα και χωρίς σύνδεση στο δίκτυο, ακόμα κι αν τα συγκεκριμένα πλάνα δεν είναι βέλτιστα. Το σύστημα σχεδιασμού ενεργειών που χρησιμοποιείται τοπικά είναι το LPG-td [Gerevini et al., 2004; 2005], για τους λόγους που εκτίθενται στην ενότητα 2.3.

5.6. Παραδείγματα Χρήσης

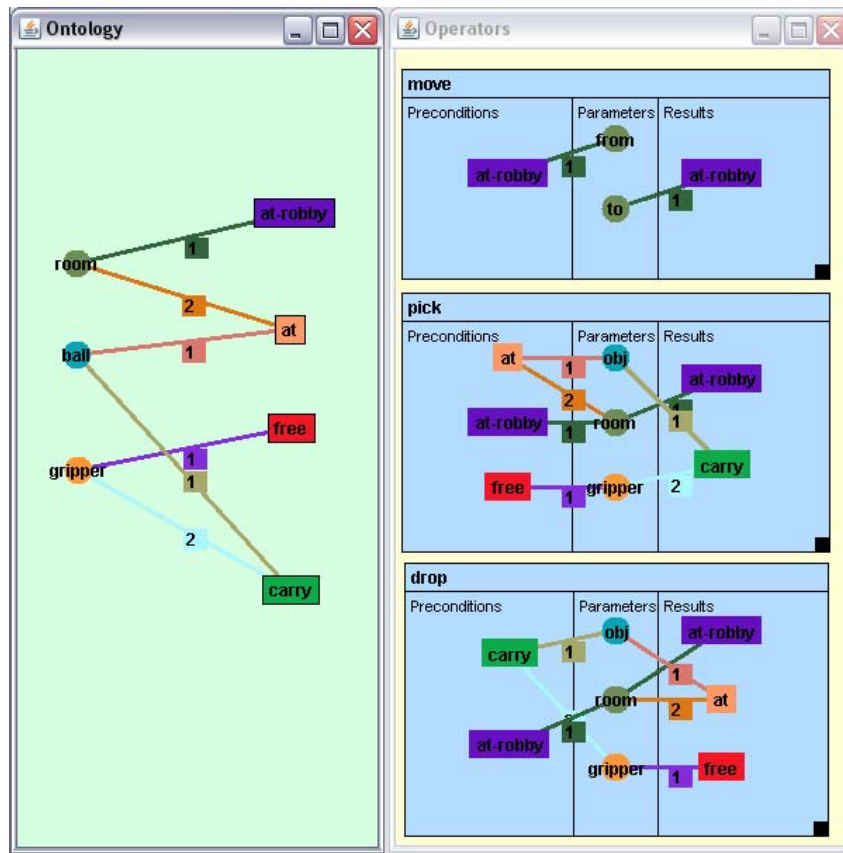
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται δύο παραδείγματα χρήσης του συστήματος VLEPPO. Το πρώτο αφορά το κλασικό πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών Gripper, τμήματα του οποίου παρουσιάστηκαν ως παραδείγματα κατά την περιγραφή του VLEPPO. Το δεύτερο παράδειγμα χρήσης αφορά την σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών, με χρήση PDDL αρχείων που παρήγαγε το σύστημα PORSCE. Μέσω αυτού του παραδείγματος επιδεικνύεται η διασύνδεση και η διαλειτουργικότητα των δύο συστημάτων.

5.6.1. Κλασικό Πρόβλημα Σχεδιασμού Ενεργειών

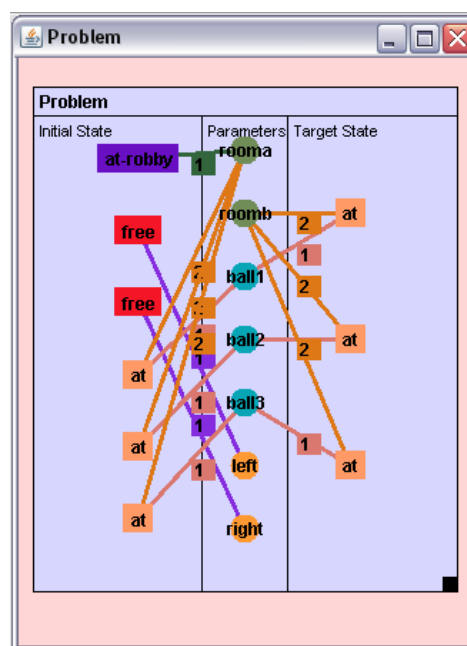
Ένα από τα κλασικότερα πεδία ορισμού στον χώρο του σχεδιασμού ενεργειών είναι αυτό του Gripper, το οποίο έχει περιγραφεί στην ενότητα 5.3.1 και στο Κεφάλαιο 2. Μια πλήρης εικόνα των στοιχείων του πεδίου ορισμού (κλάσεις, συσχετίσεις, τελεστές) όπως αναπαρίστανται οπτικά στο σύστημα VLEPPO φαίνεται στην Εικόνα 55. Διακρίνονται οι κλάσεις του πεδίου ορισμού `room`, `ball` και `gripper`, οι συσχετίσεις `at-robby`, `at`, `free` και `carry`, οι συνδέσεις μεταξύ τους καθώς και οι τελεστές `move`, `pick` και `drop`.

Ένα ενδεικτικό πρόβλημα για αυτό το πεδίο ορισμού φαίνεται στην Εικόνα 56. Το συγκεκριμένο πρόβλημα περιλαμβάνει τρεις σφαίρες `ball1`, `ball2` και `ball3`, οι οποίες βρίσκονται αρχικά

στο δωμάτιο `rooma`, ενώ το ρομπότ έχει δύο λαβίδες, `right` και `left`, οι οποίες αρχικά είναι άδειες (`empty`). Η τελική κατάσταση απαιτεί την μεταφορά και των τριών σφαιρών στο δωμάτιο `roomb`.



Εικόνα 55. Το πλήρες πεδίο ορισμού Gripper.



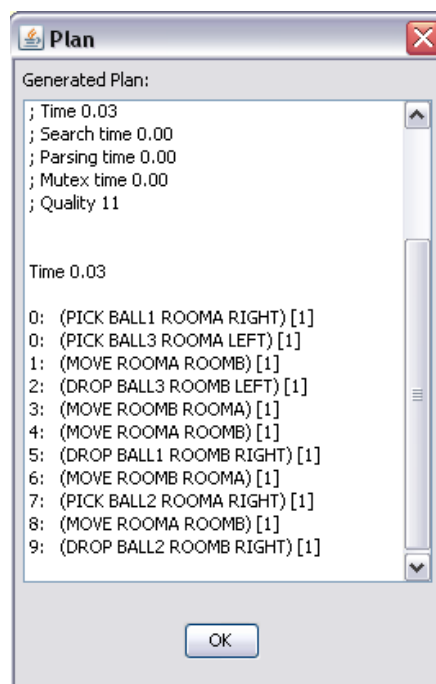
Εικόνα 56. Ένα πρόβλημα για το πεδίο ορισμού Gripper.

Η εξαγωγή του παραπάνω πεδίου ορισμού και προβλήματος σε PDDL δίνει τον κώδικα που φαίνεται στην Εικόνα 57.

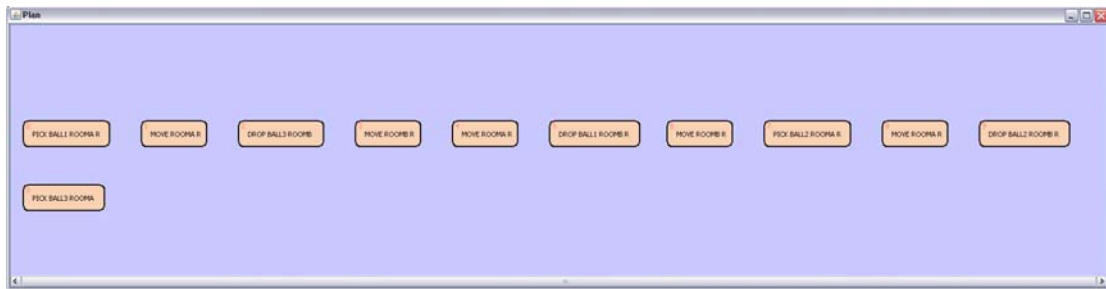
<pre>(define (domain gripper-typed) (:types room ball gripper) (:predicates (at-robby ?r - room) (at ?b - ball ?r - room) (free ?g - gripper) (holding ?b - ball ?g - gripper)) (:action move :parameters (?from - room ?to - room) :precondition (at-robby ?from) :effect (and (at-robby ?to) (not (at-robby ?from)))) (:action pick :parameters (?obj - ball ?room - room ?gripper - gripper) :precondition (and (at ?obj ?room) (at-robby ?room) (free ?gripper)) :effect (and (holding ?obj ?gripper) (not (at ?obj ?room)) (not (free ?gripper)))) (:action drop :parameters (?obj - ball ?room - room ?gripper - gripper) :precondition (and (holding ?obj ?gripper) (at-robby ?room)) :effect (and (at ?obj ?room) (free ?gripper) (not (holding ?obj ?gripper)))))</pre>	<pre>(define (problem gripper1) (:domain gripper-typed) (:objects rooma roomb - room ball1 ball2 ball3 - ball left right - gripper) (:init (at-robby rooma) (free left) (free right) (at ball1 rooma) (at ball2 rooma) (at ball3 rooma)) (:goal (and (at ball1 roomb) (at ball2 roomb) (at ball3 roomb))))</pre>
---	---

Εικόνα 57. Ο κώδικας PDDL για το πεδίο ορισμού Gripper και ένα αντίστοιχο πρόβλημα.

Η λύση του παραπάνω προβλήματος, όπως δίνεται από το LPG-td, καθώς και η οπτικοποίησή της μέσω του VLEPPO φαίνονται στην Εικόνα 58 και στην Εικόνα 59 αντίστοιχα.



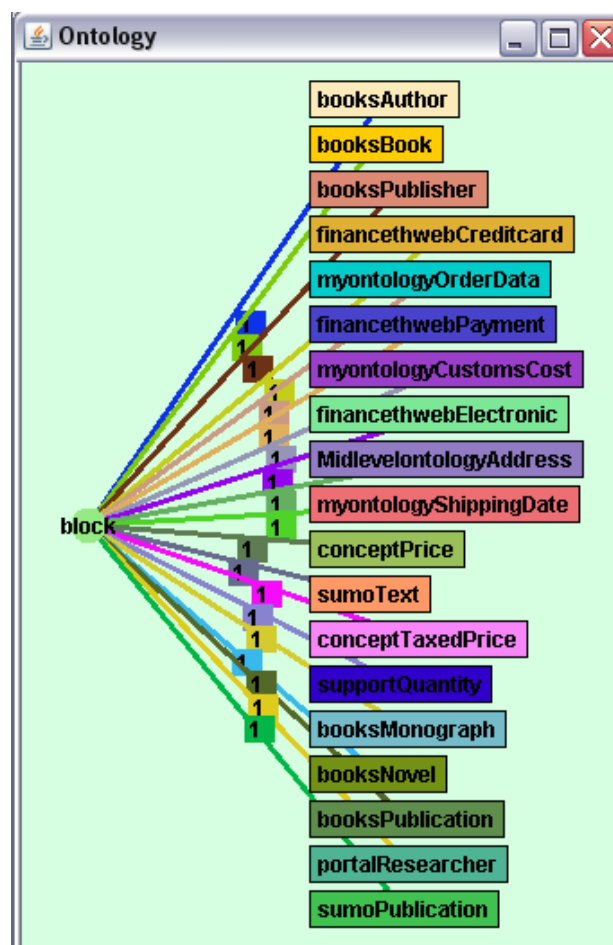
Εικόνα 58. Το πλάνο όπως επιστρέφεται από τον LPG-td.



Εικόνα 59. Το πλάνο όπως οπτικοποιείται από το VLEPPO.

5.6.2. Σύνθεση Διαδικτυακών Υπηρεσιών

Σε αυτήν την ενότητα σχολιάζεται η χρήση του συστήματος VLEPPO για την αντιμετώπιση προβλήματος που αφορά τη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών, ενώ επιδεικνύεται επίσης η αλληλεπίδραση του VLEPPO με το PORSCE καθώς το πεδίο ορισμού δεν σχεδιάζεται από την αρχή, αλλά εισάγεται ως κώδικας PDDL που έχει δημιουργηθεί από το σύστημα PORSCE. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη μετατροπή προβλήματος της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών σε πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών βρίσκονται στα κεφάλαια 3 και 4 .

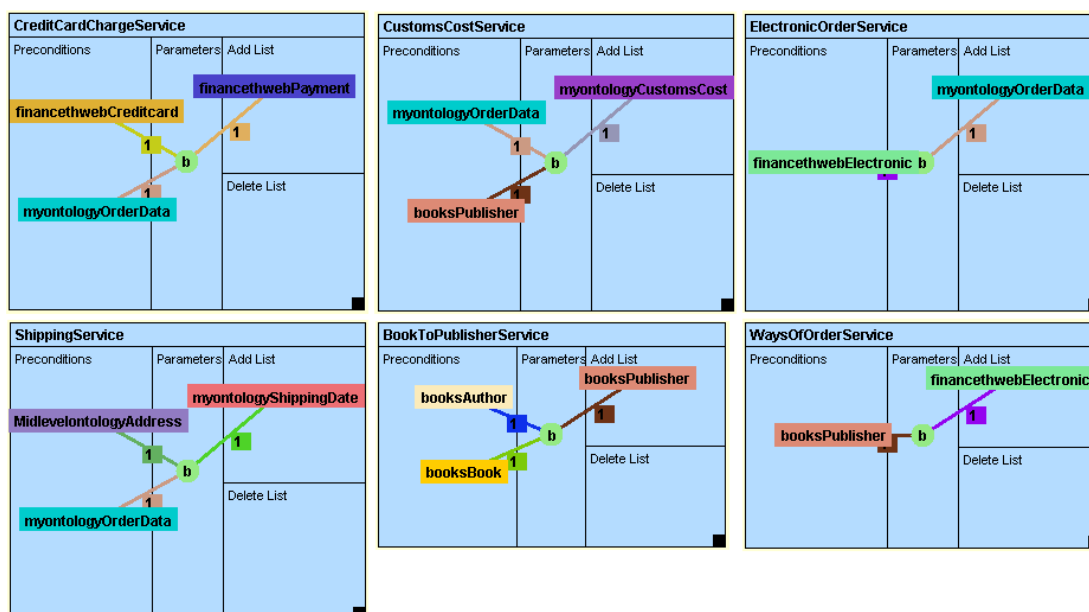


Εικόνα 60. Τα κατηγορήματα για το πεδίο ορισμού του ηλεκτρονικού βιβλιοπωλείου.

Το πεδίο ορισμού που παρουσιάζεται εδώ αφορά το ηλεκτρονικό βιβλιοπωλείο που χρησιμοποιήθηκε και στην ενότητα 4.9.2, ενώ τα κατηγορήματα που περιέχονται στο πεδίο ορισμού παρουσιάζονται στην Εικόνα 60. Τα κατηγορήματα αυτά προκύπτουν από το σύνολο των εννοιών που χρησιμοποιούνται σαν είσοδοι και έξοδοι όλων των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών

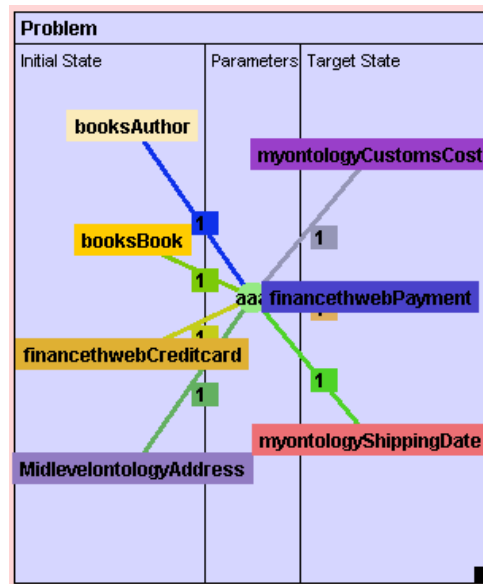
Στις περιπτώσεις που δεν προκύπτουν κατηγορήματα με ορίσματα, φαινόμενο πολύ συχνό σε πεδία ορισμού που προκύπτουν κατά τη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών, είναι αναγκαία η προσθήκη ενός βοηθητικού ορίσματος,. Το όρισμα αυτό δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα, και αποτρέπει τα προβλήματα που παρουσιάζουν ορισμένοι σχεδιαστές ενεργειών που δεν έχουν τη δυνατότητα χειρισμού κατηγορημάτων χωρίς ορίσματα.

Το ζητούμενο στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι η σύνθεση των κατάλληλων διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών για την υλοποίηση της ηλεκτρονικής αγοράς ενός βιβλίου. Στην Εικόνα 61 εμφανίζονται κάποιοι από τους τελεστές που αναπαριστούν τις διαδικτυακές υπηρεσίες (σε προβολή λιστών προσθήκης / διαγραφής), οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν για τον σχηματισμό της σύνθεσης υπηρεσίας που θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις του χρήστη ως πλάνο. Οι είσοδοι των διαδικτυακών υπηρεσιών αντιστοιχούν στις προϋποθέσεις του τελεστή, ενώ οι έξοδοι αντιστοιχούν στα κατηγορήματα της λίστας προσθήκης. Η λίστα διαγραφής παραμένει κενή, καθώς καμία από τις διαθέσιμες διαδικτυακές υπηρεσίες δεν θεωρείται ότι αφαιρεί πληροφορία από την κατάσταση του κόσμου [Hatzi et al., 2007a; 2009c].

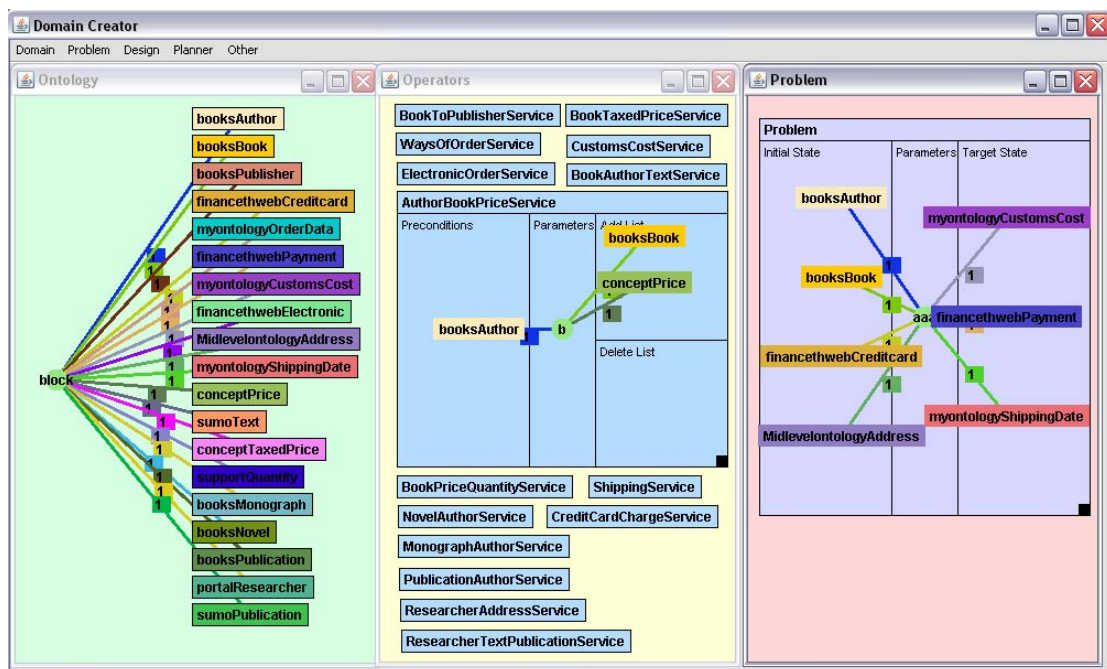


Εικόνα 61. Κάποιοι από τους τελεστές για το πεδίο ορισμού του ηλεκτρονικού βιβλιοπωλείου.

Ένα τυπικό πρόβλημα που ορίζεται με βάση το συγκεκριμένο πεδίο ορισμού παρουσιάζεται στην Εικόνα 62. Ο χρήστης στο συγκεκριμένο πρόβλημα παρέχει ένα τίτλο βιβλίου και το συγγραφέα του, τις πληροφορίες της πιστωτικής κάρτας στην οποία θα γίνει η χρέωση, καθώς και τη διεύθυνση στην οποία θα σταλεί το βιβλίο, και απαιτεί τη χρέωση στην εν λόγω πιστωτική κάρτα για την πραγματοποίηση της αγοράς, καθώς και πληροφορίες για την ημερομηνία αποστολής και το κόστος του τελωνείου για τη συγκεκριμένη αποστολή.



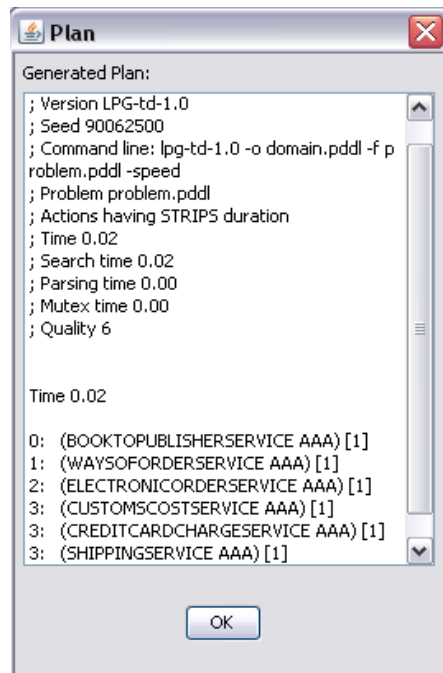
Εικόνα 62. Ένα τυπικό πρόβλημα για το πεδίο ορισμού του ηλεκτρονικού βιβλιοπωλείου.



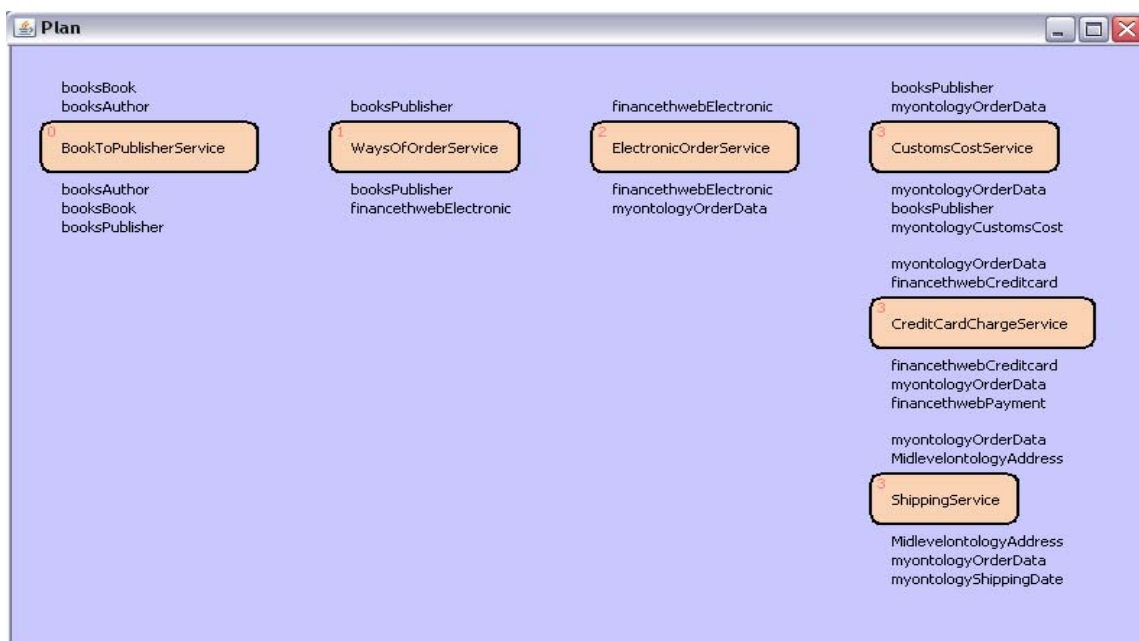
Εικόνα 63. Μια πλήρης εικόνα του Γραφικού Περιβάλλοντος του συστήματος για το παράδειγμα που αναφέρθηκε παραπάνω.

Μια πλήρης εικόνα του Γραφικού Περιβάλλοντος του συστήματος VLEPPO με το πεδίο ορισμού και το πρόβλημα που περιγράφηκαν παραπάνω δίνεται στην Εικόνα 63.

Το πρόβλημα λύθηκε τοπικά χρησιμοποιώντας το σύστημα σχεδιασμού ενεργειών LPG-td και το παραγόμενο πλάνο παρουσιάζεται στην Εικόνα 64, ενώ η οπτικοποίησή του σε επίπεδα παρουσιάζεται στην Εικόνα 65.



Εικόνα 64. Το πλάνο που παρήγαγε ο LPG-td.



Εικόνα 65. Η οπτικοποίηση του πλάνου.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η περιγραφή του πεδίου ορισμού (διαθέσιμες ατομικές διαδικτυακές υπηρεσίες) και του προβλήματος (απαιτήσεις σχετικά με τη σύνθετη υπηρεσία) έχει πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια του συστήματος PORSCCE. Η αλληλεπίδραση του χρήστη με το VLEPPO, το οποίο αντιμετωπίζει το πρόβλημα σαν ένα οποιοδήποτε τυπικό πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών, συνίσταται στην εισαγωγή των αρχείων PDDL που παρήγαγε το PORSCCE και στην επιλογή του συστήματος σχεδιασμού ενεργειών που θα χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση λύσης.

5.7. Τοποθέτηση του VLEPPO σε σχέση με άλλα συστήματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται άλλα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών που έχουν εντοπιστεί στη βιβλιογραφία και παρέχουν δυνατότητες οπτικοποίησης και πραγματοποιείται συνοπτικά η σύγκριση των χαρακτηριστικών τους με το VLEPPO.

Το σύστημα GIPO [McCluskey et al., 2003] είναι βασισμένο σε μια αντικειμενο-κεντρική όψη του κόσμου. Η γενική ιδέα πίσω από την ανάπτυξη αυτού του συστήματος είναι η έννοια της αλλαγής στην κατάσταση των αντικειμένων κατά την εκτέλεση του πλάνου, επομένως, τα πεδία ορισμού μοντελοποιούνται περιγράφοντας τις δυνατές αλλαγές των αντικειμένων που περιέχονται σε αυτά. Το σύστημα GIPO είναι σχεδιασμένο ώστε να διαχειρίζεται τόσο κλασικά όσο και ιεραρχικά (HTN) πεδία ορισμού. Και για τις δύο περιπτώσεις προσφέρονται γραφικά περιβάλλοντα για τη δημιουργία των πεδίων ορισμού και για την οπτική αναπαράσταση των παραγόμενων πλάνων. Τα μοντέλα των πεδίων ορισμού περιγράφονται με μια εσωτερική γλώσσα αναπαράστασης που ονομάζεται OCL (Object Constraint Language), η οποία είναι αντικειμενοστρεφής, σε συμφωνία με το ίδιο το σύστημα GIPO, και οι δυνατότητες μετάφρασης σε PDDL που παρέχονται είναι περιορισμένες. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής περισσότερων του ενός συστημάτων σχεδιασμού, ωστόσο η ευελιξία περιορίζεται σημαντικά εφόσον τα συστήματα αυτά πρέπει να εκτελούνται τοπικά και να συμμορφώνονται με μια σειρά τεχνικών περιορισμών, ενώ η διαδικασία ολοκλήρωσης είναι περίπλοκη.

Όσον αφορά τα γραφικά χαρακτηριστικά του GIPO, τα πιο βασικά είναι ο ορισμός κλάσεων αντικειμένων, κατηγορημάτων και καταστάσεων των αντικειμένων του κόσμου. Τα στοιχεία αυτά είναι υποχρεωτικό να ορίζονται με τη σειρά με την οποία αναφέρονται παραπάνω. Το σύστημα αντιλαμβάνεται τους τελεστές απλά σαν μεταβάσεις μεταξύ καταστάσεων ενός αντικειμένου, ενώ προσφέρει ένα ξεχωριστό εργαλείο, το *ormaker*, το οποίο μπορεί να εξάγει περιγραφές τελεστών από μερικώς ορισμένα πεδία ορισμού και πρότυπα πλάνα. Επιπλέον, τα

προβλήματα σχεδιασμού ενεργειών, τα οποία αναφέρονται σαν *εργασίες (tasks)*, μπορούν να ορισθούν με την μορφή αρχικών και τελικών καταστάσεων. Τέλος, το GIPO περιλαμβάνει κάποια επιπρόσθετα εργαλεία, όπως το *Life History Editor*, τα οποία διευκολύνουν τις πιο προηγμένες λειτουργίες του συστήματος, καθώς και την καλύτερη κατανόηση των πεδίων ορισμού.

Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ του GIPO και του VLEPPO είναι ο τρόπος με τον οποίο τα δύο συστήματα χειρίζονται τα πεδία ορισμού. Το αντικειμενοστρεφές GIPO χρησιμοποιεί τη δική του εσωτερική αναπαράσταση, βασισμένη στην OCL, επομένως η διαδικασία σχεδιασμού με τη σειρά της υποχρεούται να ακολουθήσει αυτήν την αναπαράσταση. Αντίθετα, το VLEPPO παρέχει στοιχεία σχεδιασμού που αντιστοιχούν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στα τρέχοντα πρότυπα του STRIPS και της PDDL. Με αυτόν τον τρόπο, ο σχεδιασμός των πεδίων ορισμού και των προβλημάτων είναι πολύ πιο ευθύς αναφορικά με τα πρότυπα, ενώ η διασύνδεση με συστήματα σχεδιασμού ενεργειών που συμμορφώνονται με αυτά έρχεται φυσικά. Επιπλέον, το VLEPPO προσφέρει στοιχεία σχεδιασμού που καλύπτουν μεγαλύτερο μέρος της PDDL, όπως παραγόμενα κατηγορήματα και σταθερές, ενώ έχει γίνει προσπάθεια να διατηρηθούν τόσο τα ονόματα όσο και η σημασιολογία αυτών των στοιχείων, ώστε να ελαχιστοποιείται ο χρόνος εκμάθησης του συστήματος για χρήστες εξοικειωμένους με την γλώσσα. Τέλος, μια ακόμα σημαντική διαφορά έγκειται στην αλληλεπίδραση με εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών, η οποία στην περίπτωση του GIPO χρειάζεται χειροκίνητη ρύθμιση, ενώ τα συστήματα περιορίζονται υπερβολικά εξαιτίας των αυστηρών τεχνικών προϋποθέσεων που πρέπει να τηρούν. Αντίθετα, στην περίπτωση του VLEPPO, η μόνη απαίτηση για τα εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών είναι η συμβατότητά τους με το πρότυπο της PDDL.

Το σύστημα SIPE-2 είναι άλλο ένα σύστημα για αλληλεπιδραστικό σχεδιασμό και εκτέλεση των παραγόμενων πλάνων [Wilkins, 2000]. Το σύστημα αυτό έχει ως στόχο την υψηλή απόδοση κατά τη διαδικασία σχεδιασμού, και επομένως βασίζεται σε μια σειρά ευριστικών συναρτήσεων, και προσφέρει τη δυνατότητα παροχής συμβουλών (*advice*) στο ενσωματωμένο σύστημα σχεδιασμού ενεργειών. Ανάμεσα στα χρήσιμα χαρακτηριστικά του περιλαμβάνεται η παρακολούθηση της εκτέλεσης του πλάνου, η οποία επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει νέες πληροφορίες στο σύστημα σε περίπτωση που συμβούν αλλαγές στην κατάσταση του κόσμου, και οι γραφικές διεπαφές για την απόκτηση γνώσης και την αναπαράσταση των πλάνων. Οι τελεστές, τα πλάνα και τα προβλήματα αναπαρίστανται με χρήση του φορμαλισμού ACT [Wilkins and Myers, 1994] και μπορούν να τροποποιηθούν οπτικά μέσω της αντίστοιχης γραφικής διεπαφής. Οι τελεστές έχουν την ίδια σημασιολογία όπως και στη PDDL, δηλαδή

περιγράφουν τις αλλαγές στην κατάσταση του κόσμου, αλλά υπάρχουν και σημαντικές διαφορές, όπως το ότι μπορεί να έχουν διάφορα επίπεδα αφαίρεσης, και το ότι μπορούν να εφαρμοσθούν σε οποιαδήποτε κατάσταση, παράγοντας διαφορετικά αποτελέσματα κάθε φορά, τα οποία καθορίζονται με τη χρήση επαγωγικών κανόνων. Επιπλέον, οι τελεστές ορίζουν πρόσθετη πληροφορία όπως (αλλά όχι αποκλειστικά) *περιορισμούς, συνθήκες και σκοπό*, που υποδεικνύει τους στόχους τους οποίους μπορεί να λύσει ένας τελεστής. Η ιεραρχία των κλάσεων είναι δομημένη με τη μορφή πλαισίων (frames), και μπορεί να οπτικοποιηθεί και να τροποποιηθεί με χρήση ξεχωριστού εργαλείου.

Το SIPE-2 είναι ένα πολύπλοκο σύστημα με ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων. Ωστόσο, έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί αυτόνομα και όχι σε συνεργασία με εξωτερικά συστήματα. Η χρήση του φορμαλισμού ACT καθιστά αδύνατη την εισαγωγή στο σύστημα καθιερωμένων πεδίων ορισμού, εκφρασμένων σε PDDL. Άλλη μια δυσκολία που αντιμετωπίζουν οι χρήστες του συστήματος είναι η χρήση δύο διαφορετικών γραφικών διεπαφών, ανεξάρτητων μεταξύ τους, για τη δημιουργία του πεδίου ορισμού. Τέλος, το SIPE-2 δεν προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης διαφορετικών αλγορίθμων σχεδιασμού ενεργειών πέρα από τον ενσωματωμένο.

Το ASPEN είναι ένα περιβάλλον για αυτόματο σχεδιασμό ενεργειών και χρονοπρογραμματισμό [Fukunaga et al., 1997]. Το ASPEN δεν είναι προορισμένο να χρησιμοποιηθεί σαν σύστημα σχεδιασμού ενεργειών γενικού σκοπού, αλλά αποτελεί ένα αντικειμενοστρεφές σύστημα στοχευμένο κυρίως σε πεδία ορισμού που αφορούν διαστημικές αποστολές. Το ASPEN χρησιμοποιεί τη δική του αντικειμενοστρεφή γλώσσα AML (ASPEN Modeling Language), η οποία έχει μόνο ορισμένες μακρινές αντιστοιχίες με την PDDL, ενώ το σύστημα δεν προσφέρει τη δυνατότητα εξαγωγής των πεδίων ορισμού και των προβλημάτων σε PDDL. Επιπλέον, δεν προσφέρει γραφικό περιβάλλον για τη μοντελοποίηση των πεδίων ορισμού. Στα χαρακτηριστικά του περιλαμβάνεται η αυξημένη εκφραστικότητα της γλώσσας AML και η δυνατότητα μοντελοποίησης περιορισμών σχετικών με τα πεδία ορισμού, όπως για παράδειγμα περιορισμοί πόρων ή χρονικοί περιορισμοί. Επίσης, περιλαμβάνεται γραφική διεπαφή για την οπτικοποίηση των πλάνων και των χρονοπρογραμμάτων στα συστήματα όπου η διαδικασία επίλυσης είναι αλληλεπιδραστική.

Η περιγραφή άλλων συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών που προσφέρουν γραφικές διεπαφές, όπως τα [Cox and Veloso, 1997] και [Pegram et al., 1999], που δεν καλύπτουν τις ανάγκες ενός γενικού σχεδιαστή ενεργειών, είναι πέρα από το σκοπό αυτής της παρουσίασης.

Συμπερασματικά, τα περισσότερα από τα προαναφερθέντα συστήματα περιορίζονται σε έναν ενσωματωμένο αλγόριθμο σχεδιασμού ενεργειών, ενώ κανένα δεν προσφέρει άμεση οπτική

αναπαράσταση των στοιχείων της PDDL, κάτι που είναι απαραίτητο για τη διασύνδεσή τους με εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών. Επιπλέον, ακόμα και τα συστήματα που προσφέρουν κάποιου είδους μετάφραση σε PDDL, καλύπτουν μέρος μόνο της γλώσσας. Το VLEPPO επιχειρεί να ξεπεράσει αυτά τα προβλήματα χρησιμοποιώντας άμεσα οπτικά στοιχεία που αντιστοιχούν σε στοιχεία της PDDL για την αναπαράσταση πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών, και συνεργάζεται με μια ποικιλία συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών υλοποιημένων με χρήση της τεχνολογίας των διαδικτυακών υπηρεσιών. Η ουσιαστική συνεισφορά του VLEPPO σε σχέση με τα προαναφερθέντα συστήματα είναι ο σαφής διαχωρισμός ανάμεσα στον σχεδιαστή ενεργειών και στη διαδικασία ορισμού του προβλήματος με οπτικό τρόπο.

5.8. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε το σύστημα VLEPPO, ένα ολοκληρωμένο σύστημα για γραφική σχεδίαση, οπτικοποίηση και επίλυση προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών.

Το VLEPPO αναπτύχθηκε ώστε να προσφέρει λειτουργικότητα που δεν παρέχεται από το PORSCE και αφορά την οπτικοποίηση του πεδίου ορισμού και του προβλήματος, καθώς και την ευελιξία στην επιλογή αλγορίθμου σχεδιασμού ενεργειών. Ωστόσο, δεν συμπεριλήφθηκε στο PORSCE σαν υποσύστημα, αλλά αντίθετα επιλέχθηκε να αναπτυχθεί σαν ξεχωριστό σύστημα, εφόσον η συνεισφορά του σχετίζεται με θέματα που προκύπτουν για οποιοδήποτε πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών.

Όσον αφορά το γραφικό του περιβάλλον, αναπτύχθηκε με γνώμονα την απλότητα και τη φιλικότητα προς το σχεδιαστή, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και από μη ειδικούς στο πεδίο του σχεδιασμού ενεργειών. Ουσιαστική είναι η απόφαση να μην εισαχθούν καινούριοι φορμαλισμοί και τρόποι αναπαράστασης των πεδίων ορισμού και των προβλημάτων, αφού κάτι τέτοιο θα μείωνε την ευελιξία ως προς τη συνεργασία με εξωτερικά συστήματα σχεδιασμού ενεργειών που συμμορφώνονται στα πρότυπα αλλά και θα απαιτούσε την πρόσθετη εκμάθηση για χρήστες που είναι ήδη γνώστες του πεδίου. Έτσι, λήφθηκε μέριμνα ώστε τα σχεδιαστικά στοιχεία που προσφέρονται για την περιγραφή των πεδίων ορισμού και των προβλημάτων να αντιστοιχούν σε στοιχεία των φορμαλισμών STRIPS και PDDL, που αποτελούν τα κυρίαρχα πρότυπα στον χώρο του σχεδιασμού ενεργειών. Μόνο ένας μικρός αριθμός νέων στοιχείων, όπως οι χάρτες, δημιουργήθηκαν για τη διευκόλυνση του σχεδιαστή χωρίς να υπάρχουν σε κάποιον από τους προαναφερθέντες φορμαλισμούς, ωστόσο η χρήση τους δεν επιδρά στην

ευελιξία του συστήματος επειδή αφενός δεν είναι υποχρεωτική και αφετέρου προσφέρεται ένας τρόπος πλήρης αντιστοίχισης και μετάφρασής τους σε PDDL.

Όσον αφορά τη διασύνδεση με άλλα συστήματα, η συμμόρφωση με τα τρέχοντα πρότυπα, όπως αυτό της PDDL, θέτει ουσιαστικά τα θεμέλια για επιτυχή συνεργασία. Η διαλειτουργικότητα υποστηρίζεται επιπλέον από τη χρήση της τεχνολογίας των διαδικτυακών υπηρεσιών, η οποία διευκολύνει την επικοινωνία με εξωτερικά συστήματα μέσω του δικτύου, κάνοντας χρήση καλά ορισμένων πρωτόκολλων συνεργασίας και επικοινωνίας, όπως αυτά της WSDL και του SOAP. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συνεργασία με εξωτερικά συστήματα μέσω της τεχνολογίας των διαδικτυακών υπηρεσιών δεν περιορίζεται σε συστήματα που έχουν υλοποιηθεί εξ αρχής σαν διαδικτυακές υπηρεσίες, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα υπάρχοντα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών, αφού η μετατροπή και η έκθεσή τους σαν διαδικτυακές υπηρεσίες είναι ιδιαίτερα εύκολη και αυτοματοποιημένη μέσω εργαλείων που προσφέρονται από πολλά προγραμματιστικά περιβάλλοντα και γλώσσες προγραμματισμού [Axis, 2002; WSDP].

Το VLEPPO χρησιμοποιήθηκε τόσο για μοντελοποίηση και επίλυση κλασικών προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών, όσο και προβλημάτων που προέρχονται από το χώρο της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών. Επιπλέον, έγιναν δοκιμές με πεδία ορισμού και προβλήματα που σχηματίστηκαν μέσω του PORSCE, ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή συνεργασία και η διαλειτουργικότητα μεταξύ τους.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

6.1. Συμπεράσματα

Ο Παγκόσμιος Ιστός, όπως τον αντιλαμβάνονται οι σημερινοί χρήστες, δεν αποτελεί απλά μια συλλογή κειμένων αλλά δρα ως το μέσο για την παροχή μιας σειράς υπηρεσιών. Ένα μεγάλο τμήμα αυτής της λειτουργικότητας υλοποιείται με την τεχνολογία των διαδικτυακών υπηρεσιών. Η δυνατότητα αυτοματοποιημένης δημιουργίας σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς ο αριθμός των διαθέσιμων ατομικών υπηρεσιών αυξάνεται διαρκώς. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα, η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται την αυτοματοποιημένη σύνθεση σημασιολογικών διαδικτυακών υπηρεσιών με χρήση ευφών τεχνικών, και επικεντρώνεται στη σύνθεση μέσω σχεδιασμού ενεργειών στο πλαίσιο του Σημασιολογικού Ιστού.

Κύριο αντικείμενο της διατριβής αποτέλεσε η διερεύνηση μεθόδων σχεδιασμού ενεργειών για την αυτοματοποιημένη σύνθεση σημασιολογικών διαδικτυακών υπηρεσιών, και η υποστήριξή της με ολοκληρωμένα συστήματα λογισμικού που αναπτύχθηκαν για το σκοπό αυτό. Στον τομέα της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, η συμβολή της διατριβής συνοψίζεται στα θέματα της αναπαράστασης του προβλήματος σύνθεσης, του εμπλουτισμού του προβλήματος με σημασιολογική πληροφορία, της αναπαράστασης και τροποποίησης των σύνθετων υπηρεσιών, καθώς και της αποτίμησης της ποιότητας των σύνθετων υπηρεσιών. Επιπλέον, στον τομέα του σχεδιασμού ενεργειών, η συνεισφορά της διατριβής άπτεται της διευκόλυνσης της γραφικής μοντελοποίησης πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών καθώς και της ευελιξίας στην απόκτηση λύσης με χρήση εξωτερικών σχεδιαστών μέσω της τεχνολογίας των διαδικτυακών υπηρεσιών.

Μετά από μελέτη των διάφορων δυνατών τρόπων αναπαράστασης του προβλήματος της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών σαν πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών, επιλέχθηκε αυτός που δίνει τη δυνατότητα ευθείας και φυσικής αντιστοίχισης. Επιτεύχθηκε με αυτόν τον τρόπο απλή αναπαράσταση του προβλήματος τόσο σε επίπεδο σημασιολογίας όσο και σε συντακτικό

επίπεδο, αντιστοιχίζοντας τις διαθέσιμες ατομικές υπηρεσίες σε τελεστές ενός πεδίου ορισμού σχεδιασμού ενεργειών. Η ορθότητα και η εφαρμοσιμότητα της προσέγγισης επαληθεύτηκε πειραματικά μέσω της προγραμματιστικής υλοποίησης της μεθοδολογίας μετάφρασης των OWL-S περιγραφών των ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών στη γλώσσα περιγραφής πεδίων ορισμού σχεδιασμού ενεργειών PDDL, καθώς και μετατροπής των απαιτήσεων σχετικά με τη σύνθετη υπηρεσία σε πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών, περιγεγραμμένο επίσης σε PDDL.

Η εκμετάλλευση της σημασιολογικής πληροφορίας που περιέχεται στις OWL-S περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών κατά τη διαδικασία σύνθεσης μέσω σχεδιασμού ενεργειών αποτελεί ένα ακόμα θέμα που ερευνήθηκε στο πλαίσιο της διατριβής, σε συνδυασμό με την αναπαράσταση του προβλήματος. Διαπιστώθηκε ότι η επεξεργασία οντολογιών που συνοδεύουν τις σημασιολογικές περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών μπορεί να οδηγήσει στην εξαγωγή πρόσθετων σημασιολογικών πληροφοριών για αυτές, και έτσι η διαδικασία σχεδιασμού μπορεί να πραγματοποιηθεί με επίγνωση της σημασιολογίας των εννοιών. Επιπλέον, μπορεί να εφαρμοστεί σημασιολογική χαλάρωση κατά τον σχεδιασμό, η οποία παράγει προσεγγιστικές λύσεις. Η λειτουργικότητα αυτή αποδεικνύεται χρήσιμη σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η εύρεση ακριβούς πλάνου, εφόσον μια προσεγγιστική λύση είναι προτιμότερη από τη μη πρόταση λύσης.

Η παρούσα έρευνα επίσης πρότεινε λύση στην αντιμετώπιση των περιπτώσεων μη διαθεσιμότητας ατομικών υπηρεσιών που συμμετέχουν στις σύνθετες διαδικτυακές υπηρεσίες. Με την επεξεργασία της σημασιολογικής πληροφορίας και τον εντοπισμό ομοιοτήτων μεταξύ ατομικών υπηρεσιών η σύνθετη υπηρεσία μπορεί να τροποποιηθεί μέσω αντικατάστασης της μη διαθέσιμης ατομικής υπηρεσίας, χωρίς να απαιτείται η εκ νέου αναπαράσταση του προβλήματος και ο επανασχεδιασμός.

Η συμβολή της διατριβής στον τομέα της σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών ολοκληρώνεται με την εξερεύνηση μεθόδων και την πρόταση μετρικών για την αποτίμηση της ποιότητας των σύνθετων υπηρεσιών. Τέτοιες μετρικές περιλαμβάνουν εγγενή χαρακτηριστικά του πλάνου που αποτελεί την περιγραφή της σύνθετης υπηρεσίας, όπως τον αριθμό επιπέδων και βημάτων, αλλά και επιπλέον μετρικές σημασιολογικής απόστασης σε σχέση με την ιδανική επιθυμητή υπηρεσία, σε περίπτωση που από τη διαδικασία επίλυσης έχουν επιστραφεί προσεγγιστικές λύσεις.

Οι παραπάνω τομείς έρευνας συνδυάστηκαν, υλοποιήθηκαν προγραμματιστικά και ολοκληρώθηκαν στο σύστημα PORSCE, το οποίο επιτελεί το έργο της αυτόματης σύνθεσης

διαδικτυακών υπηρεσιών με σημασιολογική επίγνωση και σημασιολογική χαλάρωση, όταν κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο. Το σύστημα είναι σε θέση να

α) εξάγει το πεδίο ορισμού και το πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών σε PDDL με βάση τις σημασιολογικές περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών σε OWL-S και τις απαιτήσεις του χρήστη για τη σύνθετη υπηρεσία, και

β) αναζητά λύσεις, δηλαδή περιγραφές της σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας με χρήση εξωτερικών συστημάτων σχεδιασμού ενεργειών.

Το υποσύστημα σημασιολογικής ανάλυσης, που είναι ενσωματωμένο στο PORSCE, εφαρμόζει σημασιολογική χαλάρωση όπου απαιτείται, όπως για παράδειγμα κατά την τροποποίηση της σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας με αντικατάσταση κάποιας από τις ατομικές υπηρεσίες που περιλαμβάνονται, ενώ επίσης επιτρέπει την υλοποίηση των προαναφερθέντων μέτρων αποτίμησης της ποιότητας των σύνθετων υπηρεσιών και την εμφάνιση των αποτελεσμάτων στον χρήστη, δίνοντάς του τη δυνατότητα να επιλέξει τη διαδικτυακή υπηρεσία που τον ικανοποιεί περισσότερο.

Θέματα τα οποία δεν αφορούν μόνο τη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών αλλά και το σχεδιασμό ενεργειών, μελετήθηκαν και αναπτύχθηκαν επίσης στο πλαίσιο της διατριβής. Η συνεισφορά επικεντρώνεται στη διευκόλυνση της μοντελοποίησης, κωδικοποίησης και συντήρησης πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών, μέσω εύχρηστων γραφικών περιβαλλόντων, τα οποία όχι μόνο αποτελούν οπτική βοήθεια στον χρήστη αλλά εκτελούν συντακτικούς ελέγχους και ελέγχους εγκυρότητας σε πραγματικό χρόνο για να αποτρέψουν τη διάδοση των λαθών στα πεδία ορισμού. Στο ίδιο πλαίσιο εντάσσεται και η ανεξαρτητοποίηση του ορισμού του προβλήματος σχεδιασμού ενεργειών από τους αλγόριθμους και τις τεχνικές σχεδιασμού ενεργειών. Τα δύο αυτά ζητήματα καλύπτονται από το σύστημα VLEPPO, το οποίο σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε επίσης στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Το VLEPPO παρέχει εύχρηστο γραφικό περιβάλλον και διαλειτουργικότητα με την PDDL με δυνατότητες εισαγωγής και εξαγωγής, ενώ η ευελιξία επιλογής συστήματος σχεδιασμού ενεργειών για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος γίνεται με την χρήση της τεχνολογίας των διαδικτυακών υπηρεσιών.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή θεωρείται ότι αποτελεί μια ολοκληρωμένη πρόταση για την αυτοματοποιημένη σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών με την τεχνική του σχεδιασμού ενεργειών. Η έρευνα δεν περιορίστηκε μόνο στις βασικές προαναφερόμενες λειτουργίες όπως η αναπαράσταση του προβλήματος, η επίλυσή του και η αναπαράσταση της λύσης, αλλά

επεκτάθηκε και σε δευτερεύουσες όπως η αντιμετώπιση εξαιρετικών περιπτώσεων, η αποτίμηση ποιότητας σύνθετων υπηρεσιών και η βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη.

6.2. Μελλοντικές Ερευνητικές Κατευθύνσεις

Μία από τις κύριες μελλοντικές κατευθύνσεις της παρούσας έρευνας αποτελεί η εξερεύνηση της δυνατότητας έκφρασης μη λειτουργικών απαιτήσεων και χαρακτηριστικών των σημασιολογικών διαδικτυακών υπηρεσιών, τόσο για τις διαθέσιμες ατομικές διαδικτυακές υπηρεσίες όσο και για τις επιθυμητές σύνθετες. Μέχρι στιγμής, οι απαιτήσεις που εκφράζονται περιλαμβάνουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των υπηρεσιών, όπως τις εισόδους και τις εξόδους τους, εμπλουτισμένες με σημασιολογικές πληροφορίες, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει ορθή ταυτοποίηση εννοιών κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενεργειών. Ωστόσο, στις νεότερες γλώσσες περιγραφής διαδικτυακών υπηρεσιών, ο ορισμός τους ενδέχεται να περιλαμβάνει μη λειτουργικά χαρακτηριστικά, όπως χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας, διαθεσιμότητας ή κατανάλωσης πόρων, χρονικούς περιορισμούς κτλ, τα οποία θα πρέπει να συμπεριληφθούν στη διαδικασία σχεδιασμού. Έτσι, απαιτείται η εύρεση του κατάλληλου τρόπου αναπαράστασης τέτοιων χαρακτηριστικών με όρους σχεδιασμού ενεργειών. Έχει ήδη διαπιστωθεί ότι η καθιερωμένη γλώσσα περιγραφής πεδίων ορισμού και προβλημάτων σχεδιασμού ενεργειών PDDL είναι ιδιαίτερα εκφραστική, και καλύπτει τέτοιου είδους απαιτήσεις με τα στοιχεία που έχουν προστεθεί στις νεότερες εκδόσεις της, επομένως θα είναι σε θέση να εξυπηρετήσει την αναπαράσταση των διαδικτυακών υπηρεσιών εφόσον μελετηθούν και βρεθούν οι κατάλληλες αντιστοιχίες. Ταυτόχρονα, ο σχεδιασμός του συστήματος PORSCE ώστε να είναι ανεξάρτητο από τα συστήματα σχεδιασμού ενεργειών το καθιστά ικανό να εκμεταλλευτεί την έρευνα στο πεδίο αυτό, η οποία παράγει συνεχώς βελτιωμένα συστήματα που έχουν τη δυνατότητα να χειρίζονται αποδοτικότερα μεγαλύτερο υποσύνολο της γλώσσας PDDL.

Άλλη μια σημαντική κατεύθυνση που αποτελεί έναν από τους άμεσους στόχους είναι ο μετασχηματισμός του πλάνου, δηλαδή της περιγραφή της σύνθετης υπηρεσίας που αποκτάται σαν λύση στο εκάστοτε πρόβλημα, σε κάποιο πρότυπο περιγραφής σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών, όπως η OWL-S. Με αυτόν τον τρόπο η διαδικασία σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών μέσω σχεδιασμού ενεργειών θα είναι εντελώς διάφανη στον χρήστη, η εμπειρία του οποίου θα περιλαμβάνει μόνο περιγραφές υπηρεσιών, ατομικών και σύνθετων, σε OWL-S ή κάποιο άλλο παρόμοιο πρότυπο. Επιπλέον, η παραγόμενη περιγραφή της σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας θα μπορεί να αποτελέσει είσοδο σε άλλα υπάρχοντα συστήματα τα οποία αναλαμβάνουν την εκτέλεση και την παρακολούθηση της εκτέλεσης σύνθετων διαδικτυακών

υπηρεσιών και παράγουν σχετικές πληροφορίες. Η ολοκλήρωση τέτοιων συστημάτων με το σύστημα PORSCE θα επιτρέψει την αυτόματη ενημέρωση του PORSCE για το ενδεχόμενο μη διαθεσιμότητας ατομικών υπηρεσιών και ακολούθως την αυτόματη αντικατάστασή τους με ισοδύναμες ή σχετικές στην περιγραφή της σύνθετης υπηρεσίας, χωρίς να απαιτείται καμία παρέμβαση από το χρήστη.

Μετά τη μετατροπή των πλάνων σε OWL-S, οι περιγραφές των σύνθετων διαδικτυακών υπηρεσιών μπορούν να προστίθενται στο μητρώο των διαθέσιμων διαδικτυακών υπηρεσιών που χρησιμοποιείται κάθε φορά, ή να συγκεντρώνονται σε ένα ειδικό ξεχωριστό μητρώο, ώστε να δημιουργηθεί μια συλλογή με περιγραφές σύνθετων υπηρεσιών. Με αυτό τον τρόπο, οι σύνθετες διαδικτυακές υπηρεσίες που δημιουργούνται μπορούν να συμπεριλαμβάνονται και αυτές στη διαδικασία σύνθεσης, και να αντιμετωπίζονται ως απλές. Ενδέχεται δε να την επιταχύνουν σε ορισμένες περιπτώσεις, εφόσον κάποιο τμήμα ή και ολόκληρη η επιθυμητή σύνθετη υπηρεσία μπορεί να έχει ήδη δημιουργηθεί και περιγραφεί από προηγούμενες εκτελέσεις του συστήματος. Η ανάδραση που θα προκύψει με αυτόν τον τρόπο δίνει τη δυνατότητα επιτάχυνσης της διαδικασίας σύνθεσης και επιτρέπει σύνθετες διαδικτυακές υπηρεσίες πολλών επιπέδων, ωστόσο θα εισάγει αβεβαιότητα στο σύστημα όσον αφορά την πιθανότητα διαθεσιμότητας των σύνθετων υπηρεσιών, επομένως η αποδοτικότητα αυτής της προσέγγισης είναι ένα επιπλέον θέμα προς μελλοντική διερεύνηση. Η πιθανότητα αποτυχίας (μη διαθεσιμότητας) κάποιας σύνθετης διαδικτυακής υπηρεσίας αναμένεται να αυξάνεται όσο αυξάνονται ο αριθμός των υπηρεσιών από τις οποίες απαρτίζεται, τα επίπεδα σύνθεσης, αλλά και ο χρόνος ο οποίος έχει περάσει από τη στιγμή της πιο πρόσφατης επιτυχούς εκτέλεσής της. Το θέμα προς διερεύνηση και πειραματισμό σε αυτήν την περίπτωση είναι να βρεθεί αν υπάρχουν περιορισμοί ή κατάλληλες τιμές αυτών των παραμέτρων ώστε η διαδικασία σύνθεσης να είναι αποδοτική και με χαμηλά ποσοστά αποτυχίας, χρησιμοποιώντας μητρώα που περιλαμβάνουν περιγραφές όχι μόνο ατομικών αλλά και σύνθετων υπηρεσιών.

Όπως περιγράφεται στη σχετική ενότητα, κατά την αναπαράσταση ατομικών διαδικτυακών υπηρεσιών σαν τελεστές, λαμβάνονται υπόψη μόνο διαδικτυακές υπηρεσίες οι οποίες δεν έχουν αρνητικά αποτελέσματα πάνω στο μοντέλο του κόσμου, δηλαδή δεν αφαιρούν κάποια πληροφορία. Έτσι, προκύπτουν τελεστές σχεδιασμού ενεργειών οι οποίοι έχουν πάντα κενή τη λίστα διαγραφής. Ένα θέμα που προκύπτει είναι οι επιδράσεις της γνώσης αυτής στους αλγορίθμους σχεδιασμού ενεργειών, και πιο συγκεκριμένα η δυνατότητα επιτάχυνσης των αλγορίθμων αυτών λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η λίστα διαγραφής των τελεστών παραμένει κενή. Ένα επιπλέον σχετικό θέμα προς διερεύνηση είναι η πιθανότητα στο μέλλον οι διαδικτυακές υπηρεσίες να απαιτούν αρνητικά αποτελέσματα για την περιγραφή τους, κάτι που

θα δημιουργούσε ενδεχόμενες ασυνέπειες στη λειτουργία του συστήματος κάτω από σημασιολογική χαλάρωση. Για την αντιμετώπιση αυτού του ενδεχομένου πρέπει να μελετηθούν τρόποι σημασιολογικής χαλάρωσης που λαμβάνουν υπόψη τους αρνητικά αποτελέσματα, και να υλοποιηθούν στο σύστημα PORSCE.

Τέλος, μια ακόμα περιοχή στην οποία μπορεί να κινηθεί η μελλοντική έρευνα είναι ο τομέας της οπτικοποίησης, καθώς κατά την ανάπτυξη των συστημάτων VLEPPO και PORSCE διαπιστώθηκε πόσο σημαντικά είναι τα γραφικά περιβάλλοντα τόσο στο σχεδιασμό και στη μοντελοποίηση ενός προβλήματος όσο και στην κατανόησή του. Έτσι, πρέπει να μελετηθούν και να υλοποιηθούν επεκτάσεις του PORSCE και του VLEPPO, ώστε να περιλαμβάνουν αποδοτικούς τρόπους οπτικής παρουσίασης πεδίων ορισμού που έχουν προκύψει από προβλήματα σύνθεσης διαδικτυακών υπηρεσιών, αφού ληφθούν υπόψη οι ιδιαιτερότητες τέτοιων πεδίων, όπως το ότι αναμένεται να έχουν έναν ιδιαίτερα μεγάλο αριθμό τελεστών. Οι επεκταμένες αυτές εκδόσεις των PORSCE και VLEPPO θα πρέπει να παρέχουν διασύνδεση με τις σημασιολογικές περιγραφές των διαδικτυακών υπηρεσιών και να επιτρέπουν τροποποιήσεις σε αυτές, ή τη δημιουργία νέων περιγραφών με εύκολο και αποδοτικό οπτικό τρόπο που δεν απαιτεί από τον χρήστη συγγραφή κώδικα OWL-S.

Αναφορές

- [1] Aalst, W.M.P van der, 2003. Don't Go with the Flow: Web Services Composition Standards Exposed, IEEE Intelligent Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 72-76.
- [2] Aalst, W.M.P. van der, Dumas, M. and ter Hofstede, A.H.M., 2003. Web Service Composition Languages: Old Wine in new Bottles. In: 29th EUROMICRO Conference, Track on Software Process and Product Improvement.
- [3] ActiveBPEL Engine, <http://www.activevos.com/community-open-source.php>
- [4] AIPS-98 Planning Competition, <http://www.cs.cmu.edu/~aips98/>
- [5] AIPS Planning Competition 2000, <http://www.cs.toronto.edu/aips2000/>
- [6] Alfredo, M., 2003. Planning and Scheduling for the Web Roadmap, Technical Coordination Unit for Planning and Scheduling for the Web, PLANET Network of Excellence, <http://www.dipmat.unipg.it/~milani/webtcu/>
- [7] Alonso, G., Casati, F., Kuno, H. and Machiraju, V., 2004. Web Services. Concepts, Architectures and Applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [8] Axis, 2002. Creating a web service with Apache Axis, <http://www.onjava.com/pub/a/onjava/2002/06/05/axis.html>
- [9] Arkin, A. et al, 2002. Web Service Choreography Interface (WSCI), <http://www.w3.org/TR/wsci/>
- [10] Bassiliades, N., Anagnostopoulos, D., Vlahavas, I., 2005. Web Service Composition Using a Deductive XML Rule Language. Distributed and Parallel Databases 17(2): 135-178
- [11] Berardi, D., Calvanese, D., De Giacomo, G. and Mecella, M., 2005. Automatic composition of process-based web services: a challenge. In Proc. of the WWW'05 Workshop on Web Service Semantics: Towards Dynamic Business Integration (WSS 2005)

- [12] Berners-Lee, T., Hendler, J., and Lassila, O., 2001. The Semantic Web, *Scientific American*, 284(5), pp. 34-43.
- [13] Bertoli, P., Cimatti, A., Pistore, M., and Traverso, P., 2003. A Framework for Planning with Extended Goals under Partial Observability. In *Proc. ICAPS'03*, 215-224.
- [14] BEXEE BPEL Execution Engine, <http://bexee.sourceforge.net/>
- [15] Blum, A. L. and Furst, M. L., 1997. Fast Planning Through Planning Graph Analysis. *Artificial Intelligence*. 90. 1997. pp 281-300.
- [16] Bonet, B., Loerincs, G., and Geffner, H., 1997. A robust and fast action selection mechanism for planning, in *Proceedings of the 14th International Conference of the American Association of Artificial Intelligence*, Providence, Rhode Island, pp. 714-719.
- [17] Bonet, B., and Geffner, H., 1999. Planning as Heuristic Search: New Results, *Proceedings of the 5th European Conference on Planning*, Durham, UK.
- [18] Booth D. et al., 2003. Web Services Architecture, W3C Working Draft, <http://www.w3.org/TR/ws-arch/>
- [19] BPELJ, 2004. BPEL for Java Technology, <http://www.ibm.com/developerworks/library/specification/ws-bpelj/>
- [20] BPML, 2002. Business Process Management Language, <http://www.bpmi.org/>
- [21] BPMN, Business Process Modeling Notation, <http://www.bpmn.org/>
- [22] Bucchiarone, A. and Gnesi, S., 2006. A Survey on Service Composition Languages and Models, 1st International Workshop on Web Services Modeling and Testing (WsMaTe 2006).
- [23] Bylander, T., 1994. The Computational Complexity of Propositional STRIPS Planning, *Artificial Intelligence*, 69:165-204.
- [24] Casati, F., Ilnicki, S., Jin, L., et al, 2000. Adaptive and Dynamic Service Composition in eFlow. In: Wangler, B., Bergman, L.D. (eds.) *CAiSE 2000*. LNCS, vol. 1789, Springer, Heidelberg.

- [25] Casati, F., Sayal, M., Shan, M.C., 2001. Developing E-Services for Composing E-Services. Proceedings of CAISE 2001.
- [26] Carman M., Serafini L., Traverso P., 2003. Web Service Composition as Planning, ICAPS 2003 Workshop on Planning for Web Services.
- [27] Chan, M., Bishop, J., & Baresi, L., 2007. Survey and Comparison of Planning Techniques for Web Services Composition. University of Pretoria Pretoria, Technical Report, Polelo Research Group Department of Computer Science. South Africa.
- [28] Chapman, D. 1987. Planning for conjunctive goals. *Artificial Intelligence*, Vol 32, pp. 333-337.
- [29] Chen, P., 1976. The Entity-Relationship Model - Toward a Unified View of Data, *ACM Transactions on Database Systems*, 1(1):9-36.
- [30] Cox, M. T., Veloso, M. M., 1997. Supporting Combined Human and Machine Planning: An Interface for Planning by Analogical Reasoning. *ICCBR 1997*: 531-540.
- [31] DAML+OIL, 2001. <http://www.daml.org/2001/03/daml+oil-index.html>
- [32] Dustdar, S. and Schreiner, W., 2005. A survey on web services composition, *Int. J. Web and Grid Services*, Vol. 1, No. 1, pp.1–30.
- [33] Edelkamp, S. and Hoffmann, J., 2004. PDDL 2.2: The Language for the Classical Part of IPC-4, in *Proceedings of the International Planning Competition International Conference on Automated Planning and Scheduling (Whistler 2004)*, 1-7.
- [34] Erol, K., Hendler, J., Nau, D., 1994. HTN Planning: Complexity and Expressivity. In *Proc. AAAI-94*, pp. 1123-1128.
- [35] FF, FastForward Planner, <http://members.deri.at/~joergh/ff.html>
- [36] Fikes, R., Nilsson, N. J., 1971. STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving, *Artificial Intelligence*, Vol 2 (1971), pp 189-208.

- [37] Fox, M. & Long, D., 2002. PDDL+: Modeling continuous time dependent effects. In Proceedings of the 3rd International NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space.
- [38] Fox, M. and Long, D., 2003. PDDL2.1: An extension to PDDL for expressing temporal planning domains. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 20, 61-124.
- [39] Fukunaga, A., Rabideau, G., Chien, S., and Yan, D., 1997. Towards an application framework for automated planning and scheduling. In *Proceedings IEEE Aerospace Conference*, pages 375-386, Snowmass, Colorado.
- [40] Gerevini, A. and Long, D., 2005. Plan Constraints and Preferences in PDDL3, Technical Report R.T., Department of Electronics for Automation, University of Brescia, Italy.
- [41] Gerevini, A., Saetti, A., Serina, I., 2004. LPG-TD: a Fully Automated Planner for PDDL2.2 Domains (short paper), in *International Planning Competition, 14th Int. Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS-04)*.
- [42] Gerevini, A., Saetti, A., Serina, I., 2005. LPG-td planning system, <http://zeus.ing.unibs.it/lpg/>
- [43] Ghallab, M., Howe, A., Knoblock, C., McDermott, D., Ram, A., Veloso, M., Weld, D., Wilkins, D., 1998. PDDL -- the Planning Domain Definition Language. Technical report, Yale University, New Haven, CT.
- [44] Giunchiglia, F. and Traverso, P., 1999. Planning as Model Checking. In *Proc. 5th European Conference on Planning (ECP-99)*, LNAI. Springer-Verlag.
- [45] Hackmann, G., Haitjema, M., Gill, C., and Roman, G.C., 2006. Sliver: A BPEL Workflow Process Execution Engine for Mobile Devices, in *Proc. 4th International Conference on Service Oriented Computing*.
- [46] Hamilton, A. G., 1978. *Logic for Mathematicians*, Cambridge University Press, Cambridge UK.
- [47] HAP-WS planner, <http://lpis.csd.auth.gr/systems/HAP-WS.wsd1>
- [48] Hatzi, O., Meditskos, G., Vrakas, D., Bassiliades, N., Anagnostopoulos, D., Vlahavas, I., 2008. A Synergy of Planning and Ontology Concept Ranking for Semantic Web

Service Composition, 11th Ibero-American Conference on AI, Lisbon, Portugal, Proceedings Lecture Notes in Computer Science 5290 Springer 2008, pp 42-51.

- [49] Hatzi, O., Meditskos, G., Vrakas, D., Bassiliades, N., Anagnostopoulos, D., Vlahavas, I., 2009a. Semantic Web Service Composition using Planning and Ontology Concept Relevance. Distributed and Parallel Databases, Springer (under review)
- [50] Hatzi, O., Meditskos, G., Vrakas, D., Bassiliades, N., Anagnostopoulos, D., Vlahavas, I., 2009b. Semantic Web Service Composition using Planning and Ontology Concept Relevance with PORSCE II, to be presented at Web Intelligence 2009.
- [51] Hatzi, O., Vrakas, D., Bassiliades, N., Anagnostopoulos, D., Vlahavas, I., 2007a. Visual Representation of Web Service Composition Problems through VLEPpO, International Workshop on Intelligent Web Based Tools (IWBT07), 19th IEEE International conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI07), Juan D. Velasquez (Ed.), pp. 42 – 49.
- [52] Hatzi, O., Vrakas, D., Bassiliades, N., Anagnostopoulos, D., Vlahavas, I., 2007b. VLEPpO: A Visual Language for Problem Representation, 26th Workshop of the UK Planning and Scheduling Special Interest Group (PlanSIG 2007), Roman Bartak (Ed.), pp. 60 – 66.
- [53] Hatzi, O., Vrakas, D., Bassiliades, N., Anagnostopoulos, D., Vlahavas, I., 2009c. A Visual Programming System for Automated Problem Solving". Expert Systems with Applications, Elsevier (under review)
- [54] Hendler, J. A., Tate, A., Drummond, M., 1990. AI Planning: Systems and Techniques. AI Magazine 11(2): 61-77.
- [55] Hoffman, J., 2000. A Heuristic for Domain Independent Planning and its Use in an Enforced Hill-Climbing Algorithm, in Proceedings of the 12th International Symposium on Methodologies for Intelligent Systems, Charlotte, USA, pp. 216-227.
- [56] Hoffman, J., and Nebel, B., 2001. The FF Planning System: Fast Plan Generation Through Heuristic Search, Journal of Artificial Intelligence Research, Vol 14, 253-301.
- [57] Horn, A., 1951. On Sentences Which Are True of Direct Unions of Algebras, J. Symbolic Logic 16, 14-21.

- [58] Hsu, C. W., Wah, B. W., Huang, R., and Chen, Y. X., 2006. Handling Soft Constraints and Preferences in SGPlan, Proc. ICAPS Workshop on Preferences and Soft Constraints in Planning.
- [59] HTTP, Hyper Text Transfer Protocol, <http://www.w3.org/Protocols/>
- [60] IBM SOAP, <http://www.ibm.com/developerworks/lotus/library/web-services1/>
- [61] IPC, 2004. International Planning Competition 2004, <http://ls5-www.cs.uni-dortmund.de/~edelkamp/ipc-4/>
- [62] IPC-5, Benchmark Domains and Problems, <http://zeus.ing.unibs.it/ipc-5/>
- [63] JPlan: Java Graphplan Implementation, <http://sourceforge.net/projects/jplan>
- [64] Kautz, H., and Selman, B., 1992. Planning as Satisfiability, in Proceedings of the 10th European Conference on Artificial Intelligence, Vienna, Austria, pp. 359-363.
- [65] Kautz, H., and Selman, B., 1996. Pushing the Envelope: Planning, propositional logic and stochastic search, In Proceedings of the 13th National Conference on Artificial Intelligence, Portland, Oregon, pp. 1194-1201.
- [66] Kautz, H., and Selman, B., 1998. BLACKBOX: A new Approach to the application of theorem proving to problem solving, In Proceedings of the AIPS-98 Workshop on Planning as Combinatorial Search, Pittsburgh, Pennsylvania, pp.58-60.
- [67] Kavantzaz, N., Burdett, D. Ritzinger, G., Fletcher, T., Lafon, Y., 2004. Web Services Choreography Description Language (WS-CDL), Version 1.0, <http://www.w3.org/TR/2004/WD-ws-cdl-10-20041217/>
- [68] Klusch, M., Gerber, A., Schmidt, M., 2005. Semantic Web Service Composition Planning with OWLS-XPlan. AAAI Fall Symposium on Semantic Web and Agents, USA, 2005.
- [69] Knoblock, C.A., and Yang, Q. 1993. A Comparison of the SNLP and TWEAK Planning Algorithms. In Working Notes of the AAAI Spring Symposium Series: Foundations of Automatic Planning: The Classical Approach and Beyond, pp 73-77

- [70] Koehler, J., Nebel, B., Hoffman, J., Dimopoulos, Y., 1997. Extending Plan Graphs to an ADL Subset, In Proceedings of the 4th European Conference on Planning, Toulouse, France, pp. 273-285.
- [71] Laborie, P., and Ghallab, M., 1995. IxTeT, an Integrated Approach to Plan Generation and Scheduling, In Proceedings of the Joint IEEE/INRIA Conference on Emerging Technologies for Factory Automation, Paris, France, pp. 485-495.
- [72] Leymann F., 2001. Web Services Flow Language (WSFL 1.0), IBM. <http://www-3.ibm.com/software/solutions/webservices/pdf/WSFL.pdf>
- [73] Levesque, H., Reiter, R., Lesperance, Y., Lin, F., and Scherl, R., 1997. GOLOG: A logic programming language for dynamic domains. Journal of Logic Programming, 31, 59-84.
- [74] Long, D. and Fox, M., 1998. Efficient Implementation of the Plan Graph in STAN, Journal of Artificial Intelligence Research, Vol 10, pp. 87-115.
- [75] Loveland, D. W., 1978. Automated Theorem Proving: A Logical Basis. Fundamental Studies in Computer Science Volume 6. North-Holland Publishing.
- [76] Maedche A. and Zacharias, V., 2002. Clustering Ontology-Based Metadata in the Semantic Web, European Conf. Principles of Data Mining and Knowledge Discovery.
- [77] Martinez, E., Lesperance, Y., 2004. Web service composition as a planning task: Experiments using knowledge-based planning, In Proceedings of the ICAPS-2004 Workshop on Planning and Scheduling for Web and Grid Services, pp. 62-69.
- [78] McAllester, D. and Rosenblitt, D. 1991. Systematic nonlinear planning, In Proceedings of the 9th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-91), Anaheim, California, pp. 634-639.
- [79] McCarthy, J. and Hayes, P., 1969. Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence, Machine Intelligence, vol. 4, pp. 463-502.
- [80] McCluskey, T. L., Liu, D., Simpson, R. M., 2003. GIPO II: HTN Planning in a Tool-supported Knowledge Engineering Environment, International Conference on

Automated Planning and Scheduling (ICAPS) / Conference on Artificial Intelligence Planning Systems (AIPS).

- [81] McDermott, D. 1996. A Heuristic Estimator for Means-ends Analysis in Planning. In Proc. International Conference on AI Planning Systems, 142–149.
- [82] McDermott, D., 1998. The 1998 AI Planning Systems Competition, *AI Magazine* 2 (2), pp. 35—55.
- [83] McDermott, D. 1999. Using Regression-match Graphs to Control Search in Planning. *Artificial Intelligence* 109(1–2):111–159.
- [84] McDermott, D., 2002. Estimated-regression planning for interactions with web services. In Proceedings of the 6th International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems.
- [85] McDermott, D., 2003. Opt manual, <http://www.cs.yale.edu/~dvm/papers/opt-manual.ps>
- [86] McIlraith, S. and Son, T., 2002. Adapting Golog for Composition of Semantic Web Services, Proceedings of the Eighth International Conference on Knowledge Representation and Reasoning (KR2002), pages 482-493.
- [87] McIlraith, S., Son, T. C. and Zeng, H., 2001. Semantic Web Services, *IEEE Intelligent Systems. Special Issue on the Semantic Web.* 16(2):46—53.
- [88] Medjahed, B., Bouguettaya, A., 2003. Elmagarmid, A.K.: Composing Web services on the Semantic Web. *VLDB J.* 333-351
- [89] Milanovic, N., & Malek, M., 2004. Current solutions for Web service composition. *IEEE Internet Computing*, 8(6), 51 – 59
- [90] Muscettola, N., 1994. HSTS: Integrating Planning and Scheduling. In *Intelligent Scheduling*, eds Zweben, M., and Fox, M.S., Morgan Kauffmann.
- [91] Narayanan, S., McIlraith, S., 2002. Simulation, verification and automated composition of web services, Proceedings of the 11th international conference on World Wide Web, Honolulu, Hawaii, USA.

- [92] Newell, A. and Simon, H.A., 1963. GPS, a Program that Simulates Human Thought, Computers and Thought, eds Feigenbaum and Feldman, McGraw-Hill, N.Y., pp 279-293.
- [93] Nilsson, N. J., 1998. Artificial intelligence: a new synthesis, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA.
- [94] OAS, Oracle Application Server, <http://www.oracle.com/appserver/index.html>
- [95] OBPM, Oracle BPEL Process Manager, <http://www.oracle.com/technology/products/ias/bpel/index.html>
- [96] OWL, Web Ontology Language, 2004. <http://www.w3.org/TR/owl-ref/>
- [97] OWL API, <http://owlapi.sourceforge.net/>
- [98] OWL-S, Semantic Markup for Web Services, OWL-S 1.1. <http://www.daml.org/services/owl-s/1.1/>
- [99] OWL-S API, <http://www.mindswap.org/2004/owl-s/api/>
- [100] OWLS-TC version 2.2 revision 1, <http://projects.semwebcentral.org/projects/owl-s-tc/>
- [101] Pan, J. Z., Serafini, L., Zhao, Y., 2006. Semantic Import: An Approach for Partial Ontology Reuse, 1st International Workshop on Modular Ontologies, WoMO'06, co-located with the International Semantic Web Conference, ISWC'06, Athens, Georgia, USA.
- [102] Paolucci, M., Kawmura, T., Payne, T., Sycara, K., 2002. Semantic Matching of Web Services Capabilities, First International Semantic Web Conference.
- [103] PDDL4J project, 2008. <http://sourceforge.net/projects/pdd4j>
- [104] Peer, J., 2005. Web service composition as AI planning - a Survey. Technical report, University of St. Gallen, Second revised version.
- [105] Pegram, D. A., St. Amant, R., and Riedl, M. O., 1999. An approach to visual interaction in mixed-initiative planning. Mixed-Initiative Intelligence workshop, AAAI-99.

- [106] Penberthy, J. S., and Weld, D. S. 1992. UCPOP: A Sound, Complete, Partial Order Planner for ADL. In Proceedings of the Third International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'92), 102-114.
- [107] Piccinelli, G., 1999. Service Provision and Composition in Virtual Business Communities, Tech. Report HPL-1999-84, Hewlett-Packard, Palo Alto, CA. <http://www.hplhp.com/techreports/1999/HPL-1999-84.html>
- [108] Pistore, M., Barbon, F., Bertoli, P., Shaparau, D., Traverso, P., 2004. Planning and Monitoring Web Service Composition, Artificial Intelligence: Methodology, Systems, Application (AIMSA) 2004
- [109] Pistore, M., Marconi, A., Bertoli, P. and Traverso, P., 2005. Automated Composition of Web Services by Planning at the Knowledge Level, in proceedings of the 19th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 05), Edinburgh, UK.
- [110] PL-Plan, a Java Open-Source AI Planner, <http://plplan.philippe-fournier-viger.com/>
- [111] Ponnekanti, S.R. and Fox, A., 2002. SWORD: A Developer Toolkit for Web Service Composition, Proceedings of WWW 2002 Conference, Elsevier, pp. 83-107.
- [112] Rao, J., K ngas, P., Matskin, M., 2003. Application of Linear Logic to Web Service Composition. In Proceedings of the First International Conference on Web Services, ICWS'2003, Las Vegas, Nevada, USA, CSREA Press, pp. 3-9, 2003.
- [113] Rao, J. and X. Su, 2004. A Survey of Automated Web Service Composition Methods. Lecture Notes in Computer Science, Volume 3387/2005, Springer, p. 43-54.
- [114] Reiter, R., 1991. The frame problem in the situation calculus: a simple solution (sometimes) and a completeness result for goal regression. In Artificial intelligence and mathematical theory of computation: papers in honour of John McCarthy, Vladimir Lifshitz (editor), pages 359–380, San Diego, CA, USA. Academic Press Professional, Inc.
- [115] RMI, Java Remote Method Invocation, <http://java.sun.com/javase/technologies/core/basic/rmi/index.jsp>
- [116] Sacerdoti, E., 1974. Planning in a hierarchy of abstraction spaces, Artificial Intelligence, Vol 5, pp. 115-135.

- [117] SATPLAN, 2004. <http://www.cs.rochester.edu/u/kautz/satplan/>
- [118] SAWSDL, Semantic Annotations for WSDL, <http://www.w3.org/2002/ws/sawSDL/>
- [119] Schlicht, A., Stuckenschmidt, H., 2008. Towards Distributed Ontology Reasoning for the Web, IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence 2008.
- [120] SemWebCentral, <http://www.semwebcentral.org/>
- [121] Sirin, E., Parsia, B., Grau, B., Kalyanpur, A. and Katz, Y., 2007. Pellet: A Practical OWL DL Reasoner, J. Web Semantics.
- [122] Sirin, E., Parsia, B., Wu, D., Hendler, J. and Nau, D., 2004. HTN planning for web service composition using SHOP2. Journal of Web Semantics, 1(4) 377–396.
- [123] SKOS, Simple Knowledge Organization System, <http://www.w3.org/2004/02/skos/>
- [124] SNARK, SRI's New Automated Reasoning Kit, <http://www.ai.sri.com/~stickel/snark.html>
- [125] SOAP, Simple Object Access Protocol, <http://www.w3.org/TR/soap/>
- [126] SOASPECS, <http://www.soaspecs.com/page3.asp>
- [127] Srivastava, B. and Koehler, J., 2003. Web Service Composition - Current Solutions and Open Problems. ICAPS 2003 Workshop on Planning for Web Services.
- [128] SUMO, Suggested Upper Merged Ontology, <http://www.ontologyportal.org/>
- [129] Thatte S., 2001. XLANG: Web Services for Business Process Design, Microsoft, http://www.gotdotnet.com/team/xml_wsspecs/xlang-c/default.htm
- [130] Thatte S. (ed.), 2003. Business Process Execution Language for Web Services (BPEL4WS) (Version 1.1), <http://www.ibm.com/developerworks/library/specification/ws-bpel/>
- [131] Tsoumakas, G., Meditskos, G., Vrakas, D., Bassiliades, N., Vlahavas, I., 2005. Web Services for Adaptive Planning, Planning, Scheduling and Constraint Satisfaction: From Theory to Practice, Volume 117, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, Edited by: L. Castillo, D. Borrajo, M.A. Salido and A. Oddi, IOS Press, pp. 159-168.

- [132] UDDI Specification, 2004. http://www.uddi.org/pubs/uddi_v3.htm
- [133] UML, Unified Modeling Language, <http://www.uml.org/>
- [134] Vrakas, D., Refanidis, I., Milcent, F., Vlahavas, I., 1999. On the Parallelization of Greedy Regression Tables, In Proceedings of the 18th Workshop of the UK Planning and Scheduling Special Interest Group, Manchester, UK, pp. 180-189.
- [135] Vrakas, D., Hatzi, O., Bassiliades, N., Anagnostopoulos, D., Vlahavas, I., 2008. A Visual Programming Tool for Designing Planning Problems for Semantic Web Service Composition, Visual Languages for Interactive Computing: Definitions and Formalizations, F. Ferri (Ed.), Idea Group Publishing, pp. 302 - 326.
- [136] Vrakas, D., Refanidis, I., Vlahavas, I., 2001. Parallel Heuristic Planning via the Distribution of Operators, Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, Vol 13 (3), pp. 211-226.
- [137] Vrakas, D., Vlahavas, I., 2005. Hybrid AcE: Combining Search Directions for Heuristic Planning”, Computational Intelligence, Blackwell, 21(3), pp. 306-331.
- [138] Vrakas, D., Tsoumakas, G., Bassiliades, N., Vlahavas, I., 2005. HAPrc: An Automatically Configurable Planning System”, AI Communications, 18 (1), pp. 1-20.
- [139] W3C OWL-S, <http://www.w3.org/Submission/OWL-S/>
- [140] W3C, The World Wide Web Consortium, <http://www.w3.org/>
- [141] W3C WS, Web Services Activity, <http://www.w3.org/2002/ws/>
- [142] Waldinger, R., 2001. Web agents cooperating deductively. In Proceedings of FAABS 2000, Greenbelt, MD, USA. Volume 1871 of Lecture Notes in Computer Science, pages 250-262, Springer-Verlag.
- [143] Wang, Y., Haase, P., Bao, J., 2007. A Survey of Formalisms for Modular Ontologies, International Joint Conference on Artificial Intelligence 2007 (IJCAI'07) Workshop SWeCKa . Hyderabad, India.
- [144] WAS, WebSphere Application Server, <http://www-01.ibm.com/software/webservers/appserv/was/>

- [145] WBISF, WebSphere Business Integration Server Foundation, <http://www-01.ibm.com/software/integration/wbisf/>
- [146] Weld, D., 1999. Recent Advances in AI Planning, *AI Magazine*, 20:2.
- [147] Wilkins, D. E., 2000. SIPE-2: System for Interactive Planning and Execution, <http://www.ai.sri.com/~sipe/>
- [148] Wilkins D. E., Myers K. L., 1994. A Common Knowledge Representation for Plan Generation and Reactive Execution. SRI International. Artificial Intelligence Center.
- [149] WfMC, Workflow Management Coalition, <http://www.wfmc.org/>
- [150] WS-arch, Web Services Architecture, <http://www.w3.org/TR/ws-arch/>
- [151] WS Architecture, http://en.wikipedia.org/wiki/Web_service
- [152] WS-BPEL2, Web Services Business Process Execution Language Version 2.0, <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.html>
- [153] WS-I, Web Services Interoperability Consortium, <http://www.ws-i.org/>
- [154] WSCL, 2002. Web Services Conversation Language, <http://www.w3.org/TR/wscl10/>
- [155] WSDL, Web Services Description Language, <http://www.w3.org/TR/wsdl>
- [156] WSDL-S, <http://www.w3.org/Submission/WSDL-S/>
- [157] WSDL Structure, http://www.imsglobal.org/gws/gwsv1p0/msgws_wsdlBindv1p0.html
- [158] WSDP, Java Web Services Developers Pack <http://java.sun.com/webservices/downloads/previous/index.jsp>
- [159] WSMO, Web Service Modeling Ontology, <http://www.wsmo.org/>
- [160] XPDL, XML Process Definition Language, <http://www.wfmc.org/xpdl.html>
- [161] Yang, Q., and Tenenber, J., 1990. AbTWEAK: Abstracting a nonlinear least commitment planner. In *Proceedings of the 8th National Conference on Artificial Intelligence*, Boston, MA, pp. 204-209.

- [162] Yu, H. Q., & Reiff-Marganiec, S., 2006. Semantic Web Services composition via Planning as Model Checking. Technical Report, Department of Computer Science, University of Leicester, UK.
- [163] Βλαχάβας, Ι., Βασιλειάδης, Ν., Κόκκορας, Φ., κ.α., 2006. Τεχνητή Νοημοσύνη, Εκδόσεις Γκιούρδα.
- [164] Βράκας, Δ., 2004. Ευφυή Συστήματα Σχεδιασμού Ενεργειών, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πληροφορικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Ορολογία

abstract process	αφηρημένη διεργασία
action	ενέργεια
action schemas	πρότυπα ενεργειών
activity	δραστηριότητα
application server	εξυπηρετής εφαρμογών
axiom	αξίωμα
backward analysis	ανάστροφη ανάλυση
backward chaining	ανάστροφη συλλογιστική
base ontologies	οντολογίες βάσης
business interaction protocol	επιχειρησιακό πρωτόκολλο αλληλεπίδρασης
business process	επιχειρησιακή διεργασία
business process integration	ολοκλήρωση επιχειρησιακών διεργασιών
centralized execution	κεντροποιημένη εκτέλεση
client	εξυπηρετούμενος
closed-world assumption	υπόθεση κλειστού κόσμου
composability rules	κανόνες σύνθεσης
composition soundness	ορθότητα σύνθεσης
compound task	σύνθετη εργασία
computational complexity	υπολογιστική πολυπλοκότητα
concept relevance	σχετικότητα εννοιών
consistency	συνέπεια
constants	σταθερές
consumer	καταναλωτής
data dependency	εξάρτηση δεδομένων
deletion	διαγραφή
disjoint	ξένος, μη επικαλυπτόμενος
distributed execution	κατανεμημένη εκτέλεση
domain	πεδίο ορισμού
durative action	τελεστής διαρκείας
entity – relationship model	μοντέλο οντοτήτων - συσχετίσεων
equivalent concepts	ισοδύναμες έννοιες
estimated-regression	εκτίμηση αναγωγής
exception	εξάιρεση
executable business process	εκτελέσιμη επιχειρησιακή διεργασία
execution	εκτέλεση
execution engine	μηχανή εκτέλεσης
expression evaluation	αποτίμηση εκφράσεων
extended goal	επεκταμένος στόχος
extended notation	επεκταμένη σημειογραφία
fact	γεγονός
forward search	ορθή αναζήτηση
goal	στόχος

heuristic estimator	ευριστικός εκτιμητής
hierarchical task network planning	σχεδιασμός σε ιεραρχικά δίκτυα διεργασιών
import axioms	εισαγόμενα αξιώματα
inferencing	συμπερασμός
inheritance	κληρονομικότητα
initial state	αρχική κατάσταση
intelligent agent	ευφυής πράκτορας
interaction protocol	πρωτόκολλο αλληλεπίδρασης
interface	διεπαφή
Internet	Διαδίκτυο
interoperability	διαλειτουργικότητα
intersection	τομή
knowledge representation	αναπαράσταση γνώσης
manually	μη αυτόματα
markup constructs	δομές επισημάνσης
message exchange	ανταλλαγή μηνυμάτων
Minimum Domain Ontology Set (MDOS)	Ελάχιστο Σύνολο Οντολογιών του Πεδίου Ορισμού
model checking	έλεγχος μοντέλων
model-theoretic	μοντελοθεωρητικό
monitoring	παρακολούθηση
non-determinism	μη ντετερμινισμός
numeric expressions	αριθμητικές εκφράσεις
ontology	οντολογία
ontology reasoning	συλλογιστική σε οντολογίες
operator	τελεστής
OWL Ontology Manager (OOM)	Διαχειριστής Οντολογιών OWL (ΔΟΟ)
partial observability	δυνατότητα μερικής παρατήρησης
plan	πλάνο
planner	σχεδιαστής ενεργειών
planning	σχεδιασμός ενεργειών
planning domain	πεδίο ορισμού σχεδιασμού ενεργειών
planning problem	πρόβλημα σχεδιασμού ενεργειών
precondition	προϋπόθεση
predicate	κατηγορημα
primitive task	πρωταρχική διεργασία
problem space	χώρος προβλήματος
quality assessment	αποτίμηση ποιότητας
reasoner	εργαλείο συλλογιστικής
reasoning	συλλογιστική
regression	αναγωγή
regression graph	γράφος αναγωγής
relational fluent	σχεσιακή μεταβλητή
relationship	συσχέτιση
relaxation	χαλάρωση
remote procedure call	απομακρυσμένη κλήση διεργασίας
safety constraint	περιορισμός ασφάλειας

semantic	σημασιολογικός
semantic awareness	σημασιολογική επίγνωση
semantic model	σημασιολογικό μοντέλο
semantic relaxation	σημασιολογική χαλάρωση
Semantic Web	Σημασιολογικός Ιστός
semantic web service composition	σημασιολογική σύνθεση διαδικτυακών υπηρεσιών
situation calculus	λογισμός καταστάσεων
soundness	ορθότητα
state	κατάσταση
state space	χώρος καταστάσεων
string	αλφαριθμητικό
switch	διακόπτης
task	εργασία
task network	δίκτυο εργασιών
temporal annotations	χρονικές σημάνσεις
temporal formula	χρονικός τύπος
timeless literal	κατηγορημα ανθεκτικό στο χρόνο
timeless unary predicate	μοναδιαίο ανθεκτικό στον χρόνο κατηγορημα
transfer protocol	πρωτόκολλο μεταφοράς
type	τύπος
union	ένωση
Universal Resource Identifier (URI)	Ενιαίος Προσδιοριστής Πόρων
validation	επικύρωση
variables	μεταβλητές
web service	διαδικτυακή υπηρεσία
workflow	ροή εργασιών
workflow	ροή εργασιών
workflow composition	σύνθεση ροής εργασιών
World Wide Web	Παγκόσμιος Ιστός