

***Το Qualification Πρόβλημα
Στη Ρομποτική***



**Κωνσταντίνος Πετρόπουλος
Α.Μ. 4315
Επιβλέπων Καθηγητής: Νίκος Παπαδάκης**



Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Ηράκλειο, Ιανουάριος 2012

***To Qualification
Πρόβλημα
Στη Ρομποτική***

Πετρόπουλος Κωνσταντίνος

Επιβλέπων : Παπαδάκης Νικόλαος

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Δρ. Νίκο Παπαδάκη κυρίως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, και την υπομονή που έκανε κατά τη διάρκεια υλοποίησης της πτυχιακής εργασίας. Όπως επίσης και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του, για την επίλυση διάφορων θεμάτων.

Θα θελα επίσης να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στους γονείς μου, οι οποίοι στήριξαν τις σπουδές μου με διάφορους τρόπους, φροντίζοντας για την καλύτερη δυνατή μόρφωση μου.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
1. Εισαγωγή.....	5
2. Βασικές Έννοιες.....	6
3. Οι Συχνές Αλλαγές Της Θεωρίας Της Δράσης.....	9
4. Συμβολισμοί.....	12
5. Βασική Θεωρία Δράσης.....	14
6. Ορισμοί.....	16
7. Οι Πιο Σημαντικές Λύσεις.....	37
8. Σύνοψη και Επίλογος.....	42
9. Αναφορές.....	49

1. Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία μελέτησα το qualification πρόβλημα στη ρομποτική. Το πρόβλημα αυτό είναι ευρύτερο και εμφανίζεται σε πολλές περιοχές τις πληροφορικής. Όπως είναι η ρομποτική, η τεχνολογία λογισμικού, οι βάσεις δεδομένων και η αναπαράσταση γνώσης. Εμείς επικεντρωνόμαστε στην ρομποτική. Η εργασία αποτελεί βιβλιογραφική έρευνα των πιο σημαντικών λύσεων που έχουν προταθεί και βασίστηκε σε μεγάλο βαθμό στην εργασία του Michael Thielscher <<challenges for action theories>>.

Προτού συζητήσουμε το σκοπό των θεωριών δράσης, ας προσπαθήσουμε να δώσουμε έναν κατάλληλο και συμπαγή ορισμό του εν λόγω θέματος:

Μια θεωρία δράσης αποτελείται από μια επίσημη γλώσσα που επιτρέπει τις επαρκείς προδιαγραφές των τομέων/πεδίων και σεναρίων δράσης και μας λέει ακριβώς ποια συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν από αυτές τις προδιαγραφές. Φυσικά αυτός ο άτυπος ορισμός δε μπορεί να εκτιμηθεί χωρίς περαιτέρω διευκρίνιση των κρίσιμων όρων που χρησιμοποιούνται σε αυτόν

2. Βασικές Έννοιες

Τομέας/ Πεδίο Δράσης : εννοούμε οποιαδήποτε πτυχή του κόσμου που αξίζει τυποποίηση στην οποία η εκτέλεση των δράσεων - ενεργειών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Αυτό συμβαίνει , για παράδειγμα, εάν κάποιος θέλει να διαμορφώσει έναν παράγοντα(/έναν συντελεστή/ μια δύναμη) που αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του, δηλαδή, το μέρος του κόσμου που είναι σε θέση να επηρεάσει/ να προκαλέσει επιπτώσεις. Επιπλέον , ένας αυτόνομος παράγοντας χρειάζεται ακριβείς γνώσεις ως προς τις επιπτώσεις των ενεργειών του, προκειμένου να ενεργεί με γνώμονα το σκοπό κι έτσι να πετύχει τους προκαθορισμένους στόχους. Το τελευταίο απαιτεί να αντληθούν τα σωστά συμπεράσματα από αυτή τη γνώση λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες καταστάσεις, στις οποίες ο παράγοντας έχει αποκτήσει μερική γνώση για την τρέχουσα κατάσταση του περιβάλλοντος κι έχει συγκεκριμένο στόχο στο μυαλό.

Σενάριο Δράσης : εννοούμε ακριβώς αυτές τις ιδιαίτερες καταστάσεις ,λαμβάνοντας υπόψη κάποιες πληροφορίες για την παρούσα, παρελθοντική ή ακόμα και τη μελλοντική ή αντίστροφη κατάσταση του κόσμου. Ο στόχος στη συνέχεια είναι να ερμηνευθούν κατάλληλα αυτές οι παρατηρήσεις έτσι ώστε να μπορούν να

εξαχθούν σωστά συμπεράσματα. Οι θεωρίες δράσης το παρέχουν αυτό. Περιλαμβάνουν μια επίσημη συνεπαγωγική λειτουργία που καθορίζει το σύνολο των συμπερασμάτων που επιτρέπει ένα σενάριο μέσα σ' έναν τομέα/ πεδίο δράσης. Τόσο ένας γενικός τομέας/ πεδίο δράσης όσο και ένα συγκεκριμένο σενάριο προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας την επίσημη γλώσσα που κρύβεται πίσω από μια θεωρία δράσης. Αυτή η γλώσσα καθορίζει την εκφραστικότητα της θεωρίας. Υπάρχουν θεωρίες δράσης που υποστηρίζουν τον προσδιορισμό των ενεργειών με μη στοχαστικά αποτελέσματα (όπως το κύλισμα ενός ζαριού) κι άλλες όχι. Το κατά πόσο μια θεωρία δράσης είναι κατάλληλη για μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από την απαιτούμενη εκφραστικότητα. Εάν για παράδειγμα η εφαρμογή αρκείται στο να εξετάζει μόνο διακριτές/ ξεχωριστές μεταβάσεις καταστάσεων, τότε δεν υπάρχει ανάγκη να απασχοληθεί μια θεωρία δράσης που είναι σχεδιασμένη για τη διαμόρφωση συνεχών μεταβολών. Τα δύο θέματα που συζητούνται σε αυτό το βιβλίο, οι έμμεσες επιδράσεις/ επιπτώσεις και τα προσόντα των δράσεων, είναι αναμφισβήτητα θεμελιώδη ζητήματα και πρέπει να ενσωματωθούν από οποιαδήποτε θεωρία δράσης αποσκοπεί να αντιμετωπίσει άλλων από τεχνητά απλοποιημένους τομείς.

Παρόλα αυτά, η αθώα λέξη «επαρκής» που ο αναγνώστης μπορεί και να έχει αγνοήσει στον παραπάνω ορισμό, είναι πιθανώς το κρισιμότερο στοιχείο. Αυτό σημαίνει ότι η προδιαγραφή των δράσεων και των επιπτώσεων τους πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο φυσικά. Για παράδειγμα, δε θα ήταν μόνο ενοχλητικό αλλά σαφώς περισσότερο αφύσικο να δηλώνεται ρητά το αποτέλεσμα της εκτέλεσης μιας δράσης σε κάθε δυνατή κατάσταση. Αυτό θα μπορούσε να διευκρινιστεί με το εξής παράδειγμα, μετακινώντας την εφημερίδα προκαλείται αλλαγή στη θέση της ασχέτως τι χρώμα έχει ή σε ποιό κόμμα ανήκει ο τρέχων πρόεδρος κτλ. Κατά τον ίδιο τρόπο κάποιος θα ήθελε να αποφύγει τον επαναπροσδιορισμό των επιπτώσεων της μεταφοράς ενός αντικειμένου σε περίπτωση που αυτό περιέχει (ή είναι κάτω από ή συνδέεται με κτλ) ένα άλλο αντικείμενο. Μάλλον το γεγονός ότι αυτό το πρόσθετο αντικείμενο αλλάζει επίσης τη θέση του θα πρέπει να προκύπτει από τη γενική γνώση του κόσμου. Σύμφωνα με όλα αυτά, οι θεωρίες δράσης πάντα περιλαμβάνουν μια περισσότερο ή λιγότερο υπονοούμενη γενική έννοια του χρόνου, της αλλαγής και της αιτιότητας. Αυτό δείχνει ότι η απαίτηση επάρκειας είναι αυτό που κάνει τις θεωρίες δράσης τόσο ξεχωριστές .

3. Οι Συχνές Αλλαγές Της Θεωρίας Της Δράσης

Οι θεωρίες δράσης έχουν πολλά κοινά με τη λογική. Βασίζονται σε μια επίσημη γλώσσα και περιλαμβάνουν μια συνεπαγωγική σχέση ανάμεσα στις εκφράσεις αυτής της γλώσσας. Αυτή η σχέση καθορίζει τον τρόπο που εξαγονται συμπεράσματα από τις προδιαγραφές. Ωστόσο η συνεπαγωγή στις θεωρίες δράσης είναι κάπως διαφορετική από τη συνεπαγωγή στις λεγόμενες λογικές γενικού σκοπού, όπως η κλασσική λογική πρώτης τάξης/ πρώτου βαθμού για παράδειγμα. Ο λόγος είναι ότι η συνεπαγωγική σχέση αντικατοπτρίζει τις ειδικές/ ιδιαίτερες έννοιες της αλλαγής και της αιτιότητας που είναι συνυφασμένες με τις θεωρίες δράσης. Κάτι τέτοιο κάνει τον επίσημο ορισμό για το πως να εξαχθούν συμπεράσματα πολύ πιο περίπλοκο σε σύγκριση με την πλειοψηφία των λογικών γενικού σκοπού. Αυτό σημαίνει επίσης ότι τυχόν εμπλουτισμός της οντολογίας μιας θεωρίας δράσης απαιτεί αλλαγές στον ορισμό της συνεπαγωγής.

Τόσο η θεμιτή πολυπλοκότητα όσο και οι συχνές αλλαγές της έννοιας της συνεπαγωγής στις θεωρίες δράσης αποτελούν ένα σημαντικό μειονέκτημα λαμβάνοντας υπόψη την αυτοματοποίηση του συλλογισμού. Αυτό ευνοεί τις λογικές γενικού σκοπού ως μέσα γι'αυτόν το σκοπό. Η έρευνα στην

αυτοματοποιημένη αφαίρεση/ μείωση (automated deduction) στη λογική πρώτου βαθμού, για παράδειγμα, έχει σημειώσει αξιοσημείωτη πρόοδο τις τελευταίες δεκαετίες. Θα ήταν ίσως παράλογο να μην εκμεταλλευτούμε αυτήν την εξέλιξη για την αυτοματοποίηση του συλλογισμού σε τομείς/ πεδία δράσης.

Ευτυχώς αυτό μπορεί να επιτευχθεί χωρίς απώλεια του σημαντικότερου πλεονεκτήματος των θεωριών δράσης, δηλαδή, η φυσικότητα τους όταν πρόκειται για την τυποποίηση των τομέων/ πεδίων και των σεναρίων. Αυτό που πρέπει να γίνει προς αυτήν την κατεύθυνση είναι να θεμελιωθούν, για παράδειγμα, στη λογική πρώτου βαθμού τα χαρακτηριστικά μιας θεωρίας δράσης. Με άλλα λόγια, η υπονοούμενη/ έμμεση θεωρία της αλλαγής και αιτιότητας να καταστεί σαφής.

Κοινώς ονομάζουμε «θεμελιώδη αξιώματα» την προκύπτουσα κωδικοποίηση που χαρακτηρίζει μια θεωρία δράσης. Τα πρόσθετα αξιώματα λοιπόν, αντιπροσωπεύουν τη γνώση για έναν συγκεκριμένο τομέα/ πεδίο και σενάριο δράσης. Μαζί παρέχουν μια (ενδεχομένως) κατάλληλη κωδικοποίηση που επιτρέπει να αντληθούν όλα τα συμπεράσματα που προτείνονται από τη σχετική/ την υποκείμενη θεωρία δράσης αλλά με τη βοήθεια μιας λογικής γενικού σκοπού. Σημειώστε ότι

το ερώτημα εάν μια τέτοια κωδικοποίηση είναι κατάλληλη, είναι ένα συγκεκριμένο μαθηματικό πρόβλημα και λύνεται αποδεικνύοντας εάν τα αντλούμενα αποτελέσματα είναι ή όχι πάντα ίδια με αυτό που συνεπάγεται όσον αφορά τη θεωρία δράσης.

Αυτό παρέχοντας μια αιτιολόγηση για τη θεμελίωση αποτελεί σημαντικό σκοπό των θεωριών δράσης και την αγωνιστική δύναμη/ ισχύ για την ανάπτυξή τους.

4. Συμβολισμοί

Η μόνη απαιτούμενη εμπειρία για να κατανοήσουμε όλα τα μέρη του παρακάτω συγγράμματος είναι κάποιες βασικές γνώσεις της κλασικής λογικής.

Χρησιμοποιούμε τους τυποποιημένους λογικούς συνδέσμους, που δηλώνονται κατά φθίνουσα σειρά προτεραιότητας,

\neg (άρνηση),

\otimes (σύζευξη),

\vee (διάζευξη),

\Rightarrow (material implication),

\Leftrightarrow (ισοδυναμία),

\forall (καθολικός ποσοτικός προσδιορισμός, “για κάθε”),

\exists (υπαρξιακός ποσοτικός προσδιορισμός, “υπάρχει”).

Τα κύρια σύμβολα και οι σταθερές ξεκινούν με κεφαλαίο γράμμα ενώ τα σύμβολα συναρτήσεων και οι μεταβλητές είναι με μικρά γράμματα, ενίοτε με βάσεις ή εκθέτες.

Οι ελεύθερες μεταβλητές στους τύπους θεωρούνται γενικά ποσοτικές εκτός αν ορίζονται διαφορετικά. Τα ειδικά σύμβολα που χρησιμοποιούνται στα παραδείγματα τυπώνονται σε στυλ γραφομηχανής.

Χρησιμοποιούμε επίσης τις στοιχειώδεις πράξεις και σχέσεις,
 \cup (ένωση),
 \cap (τομή),
 \setminus (διαφορά),
 \in (συμμετοχή/ μέλος/ ανήκει),
 \subseteq, \supseteq (υποσύνολο και/ με ίσον, υπερσύνολο και/ με ίσον),
 \subsetneq, \supsetneq (σκέτο υποσύνολο και υπερσύνολο).

Όλα τα άλλα σύμβολα που χρησιμοποιούνται σε αυτό το σύγγραμμα εξηγούνται κατά τη διάρκεια της πρώτης εμφάνισής τους.

5. Βασική Θεωρία Δράσης

Έχοντας πει πολλά για τις θεωρίες δράσης σε γενικές γραμμές, μπορούμε τώρα να γίνουμε πιο επίσημοι και να εισάγουμε μια συγκεκριμένη, στοιχειώδη θεωρία δράσης που περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα βασικά συστατικά. Πρώτα απ' όλα οποιαδήποτε θεωρία δράσης πρέπει να παρέχει μέσα για την καταγραφή των *καταστάσεων*.

Μια *κατάσταση* είναι ένα στιγμιότυπο του τμήματος του κόσμου διαμορφωμένο σε μια συγκεκριμένη στιγμή του χρόνου. Οι περιγραφές καταστάσεων πρέπει να αποτελούνται από ατομικές προτάσεις.

Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για τους σκοπούς μας, δεδομένου ότι οι δράσεις/ ενέργειες επηρεάζουν κατά κανόνα μόνο ένα μικρό τμήμα του περιβάλλοντος και προκειμένου να επικεντρωθούμε σε αυτό το τμήμα κατά τον καθορισμό των αποτελεσμάτων μιας δράσης πρέπει να έχουμε πρόσβαση σε αυτό.

Σε αντίθετη περίπτωση, αν για παράδειγμα οι καταστάσεις παρουσιάζονταν ως αφηρημένα αντικείμενα χωρίς να φέρουν μια εσωτερική δομή (όπως είναι χαρακτηριστικό στη θεωρία των αυτομάτων), ο αντίκτυπος μιας δράσης/ ενέργειας δε θα μπορούσε παρά να καθορίζεται από έναν πλήρη πίνακα μεταβολής κατάστασης. Αυτό θα παραβίαζε τη πιο βασική απαίτηση για επάρκεια.

Οι ατομικές προτάσεις αντιπροσωπεύουν ιδιότητες, ή εν γένει σχέσεις μεταξύ των οντοτήτων, που διαθέτουν ή όχι σε συγκεκριμένη κατάσταση. Η πραγματική αξία οποιασδήποτε τέτοιας πρότασης μπορεί να μεταβληθεί με την πάροδο του χρόνου, ως συνέπεια μιας μεταβολής κατάστασης.

Λόγω αυτού του δυναμικού χαρακτηριστικού ο όρος ‘**ρευστός/ μεταβλητός**’ έχει καθιερωθεί ως ένα όνομα για αυτές τις προτάσεις. Συνεπώς μια κατάσταση χαρακτηρίζεται λέγοντας ποιες από τις διάφορες ‘**ρευστότητες/ μεταβλητότητες**’ είναι αληθείς και ποιές ψευδείς σε αυτή την κατάσταση.

6. Ορισμοί

Ορισμός 1

Έστω \mathbb{E} ένα πεπερασμένο σύνολο από σύμβολα που ονομάζονται οντότητες. Έστω \mathbb{F} ένα πεπερασμένο σύνολο από σύμβολα που ονομάζονται ρευστά ονόματα, καθένα από τα οποία συνδέεται μ' έναν φυσικό αριθμό (ενδεχομένως το μηδέν) που ονομάζεται βαθμός.

Η ρευστότητα εκφράζεται ως $f(e_1, \dots, e_n)$ όπου $f \in \mathbb{F}$ είναι η βαθμού και $e_1, \dots, e_n \in \mathbb{E}$. Α ρευστή πρόταση είναι μια ρευστότητα ή η άρνησή της, η οποία δηλώνεται ως $\neg f(e_1, \dots, e_n)$. Ένα σύνολο από ρευστές προτάσεις είναι ασυνεπές εάν περιέχει μια ρευστότητα μαζί με την άρνησή της, αλλιώς το σύνολο είναι συνεπές. Μια κατάσταση είναι ένα μέγιστο συνεπές σύνολο από ρευστές προτάσεις.

Πριν συνεχίσουμε ας περιγράψουμε τις έννοιες αυτές μ' ένα μικρό παράδειγμα. Σε πολλά σημεία σε αυτό το βιβλίο θα 'μοντελοποιήσουμε' τη συμπεριφορά των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Ας υποθέσουμε ότι ένα συγκεκριμένο κύκλωμα αποτελείται από δύο δυαδικούς διακόπτες, μια λάμπα και μια μπαταρία. Οι διάφορες καταστάσεις αυτού του συστήματος μπορούν να

περιγραφούν με τις δυο οντότητες $\mathbb{E} = \{s_1, s_2\}$ που εκπροσωπούν τους δυο διακόπτες, μαζί με την μοναδιαία (δέχεται μια παράμετρο) ρευστότητα up να δηλώνει τη θέση των παραμέτρων της και τη μηδενική (δεν δέχεται παραμέτρους) ρευστότητα $light$ να δηλώνει την κατάσταση της λάμπας. Η $up(s_2)$ και η $\neg light$, για παράδειγμα, είναι ρευστές προτάσεις, και η $\{-up(s_1), up(s_2), \neg light\}$ είναι ένα μέγιστο συνεπές σύνολο ρευστών προτάσεων, δηλαδή μια κατάσταση.

Ο αναγνώστης μπορεί να έχει παρατηρήσει ότι τυπικά οποιοσδήποτε συνδυασμός πραγματικών αξιών αποτελεί μια κατάσταση. Αργότερα σε αυτό το βιβλίο, στο κεφάλαιο 2, θα παρέχουμε τα μέσα για να διακρίνουμε καταστάσεις που δεν μπορούν να συμβούν λόγω συγκεκριμένων τομεακών εξαρτήσεων μεταξύ των ρευστοτήτων. Για λόγους ευκολίας εισάγουμε τους εξής συμβατικούς συμβολισμούς: Εάν ℓ είναι μια ρευστή πρόταση, τότε με $\mathbb{E} \models \ell$ δηλώνουμε το θετικό της περιεχόμενο, το οποίο είναι, $\mathbb{E} \models f(\bar{e})$ $= \mathbb{E} \models \neg f(\bar{e})$ $= f(\bar{e})$ όπου $f \in \mathbb{F}$ και \bar{e} είναι μια ακολουθία από n οντότητες, με n να δηλώνει το βαθμό του f . Αυτή η σημειογραφία επεκτείνεται σε σύνολα ρευστών προτάσεων S ως εξής: $\mathbb{E} \models S$ $= \{\mathbb{E} \models \ell : \ell \in S\}$. Για παράδειγμα, κάθε φορά που το S είναι μια κατάσταση, τότε το $\mathbb{E} \models S$ είναι το σύνολο όλων των ρευστοτήτων. Εάν ℓ είναι μια αρνητική ρευστή

πρόταση, τότε η $\neg \ell$ πρέπει να ερμηνευθεί ως $\ell \in S$. Με άλλα λόγια, $\neg\neg f(\bar{e}) = f(\bar{e})$. Τέλος, εάν S είναι ένα σύνολο ρευστών προτάσεων, τότε με $\neg S$ δηλώνουμε το σύνολο $\{\neg \ell : \ell \in S\}$. Για παράδειγμα, ένα σύνολο S ρευστών προτάσεων είναι ασυνεπές εάν $S \cap \neg S \neq \{\}$.

Η δεύτερη θεμελιώδης έννοια σε οποιαδήποτε θεωρία δράσης είναι οι ίδιες οι δράσεις/ ενέργειες. Οι ενέργειες δημιουργούν μεταβολές καταστάσεων όταν εκτελούνται. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μια θεμελιώδης παραδοχή σχετικά με τις ενέργειες είναι ότι πάντα επηρεάζουν μόνο ένα μικρό τμήμα ενός ολόκληρου κόσμου. Η απαίτηση επάρκειας επιβάλλει ότι οι προδιαγραφές της δράσης επικεντρώνονται σε αυτό το τμήμα μόνο. Θυμηθείτε ότι η απόφαση να χωριστούν οι καταστάσεις σε ρευστές έχει γίνει έχοντας στο μυαλό ακριβώς αυτόν τον σκοπό. Το να περιγράψουμε το αποτέλεσμα/ την επίδραση μιας δράσης ισοδυναμεί με το να προσδιορίσουμε ποιες ρευστότητες (ρευστές προτάσεις) αλλάζουν την πραγματική τους αξία όταν η δράση εκτελείται. Για παράδειγμα, σβήνοντας τον δεύτερο διακόπτη, s_2 , πάντα έχει το αποτέλεσμα ότι η ρευστότητα $up(s_2)$ γίνεται ψευδής, ανεξάρτητα από τις τιμές όλων των άλλων ρευστοτήτων. Αυτό θα μπορούσε να γραφτεί ως

Σβήσιμο του s_2 μετατρέπει την $\{up(s_2)\}$ σε $\{\neg up(s_2)\}$
 (1.1)

Αυτό σημαίνει ότι η δράση/ ενέργεια σβήσιμο του s_2 μπορεί να εκτελεστεί σε οποιαδήποτε κατάσταση S η οποία ικανοποιεί την $up(s_2) \in S$, και η προκύπτουσα κατάσταση αποκτάται αντικαθιστώντας την $up(s_2)$ με την $\neg up(s_2)$ στην S . Έτσι εάν, για παράδειγμα, σβήναμε τον s_2 στην παραπάνω κατάσταση, $\{\neg up(s_1), up(s_2), \neg light\}$, τότε η προκύπτουσα κατάσταση θα ήταν $\{\neg up(s_1), \neg up(s_2), \neg light\}$.

Διευκρινίζοντας, η δράση στο παράδειγμα μας ήταν ιδιαίτερα εύκολη επειδή το αποτέλεσμα της είναι πάντα το ίδιο. Δεν είναι δύσκολο να φανταστεί κανείς πιο σύνθετες ενέργειες/ δράσεις που παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με την κατάσταση στην οποία εκτελούνται. Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να περιγράψουμε τι συμβαίνει εάν εναλλάξουμε το δεύτερο διακόπτη. Προφανώς υπάρχουν δύο καταστάσεις που πρέπει να εξεταστούν. Κατ' αρχάς, εάν ο διακόπτης βρίσκεται στην επάνω θέση (up) μετά την εναλλαγή θα πάει στην κάτω ($\neg up$) και δεύτερον εάν είναι ήδη στην κάτω θέση ($\neg up$) από την αρχή, τότε η εναλλαγή το μεταφέρει στη επάνω θέση (up). Δράσεις/ ενέργειες τέτοιου σύνθετου τύπου περιγράφονται από 2 ή περισσότερους 'νόμους' σε αντίθεση με την (1.1). Η

εναλλαγή του δεύτερου διακόπτη, για παράδειγμα, μπορεί να προσδιοριστεί από

Εναλλαγή του s_2 μετατρέπει την $\{ur(s_2)\}$
σε $\{\neg ur(s_2)\}$

Εναλλαγή του s_2 μετατρέπει την $\{\neg ur(s_2)\}$
σε $\{ur(s_2)\}$

Παρατηρείστε ότι εφόσον οι καταστάσεις είναι μέγιστα συνεπή σύνολα, πάντα περιέχουν είτε την $ur(s_2)$ ή την $\neg ur(s_2)$, τουλάχιστον στο παράδειγμά μας. Σε κάθε περίπτωση, συνεπώς, μόνο ένας από τους δύο 'νόμους' δράσης για την εναλλαγή του s_2 είναι εφαρμόσιμος και αποδίδει το αναμενόμενο αποτέλεσμα, δηλαδή αλλαγή στη θέση του διακόπτη.

Συχνά είναι βολικό να καθορίζεται μια ενέργεια ταυτόχρονα για μια ολόκληρη συλλογή από παρόμοιες οντότητες. Για το σκοπό αυτό, οι νόμοι δράσης πρέπει να περιέχουν μεταβλητές οι οποίες να μπορούν να αντικατασταθούν από οντότητες. Για παράδειγμα, οι δύο προδιαγραφές

Εναλλαγή(x) μετατρέπει $\{ur(x)\}$ σε $\{\neg ur(x)\}$
(1.2)

Εναλλαγή(x) μετατρέπει $\{\neg ur(x)\}$ σε $\{ur(x)\}$

περιγράφουν τι σημαίνει η εναλλαγή γενικά. Για να είμαστε περισσότερο ακριβείς, έστω ότι \bar{x} δηλώνει μια πεπερασμένη ακολουθία μεταβλητών που επιλέγεται από ένα δεδομένο σύνολο \mathbb{V} . Εάν το \bar{x} περιέχει τις μεταβλητές που εμφανίζονται σε μια έκφραση ξ , τότε αυτό γράφεται ως $\xi[\bar{x}]$. Έστω $\bar{x} = x_1, \dots, x_n$ τότε ένα παράδειγμα μιας έκφρασης $\xi[\bar{x}]$ επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας μια αντικατάσταση $\theta = \{x_1 \mapsto e_1, \dots, x_n \mapsto e_n\}$ στην έκφραση ξ , όπου $e_1, \dots, e_n \in \mathbb{E}$ είναι οντότητες. Ας υποθέσουμε ότι $\bar{e} = e_1, \dots, e_n$, τότε $\xi[\bar{x}] \theta$ γράφεται επίσης $\xi[\bar{e}]$. Δηλαδή, το παράδειγμα

$\alpha[s_2] = \text{εναλλαγή του } (s_2) \underline{\text{μετατρέπει την}} \{ \text{up}(s_2) \} \underline{\text{σε}} \{ \neg \text{up}(s_2) \}$

μπορεί να ληφθεί από την $\alpha(x) = \text{εναλλαγή}(x) \underline{\text{μετατρέπει}} \{ \text{up}(x) \} \underline{\text{σε}} \{ \neg \text{up}(x) \}$ με την αντικατάσταση $\{x \mapsto s_2\}$.

Αυτό τελικά μας οδηγεί στον επίσημο καθορισμό των δράσεων και των προδιαγραφών τους. Καλούμε ρευστές εκφράσεις κάθε $f(t_1, \dots, t_n)$ και την άρνησή της $\neg f(t_1, \dots, t_n)$ όπου f είναι ένα ρευστό όνομα βαθμού $n \geq 0$ και κάθε t_i είναι είτε μια οντότητα είτε μια μεταβλητή ($1 \leq i \leq n$).

Ορισμός 2

Έστω \mathbb{A} ένα πεπερασμένο σύνολο από ονόματα δράσης, καθένα από τα οποία συνδέεται με έναν φυσικό αριθμό (ενδεχομένως μηδέν) που ονομάζεται βαθμός. Μία δράση/ ενέργεια είναι ένας όρος $a(\bar{e})$ όπου $a \in \mathbb{A}$ και είναι βαθμού ίσου με το μήκος του \bar{e} . Ένας νόμος δράσης/ενέργειας είναι της μορφής

$$a(\bar{x}) \text{ μετατρέπει } C[\bar{x}] \text{ σε } E[\bar{x}]$$

όπου $a \in \mathbb{A}$ είναι βαθμού ίσου με το μήκος του \bar{x} και όπου $C[\bar{x}]$ και $E[\bar{x}]$ είναι σύνολα ρευστών εκφράσεων που πληρούν τα ακόλουθα. Και τα δύο σύνολα, $C[\bar{e}]$ και $E[\bar{e}]$, για κάθε \bar{e} , είναι συνεπή και $C[\bar{e}] = E[\bar{e}]$, δηλαδή, τα C και E πάντα αναφέρονται στις ίδιες ρευστότητες. Αν S είναι μια κατάσταση, τότε ένα παράδειγμα $a[\bar{e}]$ ενός νόμου δράσης, $a[\bar{x}] = a(\bar{x}) \text{ μετατρέπει } C[\bar{x}] \text{ σε } E[\bar{x}]$, έχει εφαρμογή στην S εάν $C[\bar{e}] \subseteq S$. Η εφαρμογή του $a[\bar{e}]$ στην S αποδίδει $(S \setminus C[\bar{e}]) \cup E[\bar{e}]$; Το τελευταίο ονομάζεται προκαταρκτικός διάδοχος κατάστασης της S και του $a[\bar{e}]$.

Ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει ότι η S είναι μια κατάσταση, τα $C[\bar{e}]$ και $E[\bar{e}]$ είναι συνεπή, και τα $C[\bar{e}] = E[\bar{e}]$ εγγυούνται ότι η $(S \setminus C[\bar{e}]) \cup E[\bar{e}]$ είναι και αυτή μια κατάσταση.

Μέχρι στιγμής έχουμε δει μόνο τις δράσεις που καθορίζουν το πολύ έναν προκαταρκτικό διάδοχο

κατάστασης όταν εκτελούνται. Χρειαστήκαμε δυο διαφορετικούς νόμους δράσης για να καθορίσουμε τα αποτελέσματα της εναλλαγής (x), αλλά οι δύο συνθήκες ήταν αμοιβαία αποκλειόμενες έτσι ώστε οι δύο νόμοι να μην εφαρμόζονται ποτέ ταυτόχρονα. Ωστόσο ο ορισμός 2 δεν αποκλείει την ύπαρξη δύο (ή περισσότερους) ταυτόχρονα ισχύοντες νόμους για την ίδια δράση.

Αυτή η δυνατότητα είναι απαραίτητη εάν κάποιος θέλει να περιγράψει δράσεις με απροσδιόριστα αποτελέσματα, οι αποκαλούμενες μη προσδιοριστικές δράσεις. Η ρίψη ενός νομίσματος είναι μια απλή δράση, η οποία προφανώς ανήκει σε αυτήν την κατηγορία. Αλλά ας το 'κολλήσουμε' αυτό στο δικό μας πεδίο, υποθέτοντας ότι είναι εντελώς σκοτάδι έτσι ώστε να είναι αδύνατο να 'ενημερωθούν' οι δυο διακόπτες χώρια.

Παρ' όλα αυτά θέλουμε να ανάψουμε έναν από τους δυο διακόπτες (γνωρίζοντας πως και οι δυο είναι σβηστοί). Εφαρμόζοντας αυτό το σχέδιο υπάρχουν δυο δυνατά αποτελέσματα: είτε ανάβουμε τον πρώτο είτε τον δεύτερο διακόπτη. Αυτό μπορεί να τυποποιηθεί με τους δυο παρακάτω νόμους δράσης

Θέτω σε λειτουργία τον έναν μετατρέπει το $\{\neg \text{up}(s_1)\}$
σε $\{\text{up}(s_1)\}$ (1. 3)

Θέτω σε λειτουργία τον έναν μετατρέπει το $\{\neg \text{up}(s_2)\}$ σε $\{\text{up}(s_2)\}$

Σύμφωνα με τον ορισμό 2 αυτοί οι δυο νόμοι είναι ταυτόχρονα εφαρμόσιμοι στην κατάσταση $(\neg \text{up}(s_1), \neg \text{up}(s_2), \neg \text{light})$. Η αντίστοιχη εφαρμογή τους προσδιορίζει δυο διαφορετικούς διαδόχους καταστάσεων, δηλαδή $\{\text{up}(s_1), \neg \text{up}(s_2), \neg \text{light}\}$ και $\{\neg \text{up}(s_1), \text{up}(s_2), \neg \text{light}\}$. Σε κάθε περίπτωση μόνο μια από αυτές τις δυο δυνατότητες θα συμβεί πραγματικά. Ωστόσο δεν μπορεί να προβλεφθεί ποια από τις δυο θα συμβεί, τουλάχιστον όχι με βάση τη (περιορισμένη) γνώση για τον τομέα/ πεδίο. Αυτό είναι που κάνει την εν λόγω δράση/ ενέργεια μη προσδιοριστική.

Η έννοια/ ιδέα των νόμων δράσης που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο η εκτέλεση των δράσεων επηρεάζει τα τμήματα της υπό περιγραφή κατάστασης, δηλαδή τις ρευστότητες, μας παρέχει έναν βασικό φορμαλισμό για να καθοριστούν οι τομείς δράσης. Η σημασιολογία αυτών των προδιαγραφών δίνεται από μοντέλα πλήρους μεταβολής κατάστασης.

Ορισμός 3

Έστω D ένας βασικός τομέας δράσης με 4 σύνολα (\mathbb{Z} , F , A , L) όπου E είναι ένα σύνολο με οντότητες, F ένα σύνολο με ρευστά ονόματα, A ένα σύνολο με ονόματα δράσης, και L ένα σύνολο με νόμους δράσης. Το μοντέλο μετάβασης/μοντέλο μεταβολής κατάστασης του D είναι μια συνολική χαρτογράφηση Σ από ζευγάρια κατάσταση-δράση σε (προφανώς άδεια) σύνολα κατάστασης όπως το $S' \in \Sigma(S, \alpha)$ εάν το S' είναι ένας προκαταρκτικός διάδοχος του S και α .

Οποιοσδήποτε (βασικός) τομέας δράσης παρέχει γενική γνώση όσον αφορά την επίπτωση των δράσεων που εκτελούνται. Η εκμετάλλευση αυτής της γνώσης κατά την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με συγκεκριμένα σενάρια μέσα σ' έναν τομέα είναι το επόμενο μέλημά μας.

Ένα σενάριο παρέχεται με πληροφορίες όσον αφορά συγκεκριμένες εξελίξεις τμήματος του κόσμου που έχει καθοριστεί ως τομέας δράσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτές οι πληροφορίες είναι ελλιπείς κι αυτό γιατί οι πραγματικές αξίες είναι γνωστές μόνο για μερικές ρευστότητες σε κάποια στάδια. Η γενική αποστολή λοιπόν είναι να εξαχθούν τα σωστά συμπεράσματα σχετικά με τις πραγματικές αξίες και των υπόλοιπων ρευστοτήτων στα υπόλοιπα στάδια. Φυσικά αυτό προϋποθέτει γνώση των

γενικών επιπτώσεων των δράσεων, η οποία δίνεται με την επίσημη προδιαγραφή των βασικών τομέων δράσης.

Ως ένα πολύ απλό παράδειγμα, έστω ότι παρατηρούμε πως μετά την εναλλαγή ο διακόπτης s_1 βρίσκεται στην επάνω θέση. Τότε είναι λογικό να συμπεράνουμε πως ο διακόπτης πριν την εναλλαγή βρισκόταν στην κάτω θέση. Αυτό θα πρέπει να απορρέει από τη γνώση μας ως προς τις γενικές επιπτώσεις της εναλλαγής των διακοπών, η οποία παρέχεται από τους δυο νόμους δράσης που ορίστηκαν στην (1.2). Επισήμως θα χρησιμοποιήσουμε εκφράσεις όπως ***up* (s_1) μετά [***εναλλαγή* (s_1)]** για να υποδηλώσουμε αυτό που ονομάζουμε παρατηρήσεις. Ένα σενάριο μπορεί στη συνέχεια να μοντελοποιηθεί ως μια συλλογή από παρατηρήσεις και εξάγοντας τα σωστά συμπεράσματα να αποφασιστεί ποιες παρατηρήσεις προκύπτουν από τις δοθείσες. Π.χ. $\neg \text{up} (s_1) \underline{\text{μετά}} []$ μπορεί να είναι ένα τέτοιο συμπέρασμα.**

Οι παρατηρήσεις μπορεί να είναι πιο σύνθετες απ' ό,τι τα δύο παραδείγματα που μόλις αναφέρθηκαν. Για παράδειγμα, $\text{up} (s_1) \equiv \text{up} (s_2) \underline{\text{μετά}} []$, δηλώνει ότι και οι δύο διακόπτες είναι στην ίδια θέση – παρόλο που δεν είναι γνωστό ποιά θέση μοιράζονται. Ένα λογικό συμπέρασμα εδώ θα ήταν, ας πούμε, $\neg (\text{up} (s_1) \equiv \text{up} (s_2)) \underline{\text{μετά}} [\text{εναλλαγή} (s_2)]$, δηλαδή η εναλλαγή του δεύτερου

διακόπτη έχει σαν αποτέλεσμα να μεταβούν και οι δύο διακόπτες σε διαφορετικές θέσεις. Μια άλλη εκδοχή είναι να τίθενται υποθετικές ερωτήσεις όπως οι ακόλουθες. Ας υποθέσουμε ότι το αποτέλεσμα της εναλλαγής του διακόπτη s_2 θα ήταν όλοι οι διακόπτες να έχουν την ίδια θέση. Ας υποθέσουμε επίσης ότι η εναλλαγή του διακόπτη s_1 θα τον μετακινούσε στην κάτω θέση (θα τον έσβηνε). Τι έπεται λοιπόν ως αποτέλεσμα της εναλλαγής και του s_1 και του s_2 ? Προφανώς, οι υποθέσεις υποδηλώνουν ότι αρχικά ο s_1 βρίσκεται στην πάνω θέση και (ως εκ τούτου) ο s_2 βρίσκεται στην κάτω. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι η σωστή απάντηση στο ερώτημα είναι ότι ο διακόπτης s_1 βρίσκεται στην κάτω θέση και ο διακόπτης s_2 στην πάνω. Πιο επίσημα, λέμε ότι οι δύο παρατηρήσεις

	$\forall x. up(x) \vee \forall x. \neg up(x)$	<u>μετά</u>
[εναλλαγή (s_2)]	(1.4)	
	$\neg up(s_1)$	<u>μετά</u>
[εναλλαγή (s_1)]		

περιλαμβάνουν την παρατήρηση $\neg up(s_1) \wedge up(s_2)$ μετά [εναλλαγή(s_1),εναλλαγή(s_2)]. Και πάλι, για να επαναλάβουμε το προφανές, το συμπέρασμα στηρίζεται στο σωστό ορισμό των νόμων δράσης. Στο υπόλοιπο

αυτής της ενότητας δείχνουμε πως τα συμπεράσματα αυτού του είδους λαμβάνονται σε επίσημη βάση. Για το σκοπό αυτό, χρειαζόμαστε πρώτα έναν ακριβή ορισμό για τις παρατηρήσεις. Αυτό με τη σειρά του απαιτεί την επίσημη έννοια της αποκαλούμενης ρευστής φόρμουλας, όπως η $\neg (ur(s_1) \equiv ur(s_2))$ or $\forall x. \neg ur(x)$.

Ορισμός 4

Δίνονται σύνολα οντοτήτων, ρευστά ονόματα και μεταβλητές. Το σύνολο της ρευστής φόρμουλας επαγωγικά ορίζεται ως εξής: κάθε ρευστή έκφραση, T (ταυτολογία) και \perp (αντίφαση) είναι ρευστές φόρμουλες, και εάν F και G είναι ρευστές φόρμουλες το ίδιο είναι και οι $\neg F$, $F \wedge G$, $F \vee G$, $F \supset G$, $F \equiv G$, $\exists x.F$ και $\forall x.F$ (όπου x είναι μια μεταβλητή).

Μια κλειστή φόρμουλα είναι μια ρευστή φόρμουλα χωρίς ελεύθερες μεταβλητές, δηλαδή, όπου οι μεταβλητές εμφανίζονται μόνο στο πεδίο εφαρμογών κάποιας ποσοτικής χρήσης αυτής της μεταβλητής.

Ορισμός 5

Έστω E , F και A σύνολα με οντότητες, ρευστά ονόματα και ονόματα δράσης αντίστοιχα. Μια παρατήρηση είναι της μορφής

F μετά $[\alpha_1(\bar{e}_1), \dots, \alpha_n(\bar{e}_n)]$

όπου F είναι μια κλειστή ρευστή φόρμουλα και κάθε ένα από τα $\alpha_1(\bar{e}_1), \dots, \alpha_n(\bar{e}_n)$ είναι μια δράση/ ενέργεια ($n \geq 0$).

Ορισμός 6

Ένα βασικό σενάριο δράσης είναι ένα ζευγάρι (O, D) , όπου D είναι ένας βασικός τομέας δράσης και O είναι ένα σύνολο από παρατηρήσεις (βασισμένο στις οντότητες, στα ρευστά ονόματα και τα ονόματα δράσης του D).

Πριν προσδιορίσουμε τα συμπεράσματα που επιτρέπει ένα σενάριο δράσης, πρέπει να διευκρινίσουμε κάτω από ποιές συνθήκες μια συγκεκριμένη παρατήρηση είναι αληθής. Αυτό προφανώς εξαρτάται από το τι κατάσταση υποθετικά προκύπτει από την εκτέλεση της εν λόγω δράσης. Έπειτα αποφασίζεται εάν η ίδια η ρευστή φόρμουλα είναι ξεκάθαρη σύμφωνα με το πρότυπο των λογικών συνδέσμων.

Ορισμός 7

Έστω E και F ένα σύνολο οντοτήτων και ρευστών ονομάτων αντίστοιχα, κι έστω S μια κατάσταση. Η έννοια του να είναι μια φόρμουλα αληθής (ή ψευδής αντίστοιχα) στην S , ορίζεται επαγωγικά ως εξής:

1. T είναι αληθής και \perp είναι ψευδής στην S .
2. Μια ρευστή πρόταση ℓ είναι αληθής στην S εάν $\ell \in S$.
3. $\neg F$ είναι αληθής στην S εάν F είναι ψευδής στην S .
4. $F \wedge G$ είναι αληθής στην S εάν F και G είναι αληθείς στην S .
5. $F \vee G$ είναι αληθής στην S εάν F και/ή G είναι αληθής στην S .
6. $F \supset G$ είναι αληθής στην S εάν F είναι ψευδής στην S και/ή G είναι αληθής στην S .
7. $F \equiv G$ είναι αληθής στην S εάν F and G είναι αληθείς ή ψευδείς στην S .
8. $\exists x.F$ είναι αληθής στην S εάν υπάρχει κάποιο $e \in E$ τέτοιο ώστε η $F\{x \mapsto e\}$ να είναι αληθής στην S .
9. $\forall x.F$ είναι αληθής στην S εάν για κάθε $e \in E$ η $F\{x \mapsto e\}$ είναι αληθής στην S .

Εδώ, η $F\{x \mapsto e\}$ δηλώνει τη ρευστή φόρμουλα που προκύπτει αντικαθιστώντας στο F όλες τις εμφανίσεις της μεταβλητής x με την οντότητα e .

Σαν παράδειγμα θεωρείστε τη φόρμουλα $\exists x. \neg \text{up}(x) \supset \neg \text{light}$, η οποία είναι αληθής στην κατάσταση $\{\neg \text{up}(s_1), \text{up}(s_2), \neg \text{light}\}$ (μέχρι $\neg \text{light}$ να είναι αληθής) κι επίσης στην κατάσταση $\{\text{up}(s_1), \text{up}(s_2), \text{light}\}$ (μέχρι

Εχ. $\neg \text{up}(x)$ να είναι ψευδής), αλλά η φόρμουλα είναι ψευδής για παράδειγμα στην κατάσταση $\{\text{up}(s_1), \neg \text{up}(s_2), \text{light}\}$.

Όπως αναφέρθηκε, οι παρατηρήσεις που περιγράφουν ένα σενάριο συνήθως παρέχουν μόνο ελλιπείς πληροφορίες ως προς τη συνολική κατάσταση των υποθέσεων. Αυτό ισχύει κυρίως όταν πρόκειται για μη προσδιοριστικές δράσεις/ ενέργειες διότι τότε ολοκληρωμένη πληροφορία σημαίνει γνώση του πραγματικού αποτελέσματος κάθε πιθανής ακολουθίας μη προσδιοριστικών ενεργειών. Συνεπώς η φυσιολογική περίπτωση είναι ότι υπάρχει παραπάνω από μια μοναδική κατάσταση υποθέσεων που ταιριάζει σε μια περιγραφή σεναρίου. Ακολουθώντας μια τυπική ορολογία, κάθε πιθανή κατάσταση υποθέσεων ονομάζεται *ερμηνεία*, κι αν αυτή ταιριάζει με μια περιγραφή σεναρίου τότε αυτό ονομάζεται *μοντέλο* αυτού (του σεναρίου).

Έχουμε ήδη δει παραδείγματα που περιλαμβάνουν συλλογισμό για υποθετικές εξελίξεις του κόσμου. Μια ερμηνεία ως εκ τούτου δεν πρέπει απλά να μας πληροφορεί για το τι ακριβώς συμβαίνει κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης μιας συγκεκριμένης ακολουθίας ενεργειών. Αλλά πρέπει να παρέχει αυτή την πληροφορία σε κάθε πιθανή εξέλιξη των γεγονότων. Σαφώς θεωρούμε ότι ο κόσμος εξελίσσεται σύμφωνα με τους υποκείμενους/

σχετικούς νόμους δράσης/ εξελίσσεται συναρτήσει των νόμων δράσης. Αυτό σημαίνει ότι, κάθε φορά που κάποια κατάσταση S προκύπτει από την εκτέλεση κάποιας ακολουθίας δράσης και κάποια επιπλέον δράση α εκτελείται, τότε το αποτέλεσμα θα πρέπει να είναι ένας διάδοχος της S και α .

Ορισμός 8

Έστω (O, D) ένα βασικό σενάριο δράσης. Μια ερμηνεία για το (O, D) είναι ένα ζεύγος (Σ, Res) όπου Σ είναι το μοντέλο μετάβασης(μεταβολής) του D και Res είναι μια μερική συνάρτηση η οποία χαρτογραφεί πεπερασμένες (πιθανώς άδειες) ακολουθίες δράσης σε καταστάσεις και η οποία ικανοποιεί τα παρακάτω:

1. Η $Res ([])$ ορίζεται
2. Για κάθε ακολουθία $\alpha^* = \alpha_1, \dots, \alpha_{k-1}, \alpha_k$ δράσεων ($k \geq 0$)
 - a) Η $Res (\alpha^*)$ ορίζεται εάν και μόνο αν η $Res ([a_1, \dots, a_{k-1}])$ ορίζεται και το $\Sigma(Res([a_1, \dots, a_{k-1}]), a_k)$ δεν είναι άδειο/ κενό και
 - b) Η $Res (\alpha^*) \in \Sigma(Res([a_1, \dots, a_{k-1}]), a_k)$

Το δεύτερο σκέλος της ερμηνείας μπορεί να απεικονιστεί ως ένα δέντρο (άπειρου βάθους) του οποίου

ο αρχικός κόμβος (κόμβος ρίζα) περιέχει την αρχική κατάσταση, $Res ([])$, και κάθε ένα από τα κλαδιά του/ τα άκρα του χαρακτηρίζει την υποτιθέμενη εξέλιξη του κόσμου σε μια συγκεκριμένη ακολουθία δράσεων, σχήμα 1.1.

Οι ερμηνείες πάντα μας ενημερώνουν για το ακριβές αποτέλεσμα της εκτέλεσης κάθε πιθανής ακολουθίας δράσης. Συνεπώς είναι εύκολο να προσδιοριστεί εάν μια παρατήρηση είναι αληθής (ισχύει) όσον αφορά μια συγκεκριμένη ερμηνεία: Πρώτα απ' όλα, μπορεί να ισχύει μόνο εάν η κατάσταση ορίζεται, το οποίο προκύπτει από την εκτέλεση της ακολουθίας των εν λόγω δράσεων. Εάν, επιπλέον, η εν λόγω ρευστή φόρμουλα είναι αληθής σε αυτή την κατάσταση, τότε η ίδια η παρατήρηση αληθεύει.

Ορισμός 9

Έστω μια ερμηνεία (Σ, Res) για ένα βασικό σενάριο δράσης (O, D) .

Μια παρατήρηση F μετά $[a_1, \dots, a_n]$ ($n \geq 0$) είναι αληθής στην Res εάν η $Res ([a_1, \dots, a_n])$ ορίζεται και η F είναι αληθής στην $Res ([a_1, \dots, a_n])$.

Ο αναγνώστης μπορεί να ελέγξει ότι οι δυο παρατηρήσεις (1.4) ανωτέρω είναι αληθείς στην ερμηνεία που απεικονίζεται στο σχήμα 1.1, αλλά όχι η παρατήρηση

$up(s_1)$ μετά [εναλλαγή(s_1), θέτω σε λειτουργία τον έναν], ούτε η παρατήρηση $\neg light$ μετά [εναλλαγή(s_2), θέτω σε λειτουργία τον έναν] διότι το αποτέλεσμα της τελευταίας ακολουθίας δράσης είναι απροσδιόριστο.

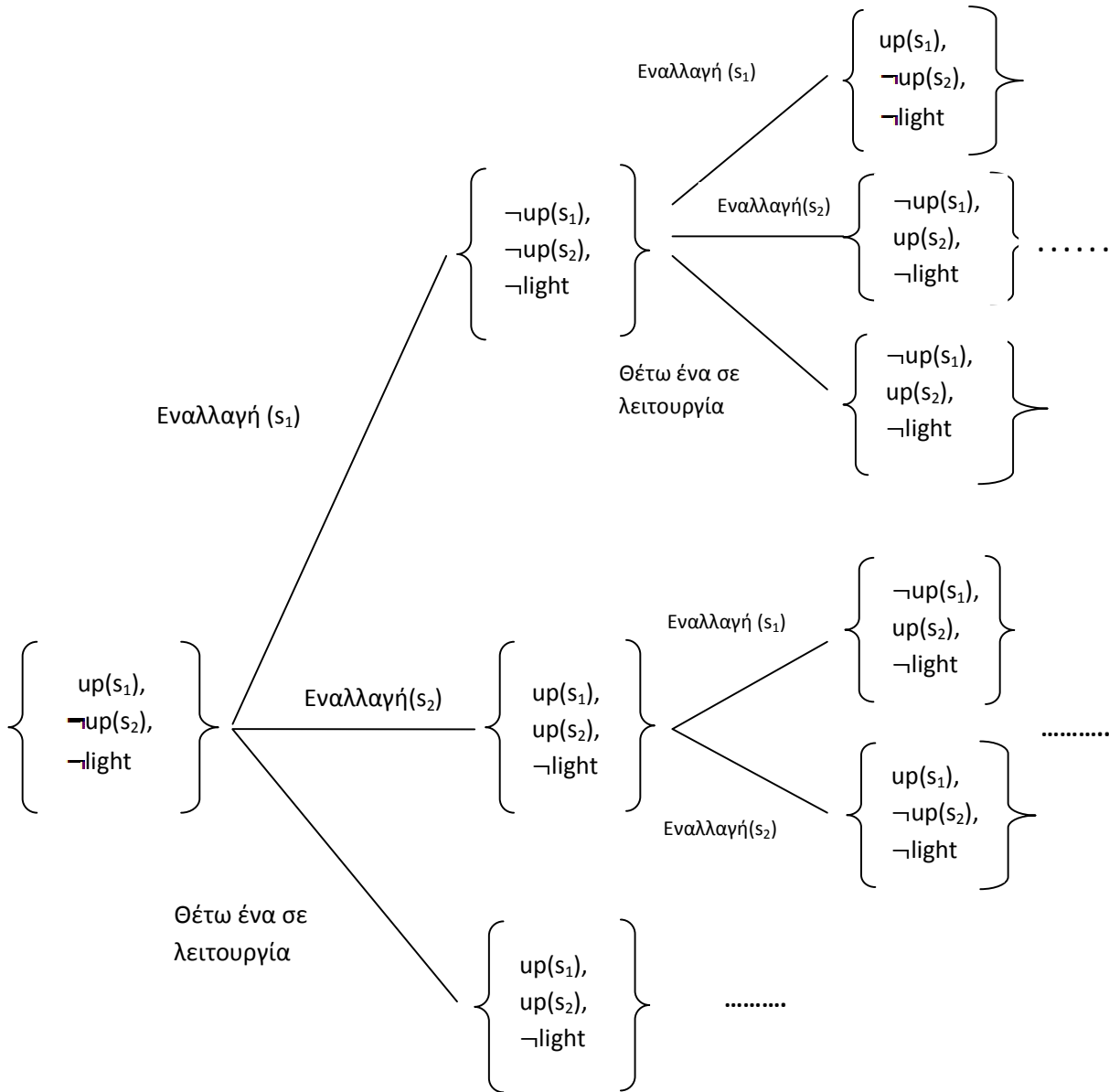
Μεταξύ όλων των πιθανών ερμηνειών για τον σχετικό τομέα δράσης ενδιαφερόμαστε ιδιαίτερα για αυτές που ικανοποιούν όλες τις παρατηρήσεις ενός συγκεκριμένου σεναρίου. Όπως αναφέρθηκε αυτές αποκαλούνται μοντέλα του σεναρίου.

Τα μοντέλα μας βοηθούν να προσδιορίσουμε τι μπορεί να συναχθεί από μια περιγραφή σεναρίου, δηλαδή, οποιαδήποτε παρατήρηση είναι αληθής σε όλα τα μοντέλα ενός τομέα.

Ορισμός 10

Έστω (O, D) ένα βασικό σενάριο δράσης. Ένα μοντέλο αυτού του σεναρίου είναι μια ερμηνεία (Σ, Res) τέτοια ώστε η $\mathbf{o} \in O$ να είναι αληθής στην Res . Μια παρατήρηση

ο προκύπτει, η οποία γράφεται $O \models D^o$, εάν η ο είναι αληθής σε όλα τα μοντέλα του (O, D) .



Σχήμα 1.1 :

Κάθε ερμηνεία προτείνει πιθανές εξελίξεις της κατάστασης του συστήματος. Αυτό μπορεί να περιγραφεί ως δέντρο του οποίου οι κόμβοι είναι καταστάσεις και τα άκρα επισημάνονται με δράσεις/ ενέργειες. Στο παράδειγμα, η κατάσταση που

προκύπτει από την εκτέλεση εναλλαγής(s_2) αναγνωρίζει μόνο δυο κόμβους-παιδιά, σε αντίθεση με τον αρχικό κόμβο, τον κόμβο ρίζα, που αναγνωρίζει τρεις από αυτούς. Ο λόγος είναι ότι κανένας νόμος δράσης για την ενέργεια θέτω ένα σε λειτουργία (βλ. (1.3)) δεν ισχύει στην κατάσταση $\{up(s_1), up(s_2), \neg light\}$. Έτσι η Res ([εναλλαγή(s_2), θέτω ένα σε λειτουργία]) δεν ορίζεται σε αυτήν την ερμηνεία. Παρατηρήστε επίσης ότι κατά την κατασκευή μιας ερμηνείας πρέπει να επιλέξουμε μεταξύ των εναλλακτικών αποτελεσμάτων κάθε φορά που μια μη προσδιοριστική δράση πραγματοποιείται. Στο παράδειγμα, το αποτέλεσμα της [εναλλαγή(s_1), θέτω ένα σε λειτουργία], π.χ., έχει καθοριστεί ως $\{\neg up(s_1), up(s_2), \neg light\}$. Θα είχαμε μια διαφορετική ερμηνεία αν κάναμε την εξίσου πιθανή επιλογή $\{up(s_1), \neg up(s_2), \neg light\}$.

7. Οι πιο σημαντικές λύσεις

Ολοκληρώνοντας την εισαγωγή στη βασική θεωρία δράσης, μπορούμε με τις απαραίτητες τυπικές έννοιες που έχουμε συγκεντρώσει να δώσουμε μια πλήρως επίσημη/ τυποποιημένη εκδοχή του παραδείγματος μας. Παρακάτω και από εδώ και στο εξής, με ξ^k δηλώνουμε ότι το ξ είναι βαθμού k .

7.1 Παράδειγμα

Έστω $\mathbb{Q} = \{s_1, s_2\}$ ένα σύνολο οντοτήτων, $F = \{up^1, light^0\}$ ένα σύνολο ρευστών ονομάτων και $A = \{\text{εναλλαγή}^1, \text{θέτω έναν σε λειτουργία}^0\}$ ένα σύνολο ονομάτων δράσης. Επιπλέον έστω L ένα σύνολο που αποτελείται από νόμους δράσης

εναλλαγή(x) μετατρέπει $\{up(x)\}$ σε $\{\neg up(x)\}$

εναλλαγή(x) μετατρέπει $\{\neg up(x)\}$ σε $\{up(x)\}$

θέτω έναν σε λειτουργία μετατρέπει $\{\neg up(s_1)\}$ σε $\{up(s_1)\}$

θέτω έναν σε λειτουργία μετατρέπει $\{\neg up(s_2)\}$ σε $\{up(s_2)\}$

τότε το $D = (\mathbb{Q}, F, A, L)$ αποτελεί έναν τομέα δράσης. Ένα δείγμα του μοντέλου μετάβασης/ μεταβολής του D , Σ φαίνεται στον πίνακα 1.1. Έστω O αποτελείται από τις παρατηρήσεις

	$\forall x. up(x) \vee \forall x. \neg up(x)$	<u>μετά</u>
[εναλλαγή(s_2)]		
	$\neg up(s_1)$	<u>μετά</u>
[εναλλαγή(s_1)]		

τότε (O, D) είναι ένα σενάριο δράσης. Κάθε ένα από τα μοντέλα του (Σ, Res) ικανοποιεί μια από τις:

$$Res ([εναλλαγή (s_1), εναλλαγή (s_2)]) = \{\neg up(s_1), up (s_2), \neg light\}$$

(το μοντέλο που απεικονίζεται στο σχήμα 1.1 το κάνει αυτό, για παράδειγμα) ή

$$Res ([εναλλαγή (s_1), εναλλαγή (s_2)]) = \{\neg up(s_1), up (s_2), light\}$$

In both resulting states $\neg up (s_1)$ and $up (s_2)$ hold. Έτσι αποκτάμε

$$O \models_D \neg up (s_1) \wedge up (s_2) \text{ μετά } [εναλλαγή (s_1), εναλλαγή (s_2)]$$

Table 1.1. Το μοντέλο μετάβασης/ μεταβολής αντιστοιχίζει σε κάθε ζευγάρι κατάστασης και δράσης ένα σύνολο από προκαταρκτικούς διαδόχους καταστάσεων.

S	Σ(S, α)
	α
¬up(s ₁), ¬up (s ₂), ¬	εναλλαγή (s {{ up(s ₁), ¬up (s ₂), ¬ligh }})
	εναλλαγή (s {{ ¬up(s ₁), up (s ₂), ¬ligh }})
Θέτω ένα σε λειτουργία	{ up(s ₁), ¬up (s ₂), ¬ligh }, { ¬up(s ₁), up (s ₂), ¬ligh }
up(s ₁), ¬up (s ₂), ¬li	εναλλαγή (s {{ ¬up(s ₁), ¬up (s ₂), ¬lig }})
	εναλλαγή (s {{ up(s ₁), up (s ₂), ¬ligh }})
	Θέτω ένα {{ up(s ₁), up (s ₂), ¬light

σε }}
 λειτουργία

εναλλαγή (s {{
 $\neg \text{up}(s_1), \text{up}(s_2), \text{light}$
 }}
 $\text{up}(s_1), \text{up}(s_2), \text{light}$

εναλλαγή (s {{
 $\text{up}(s_1), \neg \text{up}(s_2), \text{light}$
 }}

Θέτω ένα {}
 σε
 λειτουργία

Η κατά γενική ομολογία απλή, θεωρία δράσης στην οποία καταλήξαμε περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία που ζητήθηκαν στην αρχή: η θεωρία παρέχει μια γλώσσα για την τυποποίηση τόσο των γενικών πεδίων δράσης όσο και των συγκεκριμένων σεναρίων. Επίσης, περιέχει μια συνεπαγωγική σχέση που μας ενημερώνει ακριβώς για το τι μπορεί να συναχθεί από μια περιγραφή σεναρίου. Η θεωρία μας ικανοποιεί την πιο βασική προϋπόθεση επάρκειας, δηλαδή, ότι οι νόμοι δράσης επικεντρώνονται στο τμήμα του κόσμου που επηρεάζεται όταν εκτελείται η

δράση. Από την άλλη πλευρά, η βασική θεωρία κάνει δύο πολύ ισχυρές παραδοχές/ υποθέσεις. Πρώτον, απαιτεί οποιοσδήποτε νόμος δράσης να περιέχει το συνολικό αποτέλεσμα της δράσης που περιγράφει, δηλαδή όχι μόνο τα άμεσα αλλά κι όλα τα πιθανά έμμεσα αποτελέσματα. Αυτό αποτελεί συνέπεια της παραδοχής ότι καμία ρευστή κατάσταση δεν αλλάζει αν αυτό δεν αναφέρεται στον νόμο δράσης. Δεύτερον η θεωρία υποστηρίζει/ ισχυρίζεται ότι μια δράση έχει εγγυημένη επιτυχία όταν όλες οι καθορισμένες συνθήκες είναι αληθείς σε μια κατάσταση.

8. Σύνοψη και Επίλογος

Οι επίσημες θεωρίες δράσης έχουν αναπτυχθεί πολύ πρόσφατα. Ωστόσο η βαθύτερη ιδέα της τυποποίησης του συλλογισμού σχετικά με τις δράσεις/ ενέργειες και το σχεδιασμό/ προγραμματισμό είναι πολύ παλαιότερη. Στην πραγματικότητα, η αυτοματοποίηση της ικανότητας της κοινής λογικής σε αιτία (αίτιο) σχετικά με τις δράσεις και τα αποτελέσματά τις ήταν από τα πρώτα ζητήματα που τέθηκαν στην έρευνα της Τεχνητής Νοημοσύνης [1]. Εκεί η γνώμη που υποστηρίχθηκε ήταν ότι η πολυσχιδής, ευφυής συμπεριφορά βασίζεται στην ικανότητα να διατηρηθεί ένα νοητικό μοντέλο του κόσμου και να εξαχθούν τα σωστά συμπεράσματα σχετικά με τις παρατηρήσεις και τις προθέσεις.

Ιστορικά, η πρώτη επίσημη προσέγγιση του συλλογισμού σχετικά με τις ενέργειες ήταν μια καθαρά πρώτης τάξης κωδικοποίηση ορισμένων τομέων δράσης και σεναρίων. Αυτή η κωδικοποίηση εισήγαγε το λεγόμενο Situation Calculus paradigm (παράδειγμα κατάστασης λογισμού), το οποίο ικανοποιεί τη θεμελιώδη απαίτηση για επάρκεια στο ότι οι δράσεις καθορίζονται από τα αποτελέσματά τους. Με τον τρόπο αυτό, η Situation Calculus (κατάσταση λογισμού)συνεπάγεται το Frame Problem (πρόβλημα

πλαisiού) [2], το οποίο υποδηλώνει το πρόβλημα για το πώς να αναπαρασταθεί λογικά η γενική παραδοχή ότι κάθε μη επηρεασμένη ρευστότητα κρατά την αληθινή/πραγματική της αξία όταν μια δράση εκτελείται και πώς να υποστηριχθεί αποτελεσματικά με αυτήν την αναπαράσταση.

Ενώ οι πρώτες κωδικοποιήσεις βάση κατάστασης λογισμού ήταν διαισθητικά εύλογες, οι λύσεις στο πρόβλημα πλαisiού που προτείνονται και χρησιμοποιούνται σε αυτό το κείμενο ήταν δυσκίνητες και αναποτελεσματικές [3]. Συνεπώς η περισσότερη μεταγενέστερη εργασία σε αυτόν τον τομέα αφιερώθηκε στην εύρεση καλύτερων λύσεων σε αυτό το πρόβλημα. Είναι πέρα από κάθε αμφιβολία ότι είχε δημιουργηθεί πρόοδος στο θέμα αυτό αλλά στη συνέχεια αποδείχθηκε ότι σημαντική αξία έχει καταβληθεί προς αυτή την κατεύθυνση: οι θεμελιώσεις των σεναρίων δράσης φαίνεται να γίνονται λιγότερο εύλογες/ αληθοφανείς όσο καταπιάνονται με το πρόβλημα πλαisiού. Προκαλούμενη από έναν αυξανόμενο αριθμό φορμαλισμών δράσης που είναι λανθασμένοι στο να επιτρέπουν ανεπιθύμητα και αντίθετα στη διαισθητική αντίληψη συμπεράσματα, η αξιοπιστία των κωδικοποιήσεων δράσης γίνεται ένα καινούργιο μείζον πρόβλημα. Η μακράν πιο δημοφιλής περίπτωση είναι η προσέγγιση που προτείνεται στο [4], η

οποία χρησιμοποιεί το λεγόμενο περίγραμμα [5], μια ιδιαίτερη επέκταση της κλασικής λογικής πρώτης τάξης, για να εξετάσει το πρόβλημα πλαισίου. Ακολουθώντας την κοινή πρακτική, αυτή η προσέγγιση επικυρώθηκε μόνο από το παράδειγμα. Σύντομα, ωστόσο, ένα σοβαρό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποκαλύφθηκε με τη βοήθεια ενός ακόμα απλού παραδείγματος, το οποίο χρησιμοποιείται για την 'καταπολέμηση' της διαίσθησης [6].

Οι αυξανόμενες δυσκολίες με την αξιολόγηση της ορθότητας των φορμαλισμών δράσης μόνο με την επίκληση/ προσφυγή στη διαίσθηση, οδήγησε στην αντίληψη ότι χρειάζονται επίσημες μέθοδοι επαλήθευσης/ επικύρωσης προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία. Το πρώτο βήμα προς αυτήν την κατεύθυνση ήταν μια γενίκευση μιας διαισθητικά σωστής κωδικοποίησης μιας περιοχής παραδείγματος/ ενός τομέα παραδείγματος έτσι ώστε να καλύπτεται μια ολόκληρη, καλά προσδιορισμένη κατηγορία περιοχών/ τομέων. Αυτή η γενίκευση συνοδεύτηκε από μια επίσημη απόδειξη ότι η κωδικοποίηση οποιουδήποτε τέτοιου τομέα θα αποφέρει τα ίδια αποτελέσματα όπως προκύπτουν στο παράδειγμα, συνεπώς θα κληρονομήσει τη διαισθητική ορθότητα. Μολονότι το αποτέλεσμα αυτό δημιουργήθηκε για μια πολύ περιορισμένη κατηγορία τομέων (σε σύγκριση, για

παράδειγμα, με το τι εκφράζεται στη δικιά μας βασική θεωρία δράσης), αυτή ήταν η πρώτη φορά που ο ίδιος ο φορμαλισμός δράσης ήταν αντικείμενο επίσημης απόδειξης της ορθότητάς του.

Η πρώτη θεωρία δράσης που αξίζει αυτό το όνομα στο να είναι αληθινά ανεξάρτητη από μια συγκεκριμένη θεμελίωση/ θεμελιώδης αρχή ήταν η Action Description Language, abbreviated A (η Γλώσσα Περιγραφής Δράσης, με συντετμημένο το A) [7]. Αυτός ο φορμαλισμός και η βασική θεωρία δράσης μας, έχουν παρόμοια εκφραστικότητα εκτός από το ότι το A περιορίζεται σε μηδενικές/ χωρίς παραμέτρους (δηλαδή, προτασιακές) ρευστότητες και δεν υποστηρίζει μη προσδιοριστικές δράσεις. Στην πραγματικότητα, πολλές από τις έννοιες μας και τους συμβολισμούς μας δανείστηκαν από αυτήν την πρώτη προσέγγιση. Η γλώσσα περιγραφής δράσης υιοθετήθηκε για πρώτη φορά για να επικυρώσει μια κωδικοποίηση περιοχών δράσης με βάση το λογισμό κατάστασης και χρησιμοποιώντας τα λεγόμενα προγράμματα εκτεταμένης λογικής [7]. Αργότερα το A υιοθετήθηκε για την αξιολόγηση των φορμαλισμών δράσης όπως λογισμός κατάστασης βασισμένος στα προγράμματα απαγωγικής λογικής [8, 9], λογισμός κατάστασης με τα λεγόμενα αξιώματα διαδοχής κατάστασης (βλέπε παράγραφο 2.10) και λογισμός

κατάστασης με περίγραμμα, αντίστοιχα [10], και ρευστός λογισμός (βλέπε παράγραφο 2.9) βασισμένος στα προγράμματα εξισωτικής λογικής [11], απλά για να αναφερθούν μερικά. Οποιαδήποτε από αυτά τα αποτελέσματα επαληθεύουν την ορθότητα των αντίστοιχων φορμαλισμών δράσης εάν εφαρμοστούν σε τομείς που εκφράζονται στο A . Προκειμένου να επιτευχθούν/ αποκτηθούν τα γενικότερα αποτελέσματα αξιολόγησης, η πρωτότυπη/ αρχική γλώσσα περιγραφής δράσης έχει επεκταθεί σε διάφορες κατευθύνσεις, μεταξύ των οποίων αναφέρουμε πάλι μερικές. Μη προτασιακές ρευστότητες εισήχθησαν για πρώτη φορά στο [8]. Η διάλεκτος A_C επιτρέπει την αντιπροσώπευση και τη λογική/ κριτική σκέψη σχετικά με τα αποτελέσματα ταυτόχρονων εκτελούμενων ενεργειών [12]. Οι μη προσδιοριστικές δράσεις υποστηρίζονται από την A_N , και η γλώσσα A_{NCC} επεκτείνει το τελευταίο και το συνδιάζει με την A_C [13]. Επίσης στην AR μπορούν να τυποποιηθούν μη προσδιοριστικές ενέργειες και επιπλέον η AR περιέχει μια βασική λύση στο πρόβλημα των έμμεσων επιπτώσεων των δράσεων [14, 15]. Η επέκταση L_o υποστηρίζει ελλιπή προσδιορισμό της ακολουθίας δράσης που στην πραγματικότητα προκύπτει σε ένα σενάριο [16]. Οι δράσεις για τη συλλογή πληροφοριών εκπροσωπούνται από την γλώσσα A_k [70]. Η γλώσσα \mathcal{P}

στην [17] βασίζεται σε μια γραμμική δομή του χρόνου και επιτρέπει την εκπροσώπηση αφηγήσεων γεγονότων. Μια καλή γενική εισαγωγή στη γλώσσα περιγραφής δράσης και σε πολλές διαλέκτους είναι [18].

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία θεωριών δράσης έχει τις ρίζες της στη γλώσσα και στη σημασιολογία που αναπτύσσεται στο [19]. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτού του πλαισίου, το οποίο κοινώς ονομάζεται ‘χαρακτηριστικά και ρευστές καταστάσεις’, είναι ότι επιτρέπει τη λογική σκέψη σχετικά με τη διάρκεια των δράσεων. Μια λεπτομερής ιεραρχία των υποκατηγοριών με περιορισμένη εκφραστικότητα επιτρέπει την ακριβή αξιολόγηση των δράσεων για διαφορετικούς φορμαλισμούς δράσης. Τα κυριότερα αποτελέσματα της αξιολόγησης αναφέρονται στο [20]. Πολλές επεκτάσεις στο αρχικό πλαίσιο έχουν αναπτυχθεί, π.χ., ταυτοχρόνως εκτελούμενες δράσεις [21], δράσεις με έμμεσες επιπτώσεις [22, 23, 24] και προσανατολισμός με βάση το στόχο [25]. Το άρθρο [26] προσφέρει μια γενική εισαγωγή σε αυτήν την έρευνα.

Μια πρώτη επίσημη σύγκριση μεταξύ της γλώσσας περιγραφής δράσης A και του πλαισίου ‘χαρακτηριστικά και ρευστές καταστάσεις’ δημιουργήθηκε στο [27], όπου και οι δυο θεωρίες αποδεικνύονται ισοδύναμες για μια

συγκεκριμένη κατηγορία τομέων. Φυσικά υπάρχουν πολλοί περισσότεροι φορμαλισμοί που αξίζουν να ονομάζονται θεωρίες δράσης.

Η γλώσσα περιγραφής δράσης και το πλαίσιο 'χαρακτηριστικά και ρευστές καταστάσεις', είναι οι μόνες που βρήκαν/ διαπίστωσαν ευρύτερη διάδοση σε δυο σημεία: έχουν απασχοληθεί για την επικύρωση μιας ποικιλίας φορμαλισμών δράσης και έχουν χρησιμοποιηθεί ως μια ενιαία βάση για την αντιμετώπιση ποικίλων οντολογικών πτυχών. Στο βαθμό που αυτές και άλλες εξειδικευμένες θεωρίες δράσης αντιμετωπίζουν τα προβλήματα που μας απασχολούν στα επόμενα κεφάλαια, θα περιγραφούν και συζητηθούν λεπτομερώς εν ευθέτω χρόνο.

9. Αναφορές

[1] John McCarthy. Programs with Common Sense. *In Proceedings of the Symposium on the Mechanization of Thought Processes*, volume 1, pages 77-84, London, November 1958. (Reprinted in: ['79]).

[2] John McCarthy and Patrick J.Hayes. Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. *Machine Intelligence*, 4:463-502, 1969.

[3] Cordell Green. Application of theorem proving to problem solving. In *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pages 219-239, Los Altos, CA ,1969. Morgan Kaufmann.

[4] John McCarthy. Applications of circumscription to formalizing common - sense knowledge. *Artificial Intelligence*, 28:89-116, 1986.

- [5] John McCarthy. Circumscription---a form of non-monotonic reasoning. *Artificial Intelligence*, 13:27-39, 1980
- [6] Steve Hanks and Drew McDermott. Non-monotonic logic and temporal projection. *Artificial Intelligence*, 33(3):379-412,1987
- [7] *Michael Gelfond and Vladimir Lifschitz. Representing action and change by logic programs. Journal of Logic Programming*, 17:301-312, 1993
- [8] Phan Minh Dung. Representing actions in logic programming and its applications in database updates. In D.S. Warren, editor, *Proceedings of the International Conference on Logic Programming (ICLP)*, pages 222-238,Budapest,June 1993, MIT Press.
- [9] Marc Denecker and Danny de Schreye. Representing incomplete knowledge in abductive logic programming. *Journal of Logic and Computation*, 5(5):553-577,1995

[10] G. Neelakantan Kartha. Soundness and completeness theorems for three formalizations of actions. In R. Bajcsy, editor, Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), pages 724-729, Champéry, France, August 1993. Morgan Kaufmann

[11] Michael Thielscher . Representing actions in equational logic programming. In P. Van Hentenryck, editor, Proceedings of the International Logic Programming (ICLP), pages 207-224, Santa Margherita Ligure, Italy, June 1994. MIT Press

[12] Chitta Baral and Michael Gelfond. Representing concurrent actions in extended logic programming. In R. Bajcsy, editor, Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), pages 866-871, Champéry, France, August 1993. Morgan Kaufmann.

[13] Sven-Erik Bornscheuer and Michael Thielscher. Explicit and implicit indeterminism: Reasoning about uncertain and contradictory specifications of dynamic systems. Journal of logic Programming ,31(1-3):119-155, 1997

[14] G. Neelakantan Kartha and *Vladimir Lifschitz*. *Actions with indirect effects*. In J. Doyle, E. Sandewall, and P. Torasso, editors, *Proceedings of the Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR)*, pages 341-350, Bonn, Germany, May 1994. Morgan Kaufmann.

[15] Enrico Giunchiglia, G. Neelakantan Kartha and *Vladimir Lifschitz*. *Actions with indirect effects (extended abstract)*. In C. Boutilier and M. Goldszmidt, editors, *Extending Theories of Actions: Formal Theory and Practical Applications*, volume SS-95-07 of AAI Spring Symposia, pages 80-85, Stanford University, March 1995. AAI Press.

[16] Chitta Baral, Michael Gelfond, and Alessandro Provetti. *Representing actions: Laws, observations and hypothesis*. *Journal of Logic Programming*, 31(1-3): 201-243, 1997.

[17] Antonis Kakas and Rob Miller. A simple declarative language for describing narratives with actions. *Journal of Logic Programming*,31(1-3): 157-200, 1997.

[18] *Michael Gelfond and Vladimir Lifschitz. Action languages. Electronic Transactions on Artificial Intelligence, 1998. URL: <http://www.ep.liu.se/ea/cis1998/016/>.*

[19] *Erik Sandewall. Features and Fluents. The Representation of Knowledge about Dynamical Systems. Oxford University Press, 1994.*

[20] *Erik Sandewall. The range of applicability of some non-monotonic logics for strict inertia. Journal Of Logic and Computation , 4(5):581-615, 1994.*

[21] *Choong-Ho Yi. Towards the assement of logics for concurrent actions. In D. M. Gabbay, editor, Proceedings of the International Conference on Formal and Applied Practical Reasoning (FAPR), volume 1085 of LNAI, pages 679-690, Bonn,Germany June 1996, Springer.*

[22] Erik Sandewall. *Reasoning about actions and change with ramificaion. In Computer Science Today, volume 1000 of LNCS. Springer, 1995.*

[23] Joakim Gustafsson and Patrick Doherty. *Embracing occlusion in specifying the indirect effects of actions. In L. C. Aiello, J. Doyle, and S.Shapiro, editors Proceedings of the International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR) ,pages 87-98, Cambridge, MA, November 1996, Morgan Kaufmann.*

[24] Erik Sandewall. *Assessments of ramification methods that use static domain constraints. In L. C. Aiello, J. Doyle, and S.Shapiro, editors, Proceedings of the International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR) ,pages 99-110, Cambridge, MA, November 1996, Morgan Kaufmann.*

[25] Erik Sandewall. *Logic based modeling of goal-directed behavior. In A. G. Cohn, L. K. Schubert, andS.C.Shapiro, editors Proceedings of the International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR) ,pages304-315, Trento , Italy, June 1998. Morgan Kaufmann.*

[26] Erik Sandewall. *Cognitive robotics logic and its metatheory: Features and fluents revisited*. Linköping University Electronic Articles in Computer and Information Science, 1998. URL: <http://www.ep.liu.se/ea/cis1998/017/>.

[27] Michael Thielscher. *An analysis of systematic approaches to reasoning about actions and change* . In P. Jorrand and V.Sgurev , editors, International Conference on Artificial Intelligence : Methodology, Systems, Applications (AIMSA), pages 195-204, Sofia, Bulgaria, September 1994. World Scientific.