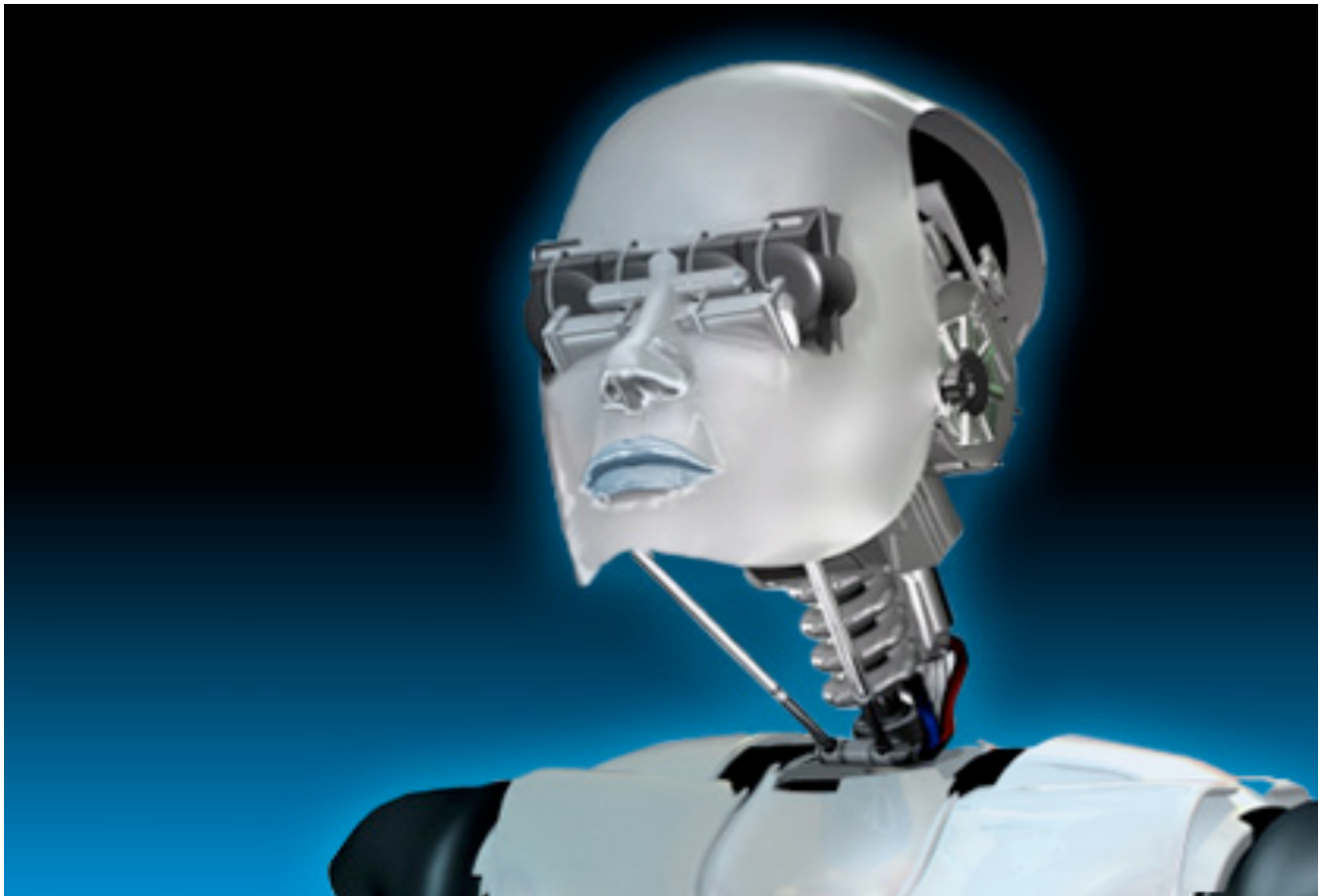


Υλοποίηση Λύσεων του Προβλήματος Πλαισίου και Συγκριτικά Αποτελέσματα.



Ανδρέας Δεληγιάννης
A.M. 4403

Επιβλέπων Καθηγητής: Νίκος Παπαδάκης



A.T.E.I. Κρήτης

Υλοποίηση Λύσεων του Προβλήματος Πλαισίου και Συγκριτικά Αποτελέσματα.

Ανδρέας Δεληγιάννης

Επιβλέπων, Νικόλαος Παπαδάκης

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ηθική και υλική συμπαράσταση που μου προσέφερε και συνεχίζει να μου προσφέρει.

Επίσης θα ήθελα να αναγνωρίσω τη σημαντική συμβολή και καθοδήγηση σε αυτή την εργασία του Δρ. Νικόλαο Παπαδάκη.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα άτομα που γνώρισα σε όλη την πορεία μου για τη δημιουργική συνεργασία και τη συμπαράσταση τους.

Ανδρέας Δεληγιάννης

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

Περιεχόμενα

Υλοποίηση Λύσεων του Προβλήματος Πλαισίου και Συγκριτικά Αποτελέσματα.....	2
Ευχαριστίες.....	3
1. Εισαγωγή.....	7
2. Ορισμοί και βασικές έννοιες.....	9
3. Λογισμός Καταστάσεων.....	10
Καταστάσεις.....	10
Ενέργειες.....	10
Μεταβλητές.....	11
4. Λογικές Προτάσεις στο Λογισμό Καταστάσεων.....	12
Προϋποθέσεις Ενεργειών.....	12
5. Αξιώματα αποτελεσμάτων.....	17
Θετικά Αξιώματα Αποτελεσμάτων.....	17
Αρνητικά Αξιώματα Αποτελεσμάτων.....	20
6. Αξιώματα πλαισίου.....	23
Θετικά Αξιώματα πλαισίου.....	23
Αρνητικά Αξιώματα πλαισίου.....	25
Η πρόταση του Reiter για τα Αξιώματα Πλαισίου.....	28
Θετικά Αξιώματα με τη μέθοδο του Reiter.....	29
Αρνητικά Αξιώματα με τη μέθοδο του Reiter.....	33

Γενικευμένο Αξίωμα Θετικού και Αρνητικού Αποτελέσματος	36
Αξίωμα Κάλυψης Εξήγησης για Θετικά και Αρνητικά Αποτελέσματα.....	37
Μοναδικότητα Αξιωμάτων για Ενέργειες και Καταστάσεις	39
Πρακτικές Εφαρμογές.....	41
Σύνοψη	43
Αναφορές	46

1. Εισαγωγή

Το πρόβλημα του πλαισίου ξεκίνησε σαν ένα τεχνικό πρόβλημα της τεχνικής νοημοσύνης. Αργότερα όμως οι φιλόσοφοι το μελέτησαν και το μετ εξέλιξαν δίνοντας του πιο ευρεία διάσταση. Σε γενικές γραμμές, το πρόβλημα αυτό αφορά τον περιορισμό της αναλυτικής αναπαράστασης των αποτελεσμάτων που μπορεί να επιφέρει μία δράση.

Στην ανθρώπινη νόηση αυτό το πρόβλημα είναι εν γένει λυμένο. Ο άνθρωπος μπορεί να επικεντρώνει την προσοχή του μονάχα στις αντιδράσεις που έχουν σημασία για αυτόν και οι οποίες έχουν προκληθεί από ένα γεγονός το οποίο μπορεί να αντιληφθεί. Αντίθετα στη ρομποτική, χωρίς τη λύση του προβλήματος του πλαισίου, τα συστήματα θα πρέπει να είναι εμπλουτισμένα με όλες τις πιθανές αντιδράσεις που μπορεί να επιφέρει η εκτέλεση ενός γεγονότος, άσχετα αν οι αντιδράσεις αυτές έχουν νόημα για το ίδιο το σύστημα ή όχι.

Εκτός από το σύνολο των αντιδράσεων στο σύστημα θα πρέπει να είναι αναλυμένες και όλες οι μη-επιδράσεις που μπορεί να επιφέρει ένα γεγονός. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει στο σύστημα να είναι αριθμημένες οι σχέσεις του γεγονότος με όλα τα στοιχεία του περιβάλλοντος τα οποία αντιλαμβάνεται το σύστημα. Κάθε στοιχείο στο περιβάλλον μπορεί να φέρει ένα σύνολο ιδιοτήτων, των οποίων την τιμή ένα γεγονός μπορεί να αλλάζει. Αυτό το καρτεσιανό γινόμενο μεταξύ του συνόλου των γεγονότων, του συνόλου των στοιχείων του περιβάλλοντος και του συνόλου των ιδιοτήτων των στοιχείων του περιβάλλοντος θα πρέπει να είναι ορισμένο κι αριθμημένα στατικά. Αυτό σημαίνει ότι το παραπάνω σύνολο θα πρέπει να είναι αποθηκευμένο στη μνήμη του συστήματος.

Αν το περιβάλλον στο οποίο δρα ένα σύστημα πλησιάζει την πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος στο οποίο ζει καθημερινά ένας άνθρωπος, τότε είναι προφανές ότι η αναλυτική απαρίθμηση είναι υπολογιστικά, τουλάχιστον ασύμφορη. Οι λύσεις που έχουν προταθεί για το πρόβλημα του πλαισίου είναι σχεδόν όλες βασισμένες στο νόμο

της αδράνειας. Συνοπτικά, σύμφωνα με το νόμο της αδράνειας δε χρειάζεται να εξετάζονται από το σύστημα όλα τα γινόμενα των προηγούμενων συνόλων. Απαιτείται μονάχα να ανανεώνονται οι τιμές των στοιχείων του περιβάλλοντος όταν ένα γεγονός που σχετίζεται άμεσα με αυτό έχει συμβεί. Για όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του περιβάλλοντος θεωρείται ότι δεν υπάρχει λόγος να μεταβληθούν.

Για συστήματα που δρουν σε σχετικά απλά περιβάλλοντα παρόμοιες λύσεις έχουν νόημα και φαίνεται να είναι αποτελεσματικές. Όμως, σε πολύπλοκα συστήματα τα πράγματα συνεχίζουν να παραμένουν πολύπλοκα. Αυτό συμβαίνει διότι εισήχθη στο πρόβλημα η έννοια του σχετιζόμενου με ένα στοιχείο γεγονότος, μιας και στη γενική περίπτωση για να αναλυθεί η σχετικότητα θα πρέπει να αριθμηθούν όλα τα πιθανά γινόμενα που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

2. Ορισμοί και βασικές έννοιες

Το πρόβλημα του πλαισίου έγκειται στη δυσκολία να προσπεραστεί η μελέτη της μη-επίδρασης ενός γεγονότος στα στοιχεία του περιβάλλοντος που είναι πολύ απίθανο να επηρεάσει.

Περιβάλλον είναι όλα τα στοιχεία και οι ιδιότητες τους που μπορούν να γίνουν αντιληπτά από το σύστημα.

Σύστημα είναι η οντότητα της οποίας η νοημοσύνη αναπτύσσεται με στόχο την επιτυχή αλληλεπίδραση της με το περιβάλλον.

Γεγονός είναι οτιδήποτε μπορεί να διαταράξει την αδράνεια του περιβάλλοντος, αλλάζοντας για κάποιο υποσύνολο των στοιχείων του περιβάλλοντος τις ιδιότητες.

Μεταβλητή είναι οτιδήποτε του οποίου μπορεί να αλλαχθεί η τιμή.

Ποσοτική είναι η μεταβλητή η οποία μπορεί να πάρει ένα εύρος τιμών ανάλογα με τη φύση της.

Συλλογιστική είναι η μεταβλητή η οποία μπορεί να ισχύει ή να μην ισχύει.

Οντολογία είναι οι τύποι των στοιχείων που μπορούμε να προσδιορίσουμε.

Κατηγορημα είναι ένα αξίωμα της οντολογίας στο οποίο βασίζεται η μελετώμενη λογική.

Λογική πρώτης τάξης είναι η λογική στην οποία μπορούν να εκτιμώνται μεταβλητές αλλά όχι κατηγορήματα.

3. Λογισμός Καταστάσεων

Ο λογισμός καταστάσεων είναι μια λογική πρώτης τάξης που περιγράφει δυναμικά μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα. Τα βασικά σημεία που χαρακτηρίζουν το λογισμό καταστάσεων είναι οι ενέργειες, οι καταστάσεις και οι μεταβλητές.

Καταστάσεις

Ο κόσμος είναι ανά πάσα στιγμή σε κάποια κατάσταση s . Για να αλλάξει αυτή η κατάσταση θα πρέπει το σύστημα το οποίο δρα στο περιβάλλον να κάνει κάποια ενέργεια. Ένα από τα αποτελέσματα αυτής της ενέργειας είναι και η αλλαγή της κατάστασης από s σε s' . Αν κάποια ενέργεια δε συμβεί τότε ο κόσμος συνεχίζει και παραμένει στην ίδια κατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένας κόσμος αιτίας-αποτελέσματος όπου τα πάντα μπορούν να εξηγηθούν ακολουθώντας μόνο τις ενέργειες που προκάλεσαν τις οποιεσδήποτε αλλαγές.

Ενέργειες

Όλες οι αλλαγές είναι αποτελέσματα κάποιων ενεργειών. Έτσι δεν είναι δυνατόν να έχει αλλάξει οτιδήποτε στον κόσμο, αν μια ενέργεια δεν προκάλεσε αυτή την αλλαγή. Έτσι καμία αλλαγή δε μπορεί να μείνει ανερμήνευτη, χωρίς να γνωρίζουμε την ακριβή αιτία που την προκάλεσε. Έτσι το σχήμα το οποίο αναπαριστά την πρόοδο του κόσμου είναι ότι μια αιτία-ενέργεια συνέβη σε κάποιο στιγμιότυπο-τρέχουσα κατάσταση του κόσμου και είχε σαν αποτέλεσμα την αλλαγή της τρέχουσας κατάστασης σε ένα στιγμιότυπο του κόσμου το οποίο διαφέρει σε σχέση με το προηγούμενο μονάχα στα αποτελέσματα της εκτέλεσης της ενέργειας.

Η ολοκλήρωση μιας ενέργειας αποτυπώνεται στο λογισμό καταστάσεων με το $do(ενέργεια, s)$. Το do είναι μια συνάρτηση που παίρνει δύο ορίσματα, την ενέργεια που

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

συμβαίνει και την κατάσταση που βρισκόταν ο κόσμος όταν συνέβη η ενέργεια αυτή. Το αποτέλεσμα αυτής της συνάρτησης είναι η κατάσταση στην οποία μεταβαίνει ο κόσμος με το πέρας της ενέργειας.

Οι ενέργειες μπορούν να δέχονται παραμέτρους. Έτσι, η ενέργεια τοποθέτησε(χ , ψ) αποτυπώνει την ενέργεια της τοποθέτησης ενός αντικειμένου χ πάνω σε ένα αντικείμενο ψ . Με τη σειρά του, το $do(\text{τοποθέτησε}(A,B), s)$ αποτυπώνει την κατάσταση στην οποία θα μεταβεί ο κόσμος με την τοποθέτηση του αντικειμένου A πάνω στο αντικείμενο B αν η τρέχουσα κατάσταση είναι η s . Η κάθε ενέργεια ανάλογα με τη φύση της μπορεί να παίρνει οσαδήποτε ορίσματα.

Στο λογισμό καταστάσεων οι ενέργειες αποτυπώνονται με σύμβολα συναρτήσεων. Έτσι μιας και τα κατηγορήματα του λογισμού μοιάζουν με κλήσεις συναρτήσεων θα πρέπει να διακρίνεται από τα συμφραζόμενα πότε πρόκειται για συνάρτηση ενέργειας και πότε για κάποιο κατηγορήμα. Είναι πολύ συνηθισμένο να δημιουργούνται συμβάσεις και για τις συναρτήσεις των ενεργειών για παράδειγμα να χρησιμοποιούνται κεφαλαία γράμματα ώστε να είναι πιο ξεκάθαρες οι λογικές προτάσεις.

Μεταβλητές

Οι μεταβλητές είναι οι σχέσεις των οποίων οι τιμές μπορούν να μεταβάλλονται από κατάσταση σε κατάσταση. Αποτυπώνονται με σύμβολα κατηγορημάτων, στα οποία τουλάχιστον το ένα όρισμα είναι η τρέχουσα κατάσταση. Για παράδειγμα σε έναν κόσμο που υπάρχει η δυνατότητα τα αντικείμενα να έχουν και να αλλάζουν χρώματα, το κατηγορήμα $\text{χρώμα}(x, c, s)$ δείχνει τη μεταβλητή χρώμα η οποία για το αντικείμενο x έχει την τιμή c αν βρισκόμαστε στην κατάσταση s .

4. Λογικές Προτάσεις στο Λογισμό Καταστάσεων

Για την κατασκευή λογικών προτάσεων απαιτούνται μια σειρά από συμβάσεις οι οποίες αποτελούν τους ακρογωνιαίους λίθους πάνω στους οποίους θα βασιστούν όλες οι θεωρίες για την βελτιστοποίηση των αναπαραστάσεων του κόσμου και των δυναμικών του.

Προϋποθέσεις Ενεργειών

Μία ενέργεια συμβαίνει σε κάποιο στιγμιότυπο του κόσμου που χαρακτηρίζεται από μια κατάσταση και μεταβάλλει ένα σύνολο μεταβλητών του κόσμου. Το προηγούμενο στιγμιότυπο μαζί με τις αλλαγές αυτές και την κατάσταση που συνέβη χαρακτηρίζουν το νέο στιγμιότυπο του κόσμου. Στη θεώρηση αυτή θα πρέπει να αποσαφηνιστεί ο μηχανισμός ο οποίος επιτρέπει σε μια ενέργεια να εκτελεστεί σε κάποιο στιγμιότυπο του κόσμου. Ο μηχανισμός αυτός αποτελείται από ένα σύνολο συμβάσεων οι οποίες θα πρέπει να ικανοποιούνται στο στιγμιότυπο του κόσμου για να εκτελεστεί η ενέργεια. Το σύνολο των συμβάσεων αυτών ονομάζεται σύνολο προϋποθέσεων εκτέλεσης της ενέργειας ή απλώς προϋποθέσεις της ενέργειας. Δεν είναι απαραίτητο σε ένα κόσμο να εκτελείται μια ενέργεια αν ικανοποιούνται όλες οι προϋποθέσεις της, απλώς επιτρέπουν ή δεν επιτρέπουν την εκτέλεση της.

Για την κατανόηση της παραπάνω θεώρησης παρουσιάζεται ένας κόσμος ο οποίος αποτελείται από ένα ρομπότ κι ένα μπουκάλι. Οι ενέργειες που μπορεί να κάνει το ρομπότ είναι οι:

- σηκώνει(r, x) : η οποία περιγράφει την ενέργεια κατά την οποία ένα ρομπότ, r , σηκώνει ένα αντικείμενο x .

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

- επισκευάζει(r, x) : η οποία περιγράφει την ενέργεια κατά την οποία ένα ρομπότ, r , επισκευάζει ένα αντικείμενο x .
- αφήνει_κάτω(r, x) : η οποία περιγράφει την ενέργεια κατά την οποία ένα ρομπότ, r , αφήνει στο έδαφος ένα αντικείμενο x .
- ρίχνει(r, x) : η οποία περιγράφει την ενέργεια κατά την οποία ένα ρομπότ, r , ρίχνει στο έδαφος ένα αντικείμενο x .

Οι μεταβλητές του κόσμου χαρακτηρίζουν τα αντικείμενα του και μπορούν να αλλάζουν τιμές κατά την μετάβαση του από ένα στιγμιότυπο σε ένα άλλο. Κάποιες από αυτές έχουν συγκεκριμένες τιμές κατά τη δημιουργία του κόσμου και δεν υπάρχει η δυνατότητα να αλλάζουν. Μπορούν όμως να αξιολογούνται διαφορετικά ανάλογα με το αντικείμενο το οποίο χαρακτηρίζουν. Οι τελευταίες θα ονομάζονται και στατικές αφού ο χαρακτηρισμός του για κάποια συγκεκριμένη οντότητα του κόσμου είναι σταθερός κατά την αλλαγή των στιγμιοτύπων του κόσμου:

- κρατάει(r, x, s) : η οποία περιγράφει την πληροφορία ότι ένα ρομπότ, r , κρατάει ένα αντικείμενο x , όταν ο κόσμος βρίσκεται στο στιγμιότυπο που αναπαριστάται από την κατάσταση s .
- βαρύ(x) : η οποία περιγράφει την πληροφορία ότι ένα αντικείμενο, x , είναι βαρύ σε σχέση με το βάρος ενός αντικειμένου το οποίο μπορεί να διαχειριστεί με ευκολία στον κόσμο. Η μεταβλητή αυτή έχει ως μοναδικό όρισμα το ίδιο το αντικείμενο και όχι κάποιο σημείο αναφοράς στον κόσμο οπότε δεν είναι δυνατόν κατά τη μετάβαση καταστάσεων στον κόσμο να αλλάξει η τιμή της μεταβλητής αυτής. Θα είναι αληθής ή ψευδής ανάλογα με το εκάστοτε αντικείμενο το οποίο χαρακτηρίζεται ως βαρύ ή όχι με

κάποιο αυθαίρετο τρόπο ο οποίος έχει χαρακτηρίσει όλα τα αντικείμενα από τη δημιουργία του κόσμου.

- $\text{δίπλα}(r, x, s)$: η οποία περιγράφει την πληροφορία ότι ένα ρομπότ, r , είναι κοντά σε ένα αντικείμενο x , σε κάποια κατάσταση του συστήματος, s . Η μεταβλητή αυτή παίρνει ως ορίσματα φυσικά τις δύο οντότητες των οποίων η μεταξύ τους απόσταση αξιολογεί τη μεταβλητή στη τιμή αληθής ή στην τιμή ψευδής. Θεωρείται ότι οι οντότητες του κόσμου όπως το ρομπότ ή τα διάφορα αντικείμενα έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν τη θέση τους οπότε η μεταβλητή δίπλα μπορεί να αξιολογείται σε διαφορετική τιμή ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται ο κόσμος.
- $\text{έχει_κόλλα}(r, s)$: η οποία περιγράφει τη πληροφορία ότι ένα ρομπότ, r , έχει στη διάθεση του ένα αντικείμενο του τύπου κόλλα σε κάποιο στιγμιότυπο του κόσμου, s . Η μεταβλητή αυτή θα μπορούσε να χαρακτηρίζει συνολικά κάθε ρομπότ του κόσμου χωρίς να χρειάζεται η κατάσταση του. Όμως σύμφωνα με τις παραδοχές του κόσμου είναι δυνατόν ένα συγκεκριμένο ρομπότ σε κάποια κατάσταση του κόσμου να έχει στη διάθεση του κόλλα, ενώ σε κάποια άλλη κατάσταση του κόσμου να μην έχει.
- $\text{σπασμένο}(x, s)$: η οποία περιγράφει την πληροφορία ότι ένα αντικείμενο, x , είναι σπασμένο σε κάποιο στιγμιότυπο του κόσμου, s . Η μεταβλητή σπασμένο έχει δύο ορίσματα, το ένα εκ των οποίων είναι η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο κόσμος και αυτό δίνει την ελευθερία στο χαρακτηρισμό ενός αντικειμένου να είναι σπασμένο σε κάποια κατάσταση του κόσμου s , αλλά να μην είναι σπασμένο σε κάποια προηγούμενη ή επόμενη κατάσταση του κόσμου, s' .
- $\text{εύθραυστος}(x)$: η οποία χαρακτηρίζει τη στατική ιδιότητα ενός αντικειμένου, x , να είναι εύθραυστο. Το ίδιο το αντικείμενο είναι και το μόνο όρισμα της μεταβλητής εύθραυστος το οποίο συνεπάγεται ότι η αξιολόγηση της μεταβλητής για κάποιο αντικείμενο είναι ανεξάρτητη του εκάστοτε στιγμιότυπου του κόσμου και χαρακτηρίζει όλα τα αντικείμενα κατά τη δημιουργία του κόσμου.
- $\text{χρώμα}(x, c, s)$: η οποία χαρακτηρίζει το χρώμα, c , ενός αντικειμένου, x , σε κάποιο στιγμιότυπο του κόσμου, s . Τα τρία ορίσματα της μεταβλητής αυτής δείχνουν την ελευθερία στον κόσμο για κάποιο αντικείμενο να

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

αλλάζει χρώμα από μια κατάσταση, s , σε κάποια κατάσταση, s' . Επίσης, η παράμετρος c , δίνει τη δυνατότητα για κάποιο αντικείμενο να παίρνει χρώμα από ένα σύνολο πιθανών χρωμάτων και όχι από μια δυαδική τιμή η οποία μπορεί να είναι είτε αληθής είτε ψευδής.

Μία θεώρηση για τις προϋποθέσεις των ενεργειών του κόσμου που περιγράφηκε προηγουμένως θα μπορούσε να είναι η εξής:

- $\text{pickup}(r, x)$: Για να εκτελεστεί η ενέργεια αυτή από ένα ρομπότ, r , προς ένα αντικείμενο, x , θα πρέπει η μεταβλητή που χαρακτηρίζει την πληροφορία για το αν δύο αντικείμενα είναι κοντά το ένα με το άλλο να έχει την τιμή αληθής. Η μεταβλητή αυτή πρέπει να αξιολογηθεί έχοντας ως ορίσματα το ρομπότ, r , στο οποίο αναφέρεται η ενέργεια σηκώνει καθώς και στο αντικείμενο που αναφέρεται η ίδια ενέργεια. Έτσι, αν η μεταβλητή αξιολογηθεί με την τιμή αληθής, τότε το πρώτο τμήμα των προϋποθέσεων ικανοποιείται. Επίσης, θα πρέπει να αξιολογηθεί και η μεταβλητή η οποία χαρακτηρίζει ένα αντικείμενο με την πληροφορία για το αν το ίδιο αντικείμενο είναι βαρύ. Έτσι αν η μεταβλητή βαρύ με όρισμα το αντικείμενο, x , που πρόκειται να σηκώσει το ρομπότ είναι αξιολογημένη με την τιμή ψευδής, τότε και η δεύτερη προϋπόθεση ικανοποιείται. Τέλος, για να μπορεί το ρομπότ να σηκώσει το αντικείμενο, s , θα πρέπει να μην κρατάει κάποιο άλλο αντικείμενο, y . Διαφορετικά, δε θα είναι σε θέση να σηκώσει το αντικείμενο x . Φυσικά αν το ρομπότ αφήσει το αντικείμενο y τότε ο κόσμος θα μεταφερθεί σε ένα άλλο στιγμιότυπο στο οποίο θα υπάρχει η δυνατότητα αν οι προηγούμενες δύο μεταβλητές έχουν τις κατάλληλες τιμές να σηκώσει το ρομπότ το αντικείμενο x . Από την άλλη, αν το ρομπότ δεν κρατάει κανένα άλλο αντικείμενο τότε ικανοποιείται και

η τρίτη προϋπόθεση και η ενέργεια σηκώνει μπορεί να πραγματοποιηθεί στο στιγμιότυπο του κόσμου που βρισκόμαστε.

- $repair(r, x)$: η ενέργεια η οποία δείχνει την επισκευή ενός αντικειμένου x , από ένα ρομπότ, r , προϋποθέτει καταρχήν ότι το ρομπότ έχει στη διάθεση του ένα υλικό το οποίο είναι κατάλληλο για την επισκευή ενός αντικειμένου. Στον κόσμο που μελετάται, ο μόνος τύπος αντικειμένου που υπάρχει είναι το μπουκάλι και θεωρείται ότι ο μόνος τρόπος με τον οποίο ένα μπουκάλι μπορεί να αλλάξει κατάσταση και να επιδέχεται διόρθωσης είναι να σπάσει. Επίσης, το μόνο αντικείμενο το οποίο είναι διαθέσιμο στον ίδιο κόσμο και το οποίο είναι σε θέση να επισκευάσει ένα σπασμένο μπουκάλι είναι η κόλλα, την οποία το ρομπότ θα πρέπει να έχει στη διάθεση του προτού εκτελέσει την ενέργεια της επισκευής. Επίσης, θα πρέπει και το ίδιο το αντικείμενο, x , να είναι σε θέση που να επιδέχεται επισκευή, οπότε θα πρέπει να είναι σπασμένο. Τα δύο παραπάνω μεταφράζονται σε μια λογική πρόταση η οποία χρησιμοποιεί τις μεταβλητές έχει_κόλλα και σπασμένο: έχει_κόλλα(r, s) ΚΑΙ σπασμένο(x, s)
- $drop(r, x)$: η ενέργεια αυτή η οποία δείχνει το ρίξιμο ενός αντικειμένου, x , από ένα ρομπότ, r , προϋποθέτει ότι το ρομπότ κρατάει στο στιγμιότυπο του κόσμου, s , το αντικείμενο, x . Σε αντίθεση με τις προηγούμενες ενέργειες, αυτή είναι η μόνη προϋπόθεση για το ρίξιμο ενός αντικειμένου. Έτσι, ένα ρομπότ, r , από τη στιγμή που θα ξεκινήσει να κρατάει ένα οποιοδήποτε αντικείμενο, x , έχει ενεργοποιημένη την ικανότητα να μπορεί να ρίξει το αντικείμενο αυτό. Η ενεργοποίηση όμως σε καμία περίπτωση δε συνιστά και εκτέλεση της ενέργειας αυτής όπως αναλύθηκε και προηγουμένως.
- $Putdown$: η ενέργεια αυτή η οποία δείχνει το άφημα ενός αντικειμένου, x , από ένα ρομπότ, r , προϋποθέτει ότι το ρομπότ κρατάει στο στιγμιότυπο του κόσμου, s , το αντικείμενο, x . Έτσι, ένα ρομπότ, r , από τη στιγμή που θα ξεκινήσει να κρατάει ένα οποιοδήποτε αντικείμενο, x , έχει ενεργοποιημένη την ικανότητα να μπορεί να αφήσει το αντικείμενο αυτό. Η ενεργοποίηση όμως σε καμία περίπτωση δε συνιστά και εκτέλεση της ενέργειας αυτής όπως αναλύθηκε και προηγουμένως.

5. Αξιώματα αποτελεσμάτων

Οι δυναμικές του κόσμου περιγράφονται στο λογισμό καταστάσεων με ένα σύνολο λογικών προτάσεων οι οποίες δείχνουν τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών και των ενεργειών. Κάθε ενέργεια μπορεί να αλλάξει την τιμή μιας μεταβλητής από αληθής σε ψευδής ή από ψευδής σε αληθής αρκεί να ικανοποιούνται δύο βασικοί όροι. Πρώτον θα πρέπει οι προϋποθέσεις της ενέργειας αυτής να ικανοποιούνται κι έπειτα θα πρέπει η εκτέλεση της ενέργειας αυτής στο τρέχον στιγμιότυπο του κόσμου, s , να είναι σε θέση να αλλάξει την κατάσταση της μεταβλητής. Ο Pednault κατηγοριοποιεί τα αξιώματα αποτελεσμάτων στα θετικά αξιώματα αποτελεσμάτων για κάποια μεταβλητή R , σε σχέση με μια ενέργεια, a και στα αρνητικά αξιώματα αποτελεσμάτων για κάποια μεταβλητή R , σε σχέση με μια ενέργεια, a .

Θετικά Αξιώματα Αποτελεσμάτων

Τα αξιώματα αυτά δείχνουν σε γλώσσα λογισμού καταστάσεων το μηχανισμό με τον οποίο είναι δυνατόν μια μεταβλητή, R , μπορεί να αλλάξει τιμή από ψευδής σε αληθής. Έτσι τα αξιώματα αυτού του τύπου έχουν τη μορφή:

$$\pi_a(x, s) \text{ AND } \varepsilon_{R^+}(x, y, s) \Rightarrow R(y, \text{do}(a(x), s))$$

Η φόρμουλα $\pi_a(x, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στο σύστημα στην κατάσταση s , ώστε να είναι ενεργοποιημένη η εκτέλεση της ενέργειας a . Οι προϋποθέσεις αυτές εξαρτώνται μονάχα από την κατάσταση που βρίσκεται ο κόσμος και συσχετίζονται μόνο κάποιες μεταβλητές με την ενεργοποίηση ή μη της ενέργειας και δεν αφορούν την ίδια τη μεταβλητή R . Η φόρμουλα $\varepsilon_{R^+}(x, y, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στον κόσμο ώστε μετά την εκτέλεση της ενέργειας a να αλλάξει τιμή η μεταβλητή, R , από ψευδής σε αληθής. Η αλλαγή αυτή αλλάζει το στιγμιότυπο του κόσμου από s σε s' το οποίο αποτυπώνεται ως το αποτέλεσμα της συνάρτησης $R(y, do(a(x)), s)$. Στην κατάσταση s' το αντικείμενο το οποίο παίρνει την τιμή αληθής από την προηγούμενη τιμή ψευδής είναι το αντικείμενο y και όχι το αντικείμενο x . Αυτό ίσως να φαίνεται παραπλανητικό, μιας και στις περισσότερες περιπτώσεις τα x, y θα αφορούν το ίδιο αντικείμενο όμως με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αποσυσχέτιση των προϋποθέσεων για την ενεργοποίηση της εκτέλεσης μιας ενέργειας σε σχέση με τις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρεί ο κόσμος ώστε μετά την εκτέλεση της ενέργειας να μπορεί να αλλάξει και η μεταβλητή R σε τιμή αληθής. Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η λογική πρόταση για τα αξιώματα θετικών αποτελεσμάτων θα αναλυθούν μερικά τέτοια παραδείγματα μέσα από τον απλό κόσμο που μελετάται:

- Για να αλλάξει η τιμή της μεταβλητής σπασμένο σε σχέση με την ενέργεια $drop$ θα πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη
 - κρατάει(r, x, s) AND $y=x$ AND εύθραυστο(y) \Rightarrow σπασμένο($y, do(drop(r, x), s)$)
 - Για να ενεργοποιηθεί η δυνατότητα εκτέλεσης της ενέργειας $drop$ θα πρέπει να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις ενέργειας που την αφορούν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει όπως αναλύθηκε προηγουμένως το ρομπότ να κρατάει κάποιο αντικείμενο x για να μπορέσει να το ρίξει. Το ποιο αντικείμενο κρατάει πρέπει να παραμένει σε αυτό το σημείο εντελώς ασύνδετο με το αντικείμενο το οποίο αφορά η αλλαγή της μεταβλητής σπασμένο μιας και το μόνο που θα πρέπει να μας αφορά είναι η δυνατότητα ενεργοποίησης της ενέργειας $drop$, ανεξαρτήτως αντικειμένου. Έπειτα θα πρέπει ο κόσμος να είναι σε τέτοια κατάσταση έτσι ώστε η εκτέλεση της ενέργειας να οδηγήσει στην αλλαγή της τιμής της μεταβλητής

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

από ψευδής σε αληθής. Η πρώτη από τις δύο εκφράσεις που μας αφορούν είναι το αντικείμενο το οποίο κρατάει το ρομπότ και το οποίο ουσιαστικά ενεργοποίησε και τη δυνατότητα της ρίψης να είναι το ίδιο με αυτό που πρόκειται να αλλάξει τιμή η μεταβλητή σπασμένο από ψευδής σε αληθής. Τέλος, θα πρέπει το ίδιο αντικείμενο να φέρει την ιδιότητα εύθραυστο το οποίο φαίνεται με την αξιολόγηση σε τιμή αληθής της αντίστοιχης μεταβλητής για το αντικείμενο.

- Για να αλλάξει η τιμή της μεταβλητής κρατάει, από ψευδής σε αληθής θα πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη:
 - $[(\forall z)\eta \text{ κρατάει}(r, z, s)] \wedge \neg \text{βαρύ}(x) \wedge \text{δίπλα}(r, x, s) \wedge r'=r \wedge y=x \Rightarrow \text{κρατάει}(r', y, \text{pickup}(r, x), s)$
 - Για να ενεργοποιηθεί η δυνατότητα εκτέλεσης της ενέργειας pickup θα πρέπει να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις ενέργειας που την αφορούν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει όπως αναλύθηκε προηγουμένως το ρομπότ, r , να μην κρατάει κάποιο άλλο αντικείμενο z στο στιγμιότυπο του κόσμου, s . καταρχήν το ρομπότ στο οποίο αναφέρεται η ενεργοποίηση της ενέργειας να είναι ίδιο με το ρομπότ που αναφέρεται η αλλαγή της μεταβλητής σε τιμή αληθής, πράγμα που αποτυπώνεται με τη λογική πρόταση $r'=r$. Επίσης θα πρέπει το αντικείμενο x που είναι το όρισμα της ενέργειας pickup να μην είναι βαρύ, οπότε η μεταβλητή βαρύ με όρισμα το αντικείμενο x θα πρέπει να μην ικανοποιείται, πράγμα που αποτυπώνεται με τη λογική πρόταση: $\neg \text{βαρύ}(x)$. Το αντικείμενο, x , το οποίο πρόκειται να σηκώσει το ρομπότ με την ανάλογη ενέργεια θα πρέπει να είναι κοντά σε σχέση με το ρομπότ στο οποίο αναφέρεται η ενέργεια, οπότε η μεταβλητή δίπλα με ορίσματα το ρομπότ που πρόκειται να κάνει την ενέργεια και το αντικείμενο x που επίσης συμμετέχει στην ενέργεια θα πρέπει να θέτουν τη

μεταβλητή δίπλα στην τιμή αληθής, πράγμα που αποτυπώνεται σε λογική πρόταση ως: $\text{δίπλα}(t, x, s)$. Από τη στιγμή που θα εκτελεστεί η ενέργεια pickup για να αλλάξει η τιμή της μεταβλητής κρατάει με ορίσματα ένα ρομπότ r' και ένα αντικείμενο y θα πρέπει μονάχα το αντικείμενο στο οποίο αναφέρεται η μεταβλητή κρατάει σε σχέση με το αντικείμενο που ενεργοποίησε την ενέργεια pickup να είναι ακριβώς τα ίδια, οπότε θα πρέπει να ισχύει, $y=x$ κι επίσης το ρομπότ για το οποίο ενεργοποιήθηκε η ενέργεια σε σχέση με το ρομπότ το οποίο θα συμμετέχει στην αλλαγή της κατάστασης του κόσμου με ταυτόχρονη αλλαγή της τιμής της μεταβλητής κρατάει να είναι ακριβώς τα ίδια.

Αρνητικά Αξιώματα Αποτελεσμάτων

Τα αξιώματα αυτά δείχνουν σε γλώσσα λογισμού καταστάσεων το μηχανισμό με τον οποίο είναι δυνατόν μια μεταβλητή, R , μπορεί να αλλάξει τιμή από αληθής σε ψευδής. Έτσι τα αξιώματα αυτού του τύπου έχουν τη μορφή:

$$\pi_a(x, s) \text{ AND } \varepsilon_R(x, y, s) \Rightarrow \neg R(y, \text{do}(a(x), s))$$

Η φόρμουλα $\pi_a(x, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στο σύστημα στην κατάσταση s , ώστε να είναι ενεργοποιημένη η εκτέλεση της ενέργειας a . Οι προϋποθέσεις αυτές εξαρτώνται μονάχα από την κατάσταση που βρίσκεται ο κόσμος και συσχετίζονται μόνο κάποιες μεταβλητές με την ενεργοποίηση ή μη της ενέργειας και δεν αφορούν την ίδια τη μεταβλητή R . Η φόρμουλα $\varepsilon_R(x, y, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στον κόσμο ώστε μετά την εκτέλεση της ενέργειας a να αλλάξει τιμή η μεταβλητή, R , από αληθής σε ψευδής. Η αλλαγή αυτή αλλάζει το στιγμιότυπο του κόσμου από s σε s' το οποίο αποτυπώνεται ως το αποτέλεσμα της συνάρτησης $R(y, \text{do}(a(x)), s)$. Στην κατάσταση s' το αντικείμενο το οποίο παίρνει την τιμή ψευδής από την προηγούμενη τιμή αληθής είναι το αντικείμενο y και όχι το αντικείμενο x . Αυτό ίσως να φαίνεται παραπλανητικό, μιας και στις περισσότερες περιπτώσεις τα x, y θα αφορούν το ίδιο αντικείμενο όμως με αυτόν τον τρόπο

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

επιτυγχάνεται η αποσυσχέτιση των προϋποθέσεων για την ενεργοποίηση της εκτέλεσης μιας ενέργειας σε σχέση με τις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρεί ο κόσμος ώστε μετά την εκτέλεση της ενέργειας να μπορεί να αλλάξει και η μεταβλητή R σε τιμή ψευδής. Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η λογική πρόταση για τα αξιώματα θετικών αποτελεσμάτων θα αναλυθούν μερικά τέτοια παραδείγματα μέσα από τον απλό κόσμο που μελετάται:

- Για να αλλάξει η τιμή της μεταβλητής σπασμένο, από αληθής σε ψευδής θα πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη:
 - $\text{έχει_κόλλα}(r, s) \wedge \text{σπασμένο}(x, s) \wedge y=x \Rightarrow \neg \text{σπασμένο}(y, \text{do}(\text{repair}(r, x)), s)$
 - Για να ενεργοποιηθεί η δυνατότητα εκτέλεσης της ενέργειας `repair` θα πρέπει να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις ενέργειας που την αφορούν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει όπως αναλύθηκε προηγουμένως το ρομπότ, r , να έχει στη διάθεση του κόλλα η οποία μπορεί να επισκευάσει αντικείμενα. Επίσης θα πρέπει στην κατάσταση s , το αντικείμενο το οποίο πρόκειται να επισκευαστεί μέσω της ενέργειας `repair` να είναι σπασμένο το οποίο φαίνεται με αξιολόγηση σε τιμή αληθής της μεταβλητής `σπασμένο`. Αν ισχύουν στο στιγμιότυπο του κόσμου s , οι δύο παραπάνω συνθήκες, τότε είναι δυνατόν να εκτελεστεί η ενέργεια `repair` με ορίσματα το ίδιο αντικείμενο x . Από τη στιγμή που θα εκτελεστεί η ενέργεια το μόνο που απαιτείται ώστε στην κατάσταση s η μεταβλητή `σπασμένο` να πάρει την τιμή ψευδής για κάποιο αντικείμενο y είναι το αντικείμενο για το οποίο ενεργοποιήθηκε η ενέργεια `repair`, x , να είναι ακριβώς το ίδιο με το αντικείμενο για το οποίο η αξιολόγηση της μεταβλητής `σπασμένο` θα αλλάξει από ψευδής σε αληθής.
 - $y=x \Rightarrow \neg \text{κρατάει}(y, \text{do}(\text{drop}(r, x)), s)$

- Για να ενεργοποιηθεί η δυνατότητα εκτέλεσης της ενέργειας $d\sigma$ και να αλλάξει την κατάσταση της μεταβλητής κρατάει από αληθής σε ψευδής σε κάποιο αντικείμενο y μέσω της ενέργειας $d\sigma$ το μόνο που απαιτείται είναι να μπορεί να εκτελεστεί η ενέργεια αυτή για κάποιο αντικείμενο x σε κάποια κατάσταση s είναι το αντικείμενο το οποίο αφορά η ενέργεια να είναι το ίδιο για το οποίο η μεταβλητή κρατάει πρόκειται να αλλάξει σε τιμή ψευδής μετά την εκτέλεση της ενέργειας.

6. Αξιώματα πλαισίου

Εκτός από τα αξιώματα αποτελεσμάτων που χαρακτηρίζουν τους μηχανισμούς μέσω των οποίων μια μεταβλητή μπορεί να αλλάξει τιμή από ψευδής σε αληθής ή το ανάποδο, υπάρχουν και τα αξιώματα πλαισίου τα οποία περιγράφουν τις μεταβλητές οι οποίες παραμένουν αναλλοίωτες με το πέρασ εκτέλεσης μιας εντολής. Η ανάγκη για το χαρακτηρισμό αυτών των μεταβλητών είχε τονιστεί από τους ίδιους που ανακάλυψαν το πρόβλημα του πλαισίου στη ρομποτική. Στην ουσία, το πρόβλημα του πλαισίου έγκειται στον τρόπο με τον οποίο αναπαρίστανται με όσο το δυνατόν λιγότερες λογικές προτάσεις οι μηχανισμοί που περιγράφουν όλες τις μεταβλητές οι οποίες δεν αλλάζουν τιμή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης ενεργειών στον κόσμο.

Η ανάγκη για την εύρεση αποδοτικών τρόπων λύσης του προβλήματος του πλαισίου πηγάζει από τον υπερβολικά μεγάλο αριθμό από αξιώματα πλαισίου τα οποία θα πρέπει να χαρακτηριστούν. Αυτό προκύπτει από την τοπική φύση των ενεργειών οι οποίες μεταβάλλουν την τιμή μονάχα σε ένα πολύ μικρό υποσύνολο των μεταβλητών τα οποία χαρακτηρίζουν τα αντικείμενα του κόσμου. Ο αριθμός των λογικών προτάσεων που απαιτούνται με αυτόν τον τρόπο είναι στην ουσία η καταμέτρηση του αποτελέσματος του καρτεσιανού γινομένου μεταξύ των συνόλων που εσωκλείουν τις ενέργειες που είναι πιθανό να συμβούν στον κόσμο σε οποιαδήποτε κατάσταση του και τις μεταβλητές που αξιολογούνται έχοντας ως ορίσματα τις οντότητες του ίδιου κόσμου.

Θετικά Αξιώματα πλαισίου

Τα αξιώματα αυτά δείχνουν σε γλώσσα λογισμού καταστάσεων το μηχανισμό με τον οποίο είναι δυνατόν μια μεταβλητή, R , να μπορεί να κρατήσει την τιμή αληθής μετά την εκτέλεση μιας ενέργειας. Έτσι τα αξιώματα αυτού του τύπου έχουν τη μορφή:

$$\pi_a(x, s) \wedge \varphi_{R^+}(x, y, s) \wedge R(y, s) \Rightarrow R(y, \text{do}(a(x), s))$$

Η φόρμουλα $\pi_a(x, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στο σύστημα στην κατάσταση s , ώστε να είναι ενεργοποιημένη η εκτέλεση της ενέργειας a . Οι προϋποθέσεις αυτές εξαρτώνται μονάχα από την κατάσταση που βρίσκεται ο κόσμος και συσχετίζονται μόνο κάποιες μεταβλητές με την ενεργοποίηση ή μη της ενέργειας και δεν αφορούν την ίδια τη μεταβλητή R . Η φόρμουλα $\varphi_{R^+}(x, y, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στον κόσμο ώστε μετά την εκτέλεση της ενέργειας a , η μεταβλητή R να κρατήσει την τιμή αληθής. Η φόρμουλα $\varphi_{R^+}(x, y, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στον κόσμο ώστε μετά την εκτέλεση της ενέργειας a να παραμείνει η τιμή της μεταβλητής, R , αληθής. Η αλλαγή αυτή αλλάζει το στιγμιότυπο του κόσμου από s σε s' το οποίο αποτυπώνεται ως το αποτέλεσμα της συνάρτησης $R(y, \text{do}(a(x)), s)$. Στην κατάσταση s' το αντικείμενο το οποίο κρατάει την τιμή αληθής από την προηγούμενη κατάσταση είναι το αντικείμενο y και όχι το αντικείμενο x . Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η λογική πρόταση για τα θετικά αξιώματα πλαισίου θα αναλυθούν μερικά τέτοια παραδείγματα μέσα από τον απλό κόσμο που μελετάται:

- Το ρίξιμο ενός αντικειμένου, x , από το ρομπότ, r , αφήνει το χρώμα του αντικειμένου στην ίδια τιμή με προηγουμένως.
 - $\text{κρατάει}(r, x, s) \wedge \text{χρώμα}(y, c, s) \Rightarrow \text{χρώμα}(y, c, \text{do}(\text{drop}(r, x), s))$
 - Για να ενεργοποιηθεί η δυνατότητα εκτέλεσης της ενέργειας drop θα πρέπει να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις ενέργειας που την αφορούν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει όπως αναλύθηκε προηγουμένως το ρομπότ να κρατάει κάποιο αντικείμενο x για να μπορέσει να το ρίξει. Το ποιο αντικείμενο κρατάει πρέπει να παραμένει σε αυτό το σημείο εντελώς

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

ασύνδετο με το αντικείμενο το οποίο αφορά η τιμή της μεταβλητής χρώμα μιας και το μόνο που θα πρέπει να μας αφορά είναι η δυνατότητα ενεργοποίησης της ενέργειας drop, ανεξαρτήτως αντικειμένου. Επίσης, θα πρέπει η μεταβλητή χρώμα να είχε αξιολογηθεί στην κατάσταση x , πριν την εκτέλεση της ενέργειας drop στην τιμή στην οποία περιμένουμε να παραμείνει και μετά την εκτέλεση της ενέργειας. Η παραπάνω προϋπόθεση φαίνεται στο αριστερό μέλος της συνεπαγωγής με την έκφραση χρώμα(y, c, s). Πρέπει να είναι ξεκάθαρο σε αυτό το σημείο ότι τα αντικείμενα που το ρομπότ μπορεί να πετάει χωρίς να αλλάζει το χρώμα του αντικειμένου y , μπορεί είτε να είναι άσχετα με το αντικείμενο αυτό, αλλά μπορεί να είναι και το ίδιο αντικείμενο, οπότε με λίγα λόγια $x=y$. Και στις δύο περιπτώσεις το χρώμα του εκάστοτε αντικειμένου παραμένει αμετάβλητο.

Αρνητικά Αξιώματα πλαισίου

Τα αξιώματα αυτά δείχνουν σε γλώσσα λογισμού καταστάσεων το μηχανισμό με τον οποίο είναι δυνατόν μια μεταβλητή, R , να μπορεί να κρατήσει την τιμή ψευδής μετά την εκτέλεση μιας ενέργειας. Έτσι τα αξιώματα αυτού του τύπου έχουν τη μορφή:

$$\pi_a(x, s) \wedge \varphi_R(x, y, s) \wedge \neg R(y, s) \Rightarrow \neg R(y, do(a(x), s))$$

Η φόρμουλα $\pi_a(x, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στο σύστημα στην κατάσταση s , ώστε να είναι ενεργοποιημένη η εκτέλεση της ενέργειας a . Οι προϋποθέσεις αυτές εξαρτώνται μονάχα από την κατάσταση που βρίσκεται ο κόσμος

και συσχετίζουν μόνο κάποιες μεταβλητές με την ενεργοποίηση ή μη της ενέργειας και δεν αφορούν την ίδια τη μεταβλητή R. Η φόρμουλα $\varphi_R(x, y, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στον κόσμο ώστε μετά την εκτέλεση της ενέργειας α , η μεταβλητή R να κρατήσει την τιμή ψευδής. Η φόρμουλα $\varphi_{R'}(x, y, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στον κόσμο ώστε μετά την εκτέλεση της ενέργειας α να παραμείνει η τιμή της μεταβλητής, R, ψευδής. Η αλλαγή αυτή αλλάζει το στιγμιότυπο του κόσμου από s σε s' το οποίο αποτυπώνεται ως το αποτέλεσμα της συνάρτησης $R(y, do(\alpha(x)), s)$. Στην κατάσταση s' το αντικείμενο το οποίο κρατάει την τιμή ψευδής από την προηγούμενη κατάσταση είναι το αντικείμενο y και όχι το αντικείμενο x . Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η λογική πρόταση για τα αρνητικά αξιώματα πλαισίου θα αναλυθούν μερικά τέτοια παραδείγματα μέσα από τον απλό κόσμο που μελετάται:

- Το ρίζιμο αντικειμένου από το ρομπότ, r , μπορεί να αφήνει τη μεταβλητή σπασμένο στην τιμή ψευδής με όρισμα κάποιο αντικείμενο. Η παραπάνω πρόταση αποτυπώνεται στη λογική πρόταση που ακολουθεί:
 - $\text{κρατάει}(r, x, s) \wedge \neg \text{σπασμένο}(y, s) \wedge [(y \neq x) \vee \neg \text{εύθραυστο}(y)] \Rightarrow \neg \text{σπασμένο}(y, do(\text{drop}(r,x), s))$
 - Για να ενεργοποιηθεί η δυνατότητα εκτέλεσης της ενέργειας drop θα πρέπει να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις ενέργειας που την αφορούν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει όπως αναλύθηκε προηγουμένως το ρομπότ να κρατάει κάποιο αντικείμενο x για να μπορέσει να το ρίξει. Το ποιο αντικείμενο κρατάει πρέπει να παραμένει σε αυτό το σημείο εντελώς ασύνδετο με το αντικείμενο το οποίο αφορά η τιμή της μεταβλητής σπασμένο μιας και το μόνο που θα πρέπει να μας αφορά είναι η δυνατότητα ενεργοποίησης της ενέργειας drop , ανεξαρτήτως αντικειμένου. Επίσης, θα πρέπει η μεταβλητή σπασμένο να είχε αξιολογηθεί στην κατάσταση x , πριν την εκτέλεση της ενέργειας drop στην τιμή στην οποία περιμένουμε να παραμείνει και μετά την εκτέλεση της ενέργειας. Η παραπάνω προϋπόθεση φαίνεται στο αριστερό μέλος της συνεπαγωγής με την έκφραση $\text{σπασμένο}(y, s)$. Πρέπει να είναι ξεκάθαρο σε αυτό το σημείο ότι τα αντικείμενα που το ρομπότ μπορεί να πετάει χωρίς να αλλάζει τιμή η μεταβλητή σπασμένο του αντικειμένου y , μπορεί είτε να είναι άσχετα με το

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

αντικείμενο αυτό, αλλά μπορεί να είναι και το ίδιο αντικείμενο, οπότε με λίγα λόγια $x=y$. Ανάλογα με την περίπτωση μπορεί οι επιπτώσεις στην τιμή της μεταβλητής να είναι διαφορετικές, οπότε θα μελετηθούν ξεχωριστά:

- Στην πρώτη περίπτωση αν το y δεν είναι το ίδιο με το x τότε το ρίξιμο του αντικειμένου x δεν επηρεάζει την τιμή της μεταβλητής σπασμένο για το αντικείμενο x , οπότε αν πριν το ρίξιμο είχε την τιμή ψευδής θα παραμείνει σε αυτήν.
- Στην περίπτωση που το αντικείμενο y είναι ακριβώς το ίδιο με το αντικείμενο x , το ρίξιμο του αντικειμένου αυτού μέσω της ενέργειας αυτής στον κόσμο που μελετάται μπορεί να οδηγήσει στην αλλαγή της τιμής της μεταβλητής σπασμένο για το αντικείμενα x ($=y$) αν η μεταβλητή εύθραυστο για το αντικείμενο αυτό έχει αξιολογηθεί στην κατάσταση s με την τιμή αληθής. Οπότε σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να έχει αξιολογηθεί η τιμή εύθραυστο με την τιμή ψευδής. Με αυτόν τον τρόπο ακόμα κι αν το ρομπότ ρίξει το αντικείμενα αυτό δε θα συμβεί καμία αλλαγή στη μεταβλητή σπασμένο μιας και το αντικείμενο είναι από τη φύση του μη-εύθραυστο.

Από τις παραπάνω δύο περιπτώσεις είναι ξεκάθαρο ότι αρκεί το x να είναι διάφορο από το y ή να είναι το αντικείμενο που θα πέσει μη-εύθραυστο ώστε να παραμείνει η τιμή της μεταβλητής σπασμένο χωρίς αλλαγές. Αυτό φαίνεται και στο σχετικό αξίωμα αρνητικού πλαισίου μέσω της λογικής πρότασης $[(y \neq x) \vee \neg \text{εύθραυστο}(y)]$. Για να παραμείνει όμως στην τιμή ψευδής θα πρέπει να είχε αξιολογηθεί με την τιμή ψευδής στην κατάσταση s , οπότε θα πρέπει επίσης να ισχύει ότι $\neg \text{σπασμένο}(y, s)$.

Η πρόταση του Reiter για τα Αξιώματα Πλαισίου

Ο Reiter πρότεινε μία νέα μέθοδο αναπαράστασης των δυναμικών του κόσμου η οποία βασίζεται στη γενικευμένη υπόθεση πληρότητας. Η μέθοδος ξεκινάει από τα αξιώματα αποτελέσματος, τα οποία αρχικά συμπύσσει σε μία λογική πρόταση ανά μεταβλητή. Έπειτα τα αξιώματα αποτελέσματος χωρίζονται σε δύο τμήματα, στο πρώτο αναπτύσσονται οι προϋποθέσεις για την ενεργοποίηση της εκάστοτε ενέργειας και στο δεύτερο όπου φαίνονται οι προϋποθέσεις που πρέπει να ικανοποιούνται στον κόσμο ώστε η εκτέλεση της ενέργειας να μπορεί να οδηγήσει στην αλλαγή της τιμής της μεταβλητής.

Οι προϋποθέσεις ενεργοποίησης της κάθε ενέργειας είναι ανεξάρτητες από την αλλαγή των τιμών των μεταβλητών του κόσμου. Έτσι για κάθε ενέργεια μπορεί να αναπτυχθεί μονάχα μια λογική πρόταση η οποία να αναπαριστά τη δυνατότητα εκτέλεσης της και στα αξιώματα να χρησιμοποιείται η λογική πρόταση αυτή χωρίς να χρειάζεται κάθε φορά να καταμετρώνται όλες οι προϋποθέσεις της κάθε ενέργειας.

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

Θετικά Αξιώματα με τη μέθοδο του Reiter

Τα θετικά αξιώματα αποτελέσματος όπως αυτά αναπαριστώνται με τη μέθοδο του Reiter θα παρουσιαστούν μέσω ενός παραδείγματος. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε όλα τα θετικά αξιώματα πλαισίου για τη μεταβλητή 'σπασμένο' ως προς τις ενέργειες οι οποίες μπορούν να μεταβάλλουν την τιμή της μεταβλητής αυτής στην τιμή αληθής από την τιμή ψευδής. Οι ενέργειες η οποίες έχουν τη δυνατότητα αυτή στον κόσμο που μελετάται είναι οι drop, explode και τα αντίστοιχα αξιώματα είναι τα:

$$\text{κρατάει}(r, x, s) \wedge y=x \wedge \text{εύθραυστο}(y) \Rightarrow \text{σπασμένο}(y, \text{do}(\text{drop}(r, x), s))$$
$$\text{bomb}(b) \wedge \text{δίπλα}(b, y, s) \Rightarrow \text{σπασμένο}(y, \text{do}(\text{explode}(b), s))$$

τα οποία μπορούν να συμπυχθούν σε μία συγκεντρωτική λογική πρόταση όλων των ενεργειών ως εξής:

$$\{[\text{κρατάει}(r, x, s) \wedge y=x \wedge \text{εύθραυστο}(y) \wedge a=\text{drop}(r, x)] \vee [\text{bomb}(b) \wedge \text{δίπλα}(b, y, s) \wedge a=\text{explode}(b)]\} \Rightarrow \text{σπασμένο}(y, \text{do}(a, s))$$

Κάθε τέτοια λογική πρόταση, αποτελείται από δύο μέρη στο αριστερό τμήμα της συνεπαγωγής για κάθε ενέργεια. Στο πρώτο μέρος περιγράφονται οι προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν για να είναι δυνατόν να εκτελεστεί η κάθε ενέργεια και στο δεύτερο μέρος οι προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν στις τιμές των μεταβλητών του κόσμου έτσι ώστε η εκτέλεση της ενέργειας αυτής να προκαλέσει την αλλαγή στην τιμή της μεταβλητής από ψευδής σε αληθής. Έτσι στην παραπάνω πρόταση για κάθε μία από τις

Ανδρέας Δεληγιάννης

ενέργειες έχουμε τα εξής μέρη:

$\text{drop}(r, x)$

$\text{κρατάει}(r, x, s)$: για να εκτελεστεί η εντολή drop με όρισμα το ρομπότ r και το αντικείμενο x θα πρέπει το ρομπότ r να κρατάει το ίδιο αντικείμενο x στην κατάσταση s .

$y=x \wedge \text{εύθραυστο}(y)$: αν εκτελεστεί η παραπάνω ενέργεια για να αλλάξει η μεταβλητή σπασμένο από τιμή ψευδής σε τιμή αληθής θα πρέπει κάποιο αντικείμενο y να είναι εύθραυστο και το αντικείμενο x το οποίο πρόκειται να ρίξει το ρομπότ να είναι ακριβώς το ίδιο με το αντικείμενο x .

$\text{explode}(b)$

$\text{bomb}(b)$: για να εκτελεστεί η ενέργεια $\text{explode}(b)$ θα πρέπει το αντικείμενο b να αξιολογείται σαν όρισμα της μεταβλητής bomb με την τιμή αληθής, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει το b να είναι βόμβα.

$\text{δίπλα}(b, y, s)$: αφού εκτελεστεί η ενέργεια $\text{explode}(b)$, για να αλλάξει η τιμή της μεταβλητής σπασμένο από ψευδής σε αληθής θα πρέπει το αντικείμενο b να βρίσκεται δίπλα στο αντικείμενο y για το οποίο η αξιολόγηση της μεταβλητής σπασμένο θα είναι αληθής μετά την αλλαγή κατάστασης από την έκρηξη της βόμβας.

Αν δούμε συνολικά τις λογικές προτάσεις που πρέπει να αναπτυχθούν για να περιγραφούν όλα τα αξιώματα αποτελέσματος θα συμπεράνουμε ότι το πρώτο μέρος για κάθε αξίωμα πλαισίου περιλαμβάνει τις προϋποθέσεις για να συμβεί η εκάστοτε ενέργεια. Έτσι αν η ενέργεια drop συμμετέχει σε ένα αριθμό K αξιωμάτων θα πρέπει K φορές να αναπτύξουμε τις προϋποθέσεις για την εκτέλεση της. Αυτό δεν είναι πρακτικό μιας και σε κάθε αξίωμα οι προϋποθέσεις ενεργοποίησης μιας ενέργειας είναι ανεξάρτητες από την ίδια τη μεταβλητή που αλλάζει τιμή. Οπότε συνολικά θα μπορούσαμε να αναπτύξουμε μονάχα μια φορά τις προϋποθέσεις για κάθε ενέργεια σε μια λογική πρόταση Π_ϵ και να χρησιμοποιούμε στα αξιώματα το Π_ϵ μέσα στις λογικές προτάσεις.

Συνολικά για κάθε εντολή θα αναπτύσσουμε μία λογική πρόταση με τις προϋποθέσεις της την οποία και θα ονομάζουμε Poss . Έτσι οι παραπάνω λογικές προτάσεις θα αλλάξουν σε:

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

$$\text{Poss}(a, s) \wedge [\exists(r, x) y=x \wedge \text{εύθραυστο}(y) \wedge a=\text{drop}(r, x)] \vee [\exists(b)\text{δίπλα}(b, y, s) \\ a=\text{explode}(b)] \Rightarrow \text{σπασμένο}(y, \text{do}(a, s))$$

όπου

$$\text{κρατάει}(r, x, s) \Rightarrow \text{Poss}(\text{drop}(r, x), s)$$
$$\text{bomb}(b) \Rightarrow \text{Poss}(\text{explode}(b), s)$$

Με αυτόν τον τρόπο για κάθε ενέργεια θα υπάρχει στο τέλος και μια πρόταση Poss η οποία θα περιγράφει τις προϋποθέσεις της κάθε ενέργειας και τα αξιώματα θα απλοποιηθούν.

Η παραπάνω πρόταση περιγράφει όλους τους τρόπους με τους οποίους οποιαδήποτε ενέργεια a μπορεί να οδηγήσει στην αλλαγή της τιμής μεταβλητής σπασμένο από ψευδής σε αληθής. Μετά από λογική βελτιστοποίηση η παρατήρηση αυτή μπορεί να γραφεί ως:

$$\text{Poss}(a, s) \wedge \neg \text{σπασμένο}(y, s) \wedge \text{σπασμένο}(y, \text{do}(a, s)) \Rightarrow [\exists(r) \text{εύθραυστο}(y) \wedge \\ a=\text{drop}(r, y)] \vee [\exists(b)\text{δίπλα}(b, y, s) a=\text{explode}(b)]$$
$$\text{κρατάει}(r, x, s) \Rightarrow \text{Poss}(\text{drop}(r, x), s)$$
$$\text{bomb}(b) \Rightarrow \text{Poss}(\text{explode}(b), s)$$

Ανδρέας Δεληγιάννης

η οποία αποτελεί και την κάλυψη εξήγησης για τη μεταβλητή σπασμένο ως προς την ενέργεια drop.

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

Αρνητικά Αξιώματα με τη μέθοδο του Reiter

Τα αρνητικά αξιώματα αποτελέσματος όπως αυτά αναπαριστώνται με τη μέθοδο του Reiter θα παρουσιαστούν μέσω ενός παραδείγματος. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε όλα τα αρνητικά αξιώματα πλαισίου για τη μεταβλητή 'σπασμένο' ως προς τις ενέργειες οι οποίες μπορούν να μεταβάλλουν την τιμή της μεταβλητής αυτής στην τιμή ψευδής από την τιμή αληθής. Η ενέργεια η οποία έχει τη δυνατότητα αυτή στον κόσμο που μελετάται είναι η repair και τα αντίστοιχα αξιώματα είναι τα:

$$\text{έχει_κόλλα}(r, s) \wedge \text{σπασμένο}(x, s) \wedge y=x \Rightarrow \neg \text{σπασμένο}(y, \text{do}(\text{repair}(r, x)), s)$$

το οποία μπορεί να συμπυκνωθεί σε μία συγκεντρωτική λογική πρόταση ως εξής:

$$\text{έχει_κόλλα}(r, s) \wedge \text{σπασμένο}(x, s) \wedge y=x \wedge a=\text{repair}(r, x) \Rightarrow \neg \text{σπασμένο}(y, \text{do}(a, s))$$

Κάθε τέτοια λογική πρόταση, αποτελείται από δύο μέρη στο αριστερό τμήμα της συνεπαγωγής για κάθε ενέργεια. Στο πρώτο μέρος περιγράφονται οι προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν για να είναι δυνατόν να εκτελεστεί η κάθε ενέργεια και στο δεύτερο μέρος οι προϋποθέσεις που πρέπει να ισχύουν στις τιμές των μεταβλητών του κόσμου έτσι ώστε η εκτέλεση της ενέργειας αυτής να προκαλέσει την αλλαγή στην τιμή της μεταβλητής από ψευδής σε αληθής. Έτσι στην παραπάνω πρόταση για κάθε μία από τις ενέργειες έχουμε τα εξής μέρη:

Ανδρέας Δεληγιάννης

repair(r, x)

έχει_κόλλα(r, s) \wedge σπασμένο(x, s) : για να εκτελεστεί η ενέργεια repair με όρισμα το ρομπότ r και την κατάσταση s, θα πρέπει το ρομπότ r να έχει στη διάθεση του κόλλα στην κατάσταση s και να υπάρχει ένα αντικείμενο x το οποίο να είναι σπασμένο στην κατάσταση s και να είναι ακριβώς το ίδιο με αυτό που πρόκειται να επισκευάσει το ρομπότ.

y=x : για να αλλάξει η τιμή της μεταβλητής y στην τιμή αληθής θα πρέπει το αντικείμενο, x, που πρόκειται να διορθώσει το ρομπότ μέσω της ενέργειας repair να είναι ακριβώς το ίδιο με το αντικείμενο y.

Όπως και με την ενέργεια drop που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για τα θετικά αξιώματα, έτσι και με την ενέργεια repair χρειάζεται μονάχα μια φορά να αναπτύξουμε τις προϋποθέσεις για την εκτέλεση της σε μια λογική πρόταση Π_ε :

έχει_κόλλα(r, s) \wedge σπασμένο(x, s) \Rightarrow Poss(repair(r, x), s)

Έτσι συνολικά η προηγούμενη λογική πρόταση για το αρνητικό αξίωμα αποτελέσματος της ενέργειας ως προς τη μεταβλητή σπασμένο για την αλλαγή της τιμής της από αληθής σε ψευδής θα έχει ως εξής:

Poss(a, s) \wedge [\exists (r, x) y=x \wedge a=repair(r, x)] \Rightarrow \neg σπασμένο(y, do(a, s))

όπου

έχει_κόλλα(r, s) \wedge σπασμένο(x, s) \Rightarrow Poss(repair(r, x), s)

Η παραπάνω πρόταση περιγράφει όλους τους τρόπους με τους οποίους οποιαδήποτε ενέργεια a μπορεί να οδηγήσει στην αλλαγή της τιμής της μεταβλητής σπασμένο από αληθής σε ψευδής. Μετά από λογική απλοποίηση η παρατήρηση αυτή μπορεί να γραφεί

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

ως:

$$\text{Poss}(a, s) \wedge \text{σπασμένο}(y, s) \wedge \neg \text{σπασμένο}(y, \text{do}(a, s)) \Rightarrow [\exists (r) a=\text{repair}(r, y)]$$
$$\text{έχει_κόλλα}(r, s) \wedge \text{σπασμένο}(x, s) \Rightarrow \text{Poss}(\text{repair}(r, x), s)$$

η οποία αποτελεί και την κάλυψη εξήγησης για τη μεταβλητή σπασμένο ως προς την ενέργεια repair.

Ανδρέας Δεληγιάννης

Γενικευμένο Αξίωμα Θετικού και Αρνητικού Αποτελέσματος

Στη γενική περίπτωση, για κάθε μεταβλητή R ορίζεται με δόκιμο τρόπο το γενικευμένο αξίωμα θετικού αποτελέσματος ως εξής:

$$\text{Poss}(a, s) \wedge \gamma_{R^+}(a, s) \Rightarrow R(\text{do}(a, s))$$

όπου το $\text{Poss}(a, s)$ περιγράφει τη δυνατότητα να συμβεί η ενέργεια a στην κατάσταση s και το $\gamma_{R^+}(a, s)$ περιγράφει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να ικανοποιούνται στον κόσμο ώστε η τιμή της μεταβλητής R να αλλάξει από ψευδής σε αληθής μέσω οποιασδήποτε ενέργειας a .

Στη γενική περίπτωση, για κάθε μεταβλητή R ορίζεται με δόκιμο τρόπο το γενικευμένο αξίωμα αρνητικού αποτελέσματος ως εξής:

$$\text{Poss}(a, s) \wedge \gamma_{R^-}(a, s) \Rightarrow R(\text{do}(a, s))$$

όπου το $\text{Poss}(a, s)$ περιγράφει τη δυνατότητα να συμβεί η ενέργεια a στην κατάσταση s και το $\gamma_{R^-}(a, s)$ περιγράφει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να ικανοποιούνται στον κόσμο ώστε η τιμή της μεταβλητής R να αλλάξει από αληθής σε ψευδής μέσω οποιασδήποτε ενέργειας a .

Όσον αφορά το $\text{Poss}(a, s)$ ορίζεται επίσης δόκιμα τόσο για τα αξιώματα θετικού όσο και για τα αξιώματα αρνητικού αποτελέσματος ως εξής:

$$\pi_A(s) \Rightarrow \text{Poss}(A, s)$$

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

Αξίωμα Κάλυψης Εξήγησης για Θετικά και Αρνητικά Αποτελέσματα

Το γενικευμένο αξίωμα θετικού αποτελέσματος παρουσιάζει όλους τους τρόπους με τους οποίους μια μεταβλητή μπορεί να αλλάξει τιμή από ψευδής σε αληθής. Έτσι αν μια οποιαδήποτε από τις ενέργειες a ήταν δυνατόν να συμβεί στην κατάσταση s και η τιμή της μεταβλητής άλλαξε από την κατάσταση s όπου ήταν ψευδής στην κατάσταση που ακολούθησε και στην οποία έγινε αληθής, συμπεραίνουμε ότι η ενέργεια αυτή έγινε οπότε και όλες οι μεταβλητές που έπρεπε να έχουν συγκεκριμένες τιμές για να συμβεί η ενέργεια είχαν ικανοποιηθεί (άρα το γ_{R^+} είχε ικανοποιηθεί). Αυτή η εξήγηση της αλλαγής των τιμών των μεταβλητών ονομάζεται και κάλυψη εξήγησης αφού καλύπτει τα σενάρια που χρειάζεται για να εξηγηθεί η παραπάνω αλλαγή στον κόσμο.

Το αξίωμα κάλυψης εξήγησης γράφεται με δόκιμο τρόπο ως :

$$\text{Poss}(a, s) \wedge \neg R(s) \wedge R(\text{do}(a, s)) \Rightarrow \gamma_{R^+}$$

Το γενικευμένο αξίωμα αρνητικού αποτελέσματος παρουσιάζει όλους τους τρόπους με τους οποίους μια μεταβλητή μπορεί να αλλάξει τιμή από αληθής σε ψευδής. Έτσι αν μια οποιαδήποτε από τις ενέργειες a ήταν δυνατόν να συμβεί στην κατάσταση s και η τιμή της μεταβλητής άλλαξε από την κατάσταση s όπου ήταν αληθής στην κατάσταση που ακολούθησε και στην οποία έγινε ψευδής, συμπεραίνουμε ότι η ενέργεια αυτή έγινε οπότε και όλες οι μεταβλητές που έπρεπε να έχουν συγκεκριμένες τιμές για να συμβεί η ενέργεια είχαν ικανοποιηθεί (άρα το γ_{R^-} είχε ικανοποιηθεί). Αυτή η εξήγηση της αλλαγής των τιμών των μεταβλητών ονομάζεται και κάλυψη εξήγησης αφού καλύπτει τα σενάρια που χρειάζεται για να εξηγηθεί η παραπάνω αλλαγή στον κόσμο.

Το αξίωμα κάλυψης εξήγησης γράφεται με δόκιμο τρόπο ως :

Ανδρέας Δεληγιάννης

$$\text{Poss}(a, s) \wedge R(s) \wedge \neg R(\text{do}(a, s)) \Rightarrow \gamma_{R^-}$$

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

Μοναδικότητα Αξιωμάτων για Ενέργειες και Καταστάσεις

Με τη μέθοδο του Reiter τα ονόματα των ενεργειών αντικαταστάθηκαν από το αναγνωριστικό 'a' το οποίο αναπαριστά οποιαδήποτε ενέργεια θα εμφανιζόταν σαν ξεχωριστή λογική πρόταση στα αξιώματα αποτελεσμάτων. Θα πρέπει όμως σε αυτό το σημείο να οριστεί η ισότητα μεταξύ δύο ενεργειών έτσι ώστε αν έχουν την ίδια ακριβώς αναπαράσταση να μη χρειάζεται να επαναλαμβάνονται και να συμπτύσσονται σε μία μέσω του αναγνωριστικού 'a'.

Έτσι για να είναι δύο ενέργειες a_1, a_2 ισοδύναμες θα πρέπει να έχουν ακριβώς τα ίδια ορίσματα, οπότε θα πρέπει να ισχύει:

$$a_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_2(y_1, y_2, \dots, y_n) \Rightarrow (x_1 == y_1) \wedge (x_2 == y_2) \wedge \dots \wedge (x_n == y_n)$$

Με ακριβώς τον ίδιο τρόπο θα πρέπει να οριστεί και η ισότητα μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων. Αρχικά, ορίζεται ότι το αρχικό στιγμιότυπο του κόσμου που αντιστοιχεί στην κατάσταση S_0 δεν είναι ισοδύναμο με κάποιο άλλο στιγμιότυπο του κόσμου οπότε ισχύει ότι:

$$S_0 \neq do(a, s)$$

το οποίο δείχνει ότι η αρχική κατάσταση S_0 δεν προκύπτει από καμία κατάσταση s μέσω καμίας ενέργειας a όπως συμβαίνει με όλες τις υπόλοιπες συμβατικές καταστάσεις.

Ανδρέας Δεληγιάννης

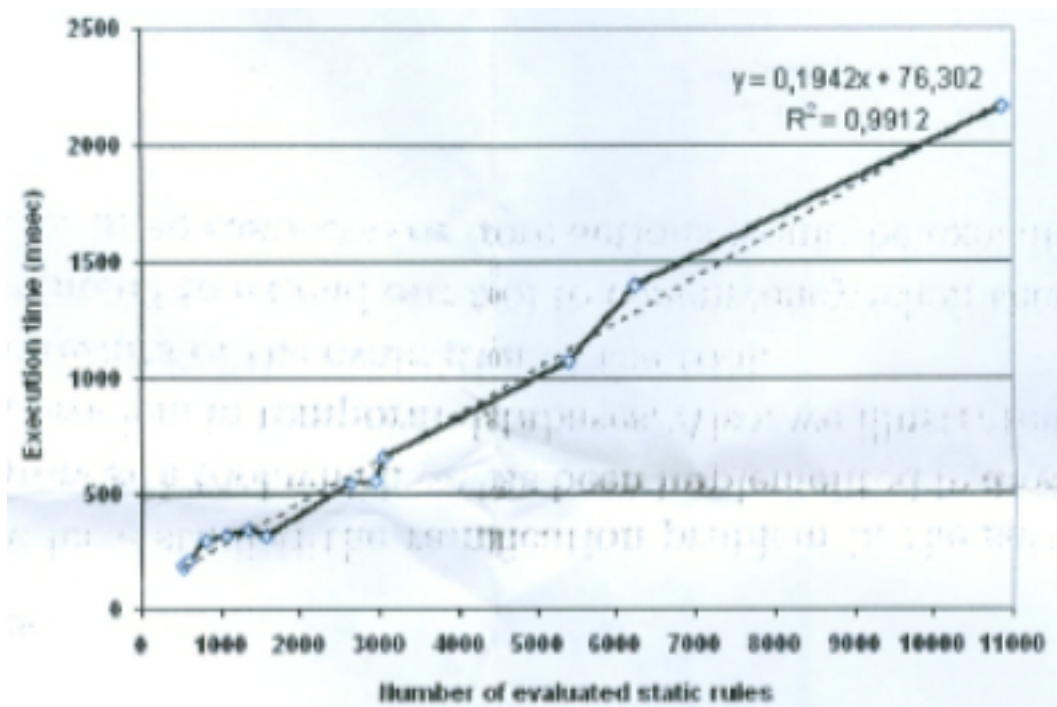
Για να είναι δύο καταστάσεις s, s' ισοδύναμες θα πρέπει να προκύπτουν από την ίδια προηγούμενη κατάσταση S_{pre} μέσω της εκτέλεσης της ίδιας ενέργειας a . Έτσι θα πρέπει να ισχύει:

$$do(S_{pre}, a) = do(S_{pre}', a) \Rightarrow S_{pre} == S_{pre}' \wedge a == a'$$

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

Πρακτικές Εφαρμογές

Στο [12] παρουσιάζεται η υλοποίηση ενός συστήματος που αναλύει σχέσεις μεταξύ αντικειμένων σε ένα δυναμικό σύστημα. Ένα γεγονός είναι δυνατόν να επηρεάζει περισσότερα του ενός αντικείμενα δημιουργώντας μια σειρά αλυσιδωτών αντιδράσεων στο σύστημα. Γενικά υπάρχει η πεποίθηση ότι η ανάλυση των δυναμικών συστημάτων είναι πολύ ακριβή υπολογιστικά οδηγώντας συνήθως σε συστήματα ανάλυσης με εκθετική πολυπλοκότητα.



Όμως, όπως φαίνεται και στο σχήμα, η σχέση μεταξύ του χρόνου εκτέλεσης του εργαλείου και του αριθμού των αξιωματών που πρέπει να αναλυθούν είναι γραμμικός δείχνοντας έτσι ότι εργαλεία τα οποία αναλύουν τις σχέσεις και τις εξαρτήσεις

Ανδρέας Δεληγιάννης

στοιχείων σε δυναμικά συστήματα δεν είναι κατ' ανάγκη εκθετικής πολυπλοκότητας.

Σύνοψη

Ο λογισμός καταστάσεων εισήχθει το 1969 από τους McCarthy-Hayes σαν μια λύση του προβλήματος του πλαισίου. Στην ουσία ήταν ένα είδος φορμαλισμού για την περιγραφή των ενεργειών και των αποτελεσμάτων τους, έμμεσων και άμεσων.

Ο λογισμός καταστάσεων είναι μια γλώσσα δεύτερη τάξης για τη δυναμική αναπαράσταση των αλλαγών που συμβαίνουν σε έναν κόσμο. Οι αλλαγές αυτές είναι αποτελέσματα ενεργειών. Στην αρχική κατάσταση του κόσμου δεν έχει συμβεί καμία ενέργεια και όλες οι μεταβλητές έχουν κάποια αρχική τιμή. Μετά από την εκτέλεση μιας σειράς ενεργειών ο κόσμος αλλάζει σε κάποια άλλη κατάσταση στην οποία οι μεταβλητές που τον χαρακτηρίζουν έχουν αλλάξει τιμή ανάλογα με τις ενέργειες που εκτελέστηκαν.

Για να περιγραφεί η εκτέλεση μιας ενέργειας, χρησιμοποιείται η δυαδική συνάρτηση $do(a, s)$ η οποία περιγράφει την εκτέλεση της ενέργειας a όταν ο κόσμος βρίσκεται στην κατάσταση s . Ένα παράδειγμα εκτέλεσης ενέργειας είναι η εκτέλεση της ενέργειας put η οποία παίρνει δύο ορίσματα το x και το y και η εκτέλεση της έχει σαν αποτέλεσμα το αντικείμενο x να τοποθετηθεί πάνω στο αντικείμενο y . Έτσι η λογική πρόταση $do(put(x, y))$ δηλώνει αυτή την τοποθέτηση του x πάνω στο y . Οι συναρτήσεις μπορούν να έχουν και τιμές οι οποίες αλλάζουν με την εκτέλεση ενεργειών στον κόσμο. Στις συναρτήσεις οι οποίες μπορούν να αξιολογηθούν σε κάποια τιμή θα πρέπει να έχουν σαν ένα από τα ορίσματα τους την κατάσταση που βρίσκεται ο κόσμος. Έτσι η συνάρτηση $colour(x, s)$ αξιολογεί το χρώμα του αντικειμένου x όταν ο κόσμος βρίσκεται στην κατάσταση s .

Για να εκτελεστεί κάποια ενέργεια σε κάποια κατάσταση του κόσμου θα πρέπει να

ικανοποιούνται μια σειρά από προϋποθέσεις οι οποίες μοντελοποιούνται από τη συνάρτηση Poss. Έτσι με $\text{Poss}(a, s)$ χαρακτηρίζονται οι προϋποθέσεις που θα πρέπει να ισχύουν στον κόσμο σε κάποια κατάσταση s για να εκτελεστεί η ενέργεια a . Για παράδειγμα, για να είναι δυνατό για ένα ρομπότ r να σηκώσει ένα αντικείμενο x στην κατάσταση του κόσμου s θα πρέπει το ρομπότ να μην κρατάει κάτι άλλο στην κατάσταση s , αντικείμενο x δε θα πρέπει να είναι βαρύ και τέλος το ρομπότ r θα πρέπει να είναι κοντά στο αντικείμενο x . Αυτά όλα μοντελοποιούνται με τη λογική πρόταση $\text{Poss}(\text{pickup}(r, x), s) \rightarrow [(\forall z)\neg\text{holding}(r, x, z)\wedge\neg\text{heavy}(x)\wedge\text{nextTo}(r, x, s)]$. Για να ισχύει η Poss και να μπορεί να εκτελεστεί η ενέργεια pickup θα πρέπει να ισχύουν και όλες οι συνθήκες που υπάρχουν στο δεξιό μέρος.

Μεταξύ των μεταβλητών και των ενεργειών υπάρχουν σχέσεις αιτιότητας οι οποίες υποδεικνύουν τον τρόπο με τον οποίο αλλάζει η τιμή των μεταβλητών μετά από εκτέλεση ενεργειών. Έτσι η εκτέλεση της εντολής repair πάνω σε ένα αντικείμενο x από το ρομπότ r όταν ο κόσμος βρίσκεται στην κατάσταση s , έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή στην τιμή της μεταβλητής broken για το αντικείμενο x από αληθής σε ψευδής. Αυτό μοντελοποιείται από τη λογική πρόταση $\neg\text{broken}(x, \text{do}(\text{repair}(r, x), s))$.

Ανάμεσα στις καταστάσεις ορίζεται ο τελεστής $<$, για τον οποίο ισχύει ότι $s < s'$ συνεπάγεται ότι από την κατάσταση s πήγαμε στην κατάσταση s' με την εκτέλεση μιας η περισσότερων ενεργειών.

Η πιο δημοφιλής λύση για το πρόβλημα του πλαισίου προτάθηκε από τον Reiter το 1991. Το σκεπτικό της παρουσιάζεται στη συνέχεια μέσω ενός παραδείγματος. Υποθέτουμε ότι υπάρχει ένα ρομπότ r το οποίο κρατάει ένα αντικείμενο x . Επίσης, υπάρχει μια συνάρτηση $\text{bomb}(b)$ η οποία είναι αληθής αν το αντικείμενο b είναι βόμβα. Ας υποθέσουμε επίσης ότι ισχύουν τα αξιώματα: $\text{fragile}(x, s) \rightarrow \text{broken}(x, \text{do}(\text{drop}(r, x), s))$ και $\text{nextTo}(b, x, s) \rightarrow \text{broken}(x, \text{explode}(b), s)$. Το πρώτο αξίωμα υποστηρίζει ότι αν το αντικείμενο x δεν είναι σπασμένο και το ρομπότ r το κρατάει και το ρίξει στην κατάσταση s του κόσμου, τότε στην μετέπειτα της κατάστασης s του κόσμου το αντικείμενο θα είναι σπασμένο. Το δεύτερο αξίωμα υποστηρίζει ότι αν το αντικείμενο x είναι δίπλα σε ένα αντικείμενο b και το αντικείμενο b εκραγεί, τότε το αντικείμενο x θα είναι σπασμένο στις καταστάσεις του κόσμου που ακολουθήσουν την s . Ο Reiter πρότεινε αντί να υπάρχουν σε διαφορετικά αξιώματα όλοι οι τρόποι με τους οποίους μπορεί η μεταβλητή σπασμένο να γίνει αληθής, να συμπτυχθούν όλες σε ένα αξίωμα. Με αυτόν τον τρόπο αντί να υπάρχουν AxF αξιώματα τα οποία θα χαρακτηρίζουν τον

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

τρόπο με τον οποίο οι μεταβλητές στο σύνολο F και οι ενέργειες στο σύνολο A μπορούν να αλλάζουν την κατάσταση του κόσμου S , θα υπάρχουν μονάχα τόσα αξιώματα όσες είναι και οι μεταβλητές οι οποίες θέλουμε να αξιολογηθούν, άρα F συνολικά. Αν οι μεταβλητές αυτές μπορούν να πάρουν περισσότερες των μία τιμών τότε χρειάζεται ένα αξίωμα για κάθε τιμή. Στο παραπάνω παράδειγμα, οι δύο προτάσεις μπορούν να συμπτυχθούν στη συνολική πρόταση $\text{Poss}(a, s) \wedge [\exists(r, x)\{a=\text{drop}(r, x)\wedge\text{fragile}(x, s)\}\vee(\exists b)\{a=\text{explode}(b)\wedge\text{nextTo}(b, x, s)\}]\rightarrow\neg\text{broken}(x, \text{do}(a, s))$. Αν στην παραπάνω λύση του προβήματος πλαισίου αναλυθούν και οι λογικές προτάσεις των προϋποθέσεων, τότε ο συνολικός αριθμός αξιωμάτων που απαιτούνται είναι $A + k_i * F_i$ όπου A είναι ο αριθμός των ενεργειών και k_i είναι ο αριθμός των διαφορετικών τιμών που μπορεί να πάρει η μεταβλητή F_i .

Αναφορές

- [1] Stanford University, <http://plato.stanford.edu/entries/frame-problem/>
- [2] McCarthy, J. & Hayes, P.J. , 1967, “Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence”, in Machine Intelligence 4, ed. D.Michie and B.Meltzer, Edinburgh University Press, pp. 463–502.
- [3] McDermott, D. “We've Been Framed: Or Why AI Is Innocent of the Frame Problem”, in Pylyshyn (1987).
- [4] International Society for Complexity, Information, and Design Encyclopedia of Science and Philosophy, http://www.iscid.org/encyclopedia/Frame_Problem
- [5] Shuvendu K. Lahiri and Shaz Qadeer, Call invariants: An approach to the frame problem for procedure calls, Microsoft, 2009.
- [6] Kevin B. Korb. 1998. The Frame Problem: An AI Fairy Tale. Minds Mach. 8, 3 (August 1998), 317-351. DOI=10.1023/A:1008286921835 <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008286921835>
- [7] Murray Shanahan. 1999. The event calculus explained. In Artificial intelligence today, Michael J. Wooldridge and Manuela Veloso (Eds.). Lecture Notes In Computer Science, Vol. 1600. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 409-430.
- [8] Raymond Reiter. 1991. The frame problem in situation the calculus: a simple solution (sometimes) and a completeness result for goal regression. In Artificial intelligence and mathematical theory of computation, Vladimir Lifschitz (Ed.).

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA 359-380.

[9] [http://en.wikipedia.org/wiki/Circumscription_\(logic\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Circumscription_(logic))

[10] Edwin P. D. Pednault: ADL: Exploring the Middle Ground Between STRIPS and the Situation Calculus. [KR 1989](#): 324-332

[11] L.K. Schubert, "[Monotonic solution of the frame problem in the situation calculus: An efficient method for worlds with fully specified actions,](#)" in H. Kyburg, R. Loui and G. Carlson (eds.), *Knowledge Representation and Defeasible Reasoning*, Kluwer, Dordrecht, pp. 23-67, 1990

[12] Nikos Papadakis, [Dimitris Plexousakis](#), [Grigoris Antoniou](#), [Myron Papadakis](#), [Katerina Boutsika](#): A Tool for Addressing the Ramification Problem in Temporal Databases. [International Journal on Artificial Intelligence Tools 18\(4\): 589-601 \(2009\)](#)

Ανδρέας Δεληγιάννης