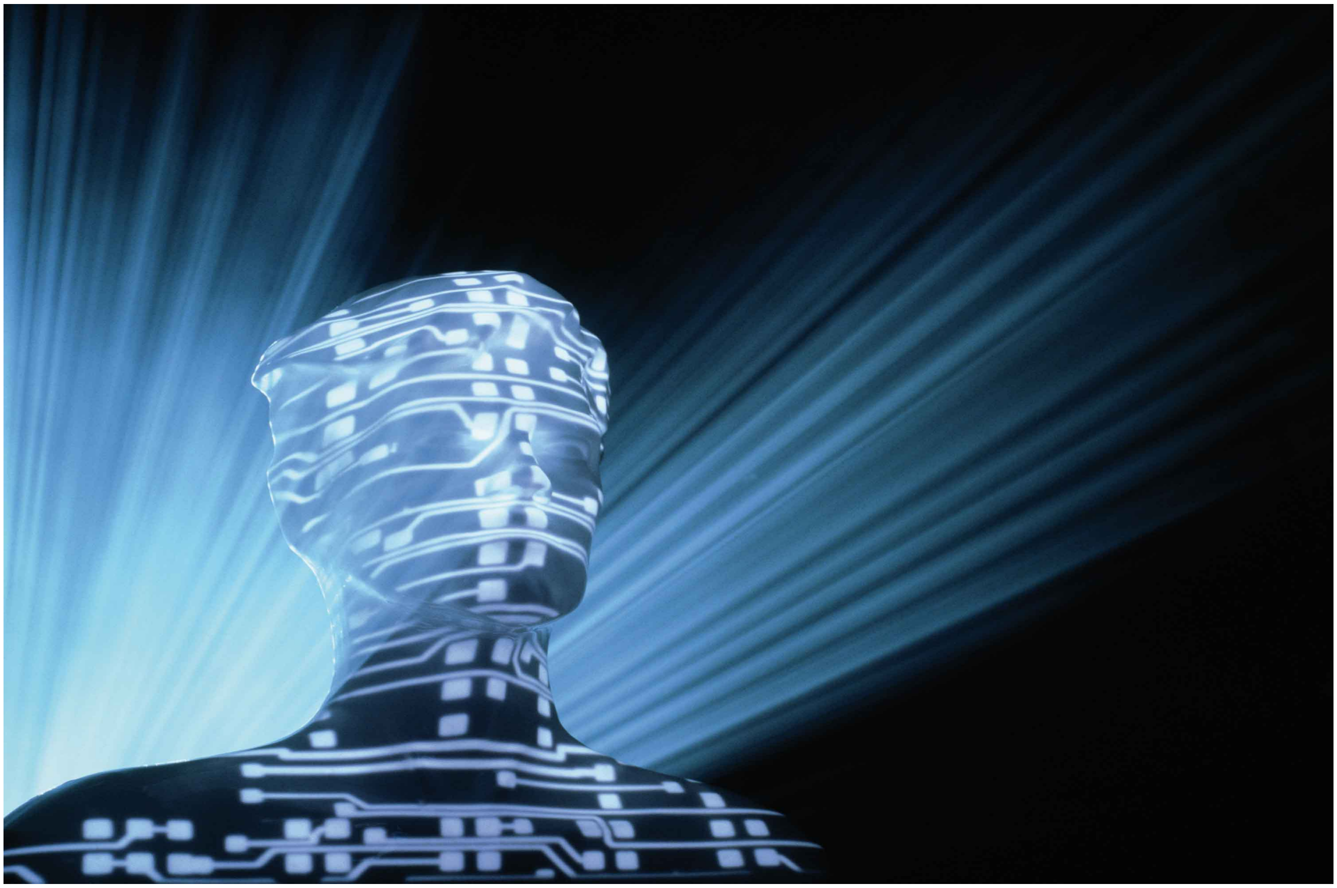
Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική.



Κυριάκος Μανιατέας
Α.Μ. 4047

Επιβλέπων : Νίκος Παπαδάκης

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική.

Κυριάκος Μανιατέας,maniateas_kyriakos@hotmail.com

Επιβλέπων, Νικόλαος Παπαδάκης

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.

Κυριάκος Μανιατέας

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

Περιεχόμενα

Κυριάκος Μανιατέας

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. Ό 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 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.

Κατηγόρημα 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 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(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 κατηγόρημα. 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 κατηγόρημα 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.

- 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.

- 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.

- 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.

- 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 η επόμενη κατάσταση του κόσμου, s'.

- 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.

- 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 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:

- 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 αλλάζει 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, α και στα αρνητικά αξιώματα αποτελεσμάτων για κάποια μεταβλητή R, σε σχέση με μια ενέργεια, α.

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:

$\pi_{\alpha}(x, s)$ AND $\varepsilon_{R+}(x, y, s) \Rightarrow R(y, do(a(x), s))$

Η φόρμουλα $\pi_{\alpha}(x, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στο σύστημα στην κατάσταση s, ώστε να είναι ενεργοποιημένη η εκτέλεση της ενέργειας α. 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 $\varepsilon_{R+}(x, y, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στον κόσμο ώστε μετά την εκτέλεση της ενέργειας α 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(α(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) => 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

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:
  - [(∀z)┐ κρατάει(r, z, s)] /\ ┐ βαρύ(x) /\ δίπλα(r, x, s) /\ r'=r /\ y=x => κρατάει(r', y, 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: ┐ 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: δίπλα(r, 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:

$\pi_\alpha(x, s)$ AND $\varepsilon_{R-}(x, y, s) \Rightarrow \neg R(y, do(a(x), s)$

Η φόρμουλα $\pi_\alpha(x, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στο σύστημα στην κατάσταση s, ώστε να είναι ενεργοποιημένη η εκτέλεση της ενέργειας α. 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 $\varepsilon_{R-}(x, y, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στον κόσμο ώστε μετά την εκτέλεση της ενέργειας α 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, do(α(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 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:
    - έχει_κόλλα(r, s) /\ σπασμένο(x, s) /\ y=x => ┐ σπασμένο(y, do(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 ενέγειας 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 => ┐ κρατάει(y, do(drop(r, x)), s)

- Για να ενεργοποιηθεί η δυνατότητα εκτέλεσης της ενέργειας drop και να αλλάξει την κατάσταση της μεταβλητής κρατάει από αληθής σε ψευδής σε κάποιο αντικείμενο y μέσω της ενέργειας drop 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:

$\pi_\alpha(x, s) \wedge \varphi_{R+}(x, y, s) \wedge R(y, s) \Rightarrow R(y, do(a(x), s)$

Η φόρμουλα $\pi_\alpha(x, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στο σύστημα στην κατάσταση s, ώστε να είναι ενεργοποιημένη η εκτέλεση της ενέργειας α. 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 αληθής. 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, αληθής. Η αλλαγή αυτή αλλάζει το στιγμιότυπο του κόσμου από s σε s' το οποίο αποτυπώνεται ως το αποτέλεσμα της συνάρτησης R(y, do(α(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.
    - κρατάει(r, x, s) /\ χρώμα(y, c, s) => χρώμα(y, c, 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 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 προυπόθεση 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:

$$\pi_\alpha(x, s) \wedge \varphi_{R-}(x, y, s) \wedge \neg R(y, s) \Rightarrow \neg R(y, do(a(x), s)$$

Η φόρμουλα $\pi_\alpha(x, s)$ δείχνει τις προϋποθέσεις που θα πρέπει να τηρούνται στο σύστημα στην κατάσταση s, ώστε να είναι ενεργοποιημένη η εκτέλεση της ενέργειας α. 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 φ_{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 φ_{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(α(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 ρίξιμο 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:
  - κρατάει(r, x, s) ∧ ┐σπασμένο(y, s) ∧ [(y != x) ∨ ┐εύθραυστο(y)] => ┐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 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 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

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 η 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 != x) ∨ ┑ 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 ┑ σπασμένο(y, s).

7. Η πρόταση του Pednault για τα Αξιώματα Πλαισίου

Ο αριθμός των αξιωμάτων πλαισίου είναι υπερβολικά μεγάλος. Στη χειρότερη περίπτωση είναι 2 * A * F όπου

- A είναι ο αριθμός των ενεργειών που είναι δυνατόν να συμβούν στον κόσμο και
- F είναι ο αριθμός των μεταβλητών που χαρακτηρίζουν τον κόσμο.

Το 2 στην παραπάνω σχέση προκύπτει από το γεγονός ότι υπάρχει για κάθε ζευγάρι ενέργειας και μεταβλητής ένα αξίωμα που κρατάει τη μεταβλητή στην τιμή αληθής μετά την εκτέλεση της εντολής κι ένα αξίωμα το οποίο περιγράφει το μηχανισμό με τον οποίο είναι δυνατόν να κρατηθεί μια μεταβλητή στην τιμή ψευδής μετά την εκτέλεση μιας εντολής. Επίσης, η διαδικασία να εξάγονται κάθε φορά όλα αυτά τα αξιώματα είναι πολύπλοκη.

Ο Pednault[] παρουσίασε έναν τρόπο με τον οποίο είναι δυνατόν να εξαχθούν όλα τα αξιώματα πλαισίου μέσω των αξιωμάτων αποτελέσματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα αποδοτικό μιας και σε ένα τυπικό κόσμο, τα αποτελέσματα από την εκτέλεση μιας ενέργειας είναι πολύ λίγα λόγω της συνηθισμένης τοπικότητας των αποτελεσμάτων. Ο αριθμός των αξιωμάτων πλαισίου θα παραμείνει στην παραπάνω πολυπλοκότητα αλλά πλέον δε θα χρειάζεται κάποιος να σκέφτεται ένα προς ένα όλες τις σχέσεις των ενεργειών με τις μεταβλητές του κόσμου αφού θα υπάρχει ένας απλός και αυτόματος τρόπος για την εξαγωγή των αξιωμάτων.

Εξαγωγή των θετικών αξιωμάτων πλαισίου από τα αρνητικά αξιώματα αποτελέσματος

Ένα αρνητικό αξίωμα αποτελέσματος έχει τη μορφή:

$$\pi_{\alpha}(x, s) \wedge \varepsilon_{R-}(x, y, s) \Rightarrow \neg R(y, do(a(x), s)$$

Αυτό σημαίνει ότι ο μοναδικός τρόπος με τον οποίο μια μεταβλητή R μπορεί να πάει στην τιμή ψευδής από την τιμή αληθής είναι να ισχύουν οι προϋποθέσεις για την εντολή a και να ικανοποιούνται και οι προϋποθέσεις που περιγράφονται στη σχέση $\varepsilon_{R-}(x, y, s)$. Σύμφωνα με την προϋπόθεση ολοκλήρωσης που υποθέτει ο Pednault δε θα πρέπει να είναι δυνατόν για τη μεταβλητή R να μεταβεί από την κατάσταση ψευδής στην κατάσταση αληθής μετά την εκτέλεση της ενέργειας a αν δεν είναι υπάρχει η αντίστοιχη σχέση στη λογική πρόταση $\varepsilon_{R-}(x, y, s)$.

Η παραπάνω υπόθεση πληρότητας οδηγεί στην παρακάτω διατύπωση του θετικού αξιώματος αποτελέσματος:

$$\pi_{\alpha}(x, s) \wedge \neg R(y, do(a(x), s) \wedge R(y, s) \Rightarrow \varepsilon_{R-}(x, y, s)$$

στην οποία αποτυπώνεται το γεγονός ότι ο μόνος δυνατός τρόπος για να μεταβληθεί η τιμή της μεταβλητής R από αληθής σε ψευδής, αφότου έχει εκτελεστεί η ενέργεια a, είναι να ικανοποιείται η λογική πρόταση που είναι περιγεγραμμένη στο $\varepsilon_{R-}(x, y, s)$. Με περαιτέρω επεξεργασία της παραπάνω λογικής πρότασης καταλήγουμε στο:

$$\pi_\alpha(x, s) \wedge \neg\, \varepsilon_{R-}(x, y, s) \wedge R(y, s) \Rightarrow R(y, do(a(x), s)$$

στην οποία αποτυπώνεται ότι αν μια μεταβλητή R έχει την τιμή αληθής και συμβεί μια ενέργεια της οποίας οι προϋποθέσεις περιγράφονται στο $\pi_\alpha(x, s)$, τότε ο μόνος τρόπος για να παραμείνει η μεταβλητή αυτή στην τιμή αληθής είναι να μην ισχύει η συνθήκη η οποία θα την οδηγούσε στην αλλαγή της τιμής της μεταβλητής από αληθής σε ψευδής σύμφωνα με το αντίστοιχο αρνητικό αξίωμα αποτελέσματος. Αν συσχετιστεί το αποτέλεσμα αυτό με το θετικό αξίωμα πλαισίου όπως αυτό παρουσιάστηκε προηγουμένως, φαίνεται εύκολα ότι :

$$\neg\, \varepsilon_{R-}(x, y, s) = \varphi_{R+}(x, y, s)$$

Έτσι με αυτόν το μηχανισμό είναι δυνατόν να εξαχθούν αυτόματα τα θετικά αξιώματα πλαισίου από τα αρνητικά αξιώματα αποτελέσματος.

Σαν παράδειγμα της παραπάνω διαδικασίας ας θεωρηθεί το αξίωμα αποτελέσματος που περιγράφει την αλλαγή της τιμής της μεταβλητής σπασμένο από αληθής σε ψευδής μέσω της ενέργειας repair:

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

Σύμφωνα με αυτή τη λογική πρόταση, ο μόνος τρόπος για να μεταβληθεί η τιμή της μεταβλητής σπασμένο από αληθής σε ψευδής μετά την εκτέλεση της ενέργειας repair είναι το αντικείμενο που επισκεύασε το ρομπότ να είναι το ίδιο με το αντικείμενο για το οποίο η μεταβλητή σπασμένο αξιολογείται με την τιμή ψευδής στην κατάσταση που μεταβαίνει ο κόσμος μετά την εκτέλεση της ενέργειας repair. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η ίδια η ενέργεια repair για να ενεργοποιηθεί θα πρέπει να ισχύουν κάποιες προϋποθέσεις. Αυτές είναι το ρομπότ, r, να έχει στην κατοχή του κόλλα όταν ο κόσμος βρίσκεται στην κατάσταση s και το αντικείμενο το οποίο πρόκειται να επισκευαστεί από το ρομπότ να είναι σπασμένο στην ίδια κατάσταση.

Με την τροποποίηση της παραπάνω πρότασης μέσω της μεθόδου του Pednault εξάγεται η πρόταση:

έχει_κόλλα(r, s) /\ σπασμένο(x, s) /\ σπασμένο(y, s) /\ ┑[y=x] => σπασμένο(y, do(repair(r, x))

Η πρόταση αυτή δείχνει ότι η τιμή της μεταβλητής σπασμένο θα παραμείνει στην τιμή αληθής όταν έχει σαν όρισμα το αντικείμενο y αν μετά την επισκευή του αντικειμένου x το οποίο και κρατάει το ρομπότ στην κατάσταση s δεν ισχύουν οι προϋποθέσεις:

- το αντικείμενο x είναι ίδιο με το αντικειμένου y

Έτσι αν το αντικείμενο x είναι διαφορετικό από το αντικείμενο y, το ρομπότ θα επισκευάσει ένα αντικείμενο x το οποίο είναι σπασμένο στην κατάσταση s αλλά το αντικείμενο y το οποίο στην κατάσταση s ήταν επίσης σπασμένο στην κατάσταση s θα παραμείνει σπασμένο μιας και το αντικείμενο που διορθώθηκε (x) ήταν διαφορετικό από αυτό.

Εξαγωγή των αρνητικών αξιωμάτων πλαισίου από τα θετικά αξιώματα αποτελέσματος

Ένα θετικό αξίωμα αποτελέσματος έχει τη μορφή:

$\pi_{\alpha}(x, s) \wedge \varepsilon_{R+}(x, y, s) \Rightarrow R(y, do(a(x), s)$

Αυτό σημαίνει ότι ο μοναδικός τρόπος με τον οποίο μια μεταβλητή R μπορεί να πάει στην τιμή αληθής από την τιμή ψευδής είναι να ισχύουν οι προϋποθέσεις για την εντολή a και να ικανοποιούνται και οι προϋποθέσεις που περιγράφονται στη σχέση $\varepsilon_{R+}(x, y, s)$. Σύμφωνα με την προϋπόθεση ολοκλήρωσης που υποθέτει ο Pednault δε θα πρέπει να είναι δυνατόν για τη μεταβλητή R να μεταβεί από την κατάσταση ψευδής στην κατάσταση αληθής μετά την εκτέλεση της ενέργειας a αν δεν υπάρχει η αντίστοιχη σχέση στη λογική πρόταση $\varepsilon_{R+}(x, y, s)$.

Η παραπάνω υπόθεση πληρότητας οδηγεί στην παρακάτω διατύπωση του θετικού αξιώματος αποτελέσματος:

$\pi_{\alpha}(x, s) \wedge R(y, do(a(x), s) \wedge \neg R(y, s) \Rightarrow \varepsilon_{R+}(x, y, s)$

στην οποία αποτυπώνεται το γεγονός ότι ο μόνος δυνατός τρόπος για να μεταβληθεί η τιμή της μεταβλητής R από ψευδής σε αληθής, αφότου έχει εκτελεστεί η ενέργεια a, είναι να ικανοποιείται η λογική πρόταση που είναι περιγεγραμμένη στο $\varepsilon_{R+}(x, y, s)$. Με περαιτέρω επεξεργασία της παραπάνω λογικής πρότασης καταλήγουμε στο:

$\pi_{\alpha}(x, s) \wedge \neg \varepsilon_{R+}(x, y, s) \wedge \neg R(y, s) \Rightarrow \neg R(y, do(a(x), s)$

στην οποία αποτυπώνεται ότι αν μια μεταβλητή R έχει την τιμή ψευδής και συμβεί μια ενέργεια της οποίας οι προϋποθέσεις περιγράφονται στο $\pi_\alpha(x, s)$, τότε ο μόνος τρόπος για να παραμείνει η μεταβλητή αυτή στην τιμή ψευδής είναι να μην ισχύει η συνθήκη η οποία θα την οδηγούσε στην αλλαγή της τιμής της μεταβλητής από ψευδής σε αληθής σύμφωνα με το αντίστοιχο θετικό αξίωμα αποτελέσματος. Αν συσχετιστεί το αποτέλεσμα αυτό με το αρνητικό αξίωμα πλαισίου όπως αυτό παρουσιάστηκε προηγουμένως, φαίνεται εύκολα ότι :

$$\neg\, \varepsilon_{R+}(x, y, s) = \varphi_{R-}(x, y, s)$$

Έτσι με αυτόν το μηχανισμό είναι δυνατόν να εξαχθούν αυτόματα τα αρνητικά αξιώματα πλαισίου από τα θετικά αξιώματα αποτελέσματος.

Σαν παράδειγμα της παραπάνω διαδικασίας ας θεωρηθεί το αξίωμα αποτελέσματος που περιγράφει την αλλαγή της τιμής της μεταβλητής σπασμένο από ψευδής σε αληθής μέσω της ενέργειας drop:

κρατάει(r, x, s) /\ y=x /\ εύθραυστο(y) => σπασμένο(y, do(drop(r, x), s))

Σύμφωνα με αυτή τη λογική πρόταση, ο μόνος τρόπος για να μεταβληθεί η τιμή της μεταβλητής σπασμένο από ψευδής σε αληθής μετά την εκτέλεση της ενέργειας drop είναι το αντικείμενο x που κρατάει και που πρόκειται να ρίξει το ρομπότ να είναι ίδιο με το αντικείμενο y το οποίο είναι εύθραυστο. Με την τροποποίηση της παραπάνω πρότασης μέσω της μεθόδου του Pednault εξάγεται η πρόταση:

κρατάει(r, x, s) /\ ┐σπασμένο(y, s) /\ ┐[y=x /\ εύθραυστο(y)] => ┐σπασμένο(y, do(drop(r, x), s))

Η πρόταση αυτή δείχνει ότι η τιμή της μεταβλητής σπασμένο θα παραμείνει στην τιμή ψευδής όταν έχει σαν όρισμα το αντικείμενο y αν μετά το ρίξιμο του αντικειμένου x το οποίο και κρατάει το ρομπότ στην κατάσταση s δεν ισχύουν οι προϋποθέσεις:

- το αντικείμενο x είναι ίδιο με το αντικειμένου y
- το αντικείμενο x είναι εύθραυστο

Η μέθοδος του Pednault και τα κενά αξιώματα αποτελεσμάτων

Για να εξαχθούν τα αξιώματα πλαισίου μέσω της μεθόδου που πρότεινε ο Pednault θα πρέπει να μελετηθούν όλες οι σχέσεις ενεργειών μεταβλητών. Αυτό έχει σαν συνέπεια να χρειαστεί να εξαχθούν αξιώματα πλαισίου από κενά αξιώματα αποτελεσμάτων.

Ως κενά ορίζονται τα αξιώματα αποτελέσματος τα οποία με κανένα τρόπο δε μπορούν να αλλάξουν την τιμή μιας μεταβλητής προς τη θετική ή την αρνητική αξιολόγηση μετά την εκτέλεση μιας ενέργειας η οποία μπορεί να αλλάξει και την κατάσταση του κόσμου. Σαν αποτέλεσμα αυτού του τύπου τα αξιώματα είναι του τύπου:

1. π_α(x, s) /\ false => ┐R(y, do(a(x), s), για τα αρνητικά αξιώματα αποτελέσματος

και

2. $\pi_\alpha(x, s) \wedge false \Rightarrow R(y, do(a(x), s)$, για τα θετικά αξιώματα αποτελέσματος

Για παράδειγμα, για να εξαχθεί το αξίωμα πλαισίου για τη μεταβλητή χρώμα ως προς την ενέργεια drop θα πρέπει να αναλυθούν και οι δύο κατευθύνσεις των αξιωμάτων αποτελέσματος της ίδιας μεταβλητής ως προς την ίδια ενέργεια.

Για να εκτελεστεί η εντολή drop θα πρέπει αρχικά να υπολογιστούν οι προϋποθέσεις εκτέλεσης της. Η μόνη τέτοια προυπόθεση είναι να κρατάει το ρομπότ ένα αντικείμενο, x, ενόσω βρίσκεται στην κατάσταση s. Από τη στιγμή που το ρομπότ ρίχνει ένα αντικείμενο x στην κατάσταση s, δεν υπάρχει κανένας τρόπος με τον οποίο μετά την εκτέλεση της ενέργειας και της αλλαγής της κατάστασης να έχει αλλάξει το χρώμα σε ένα αντικείμενο y. Αυτό αναπαριστάται στη λογική πρόταση ως εξής:

- κρατάει(r, x, s) /\ false => χρώμα(y, c, do(drop(r, x), s)

Η πρόταση false δείχνει ότι δεν υπάρχει τίποτα που να μπορεί να οδηγήσει τη μεταβλητή χρώμα να αξιολογηθεί στην τιμή true μετά την αλλαγή της κατάστασης του κόσμου. Άρα το πρώτο μέλος είναι πάντα ψευδές και φαίνεται ότι η πρόταση είναι κενή. Όμως, αυτός είναι ο μόνος τρόπος με τον οποίο μπορούμε να εξάγουμε τα αναγκαία για την ανάλυση των στιγμιοτύπων του κόσμου αξιώματα πλαισίου:

- κρατάει(r, x, s) /\ ¬ χρώμα(y, c, s) => ¬ χρώμα(y, c, do(drop(r, x), s)

Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο εξάγονται και τα αξιώματα πλαισίου τα οποία περιγράφουν τους μηχανισμούς με τους οποίους οι μεταβλητές μπορούν να παραμείνουν στην αληθή τιμή τους. Έτσι, για παράδειγμα για να περιγράψουμε ότι ένα αντικείμενο, y, πριν το ρίξιμο ενός αντικειμένου x από το ρομπότ, r, είχε τιμή διαφορετική του c και η τιμή αυτή πρέπει να παραμείνει και μετά το ρίξιμο θα πρέπει να ξεκινήσουμε από την κενή λογική πρόταση που περιγράφει το αξίωμα αρνητικού αποτελέσματος της μεταβλητής χρώμα ως προς την ενέργεια drop:

- κρατάει(r, x, s) /\ false => ┐ χρώμα(y, c, do(drop(r, x), s)

Στην πρόταση αυτή φαίνεται ότι αν ένα αντικείμενο y έχει αξιολογηθεί στην κατάσταση s έχοντας ως χρώμα την τιμή c δεν υπάρχει κάποιος τρόπος με τον οποίο η μεταβλητή χρώμα να αξιολογηθεί στην κατάσταση που ακολουθεί του ριξίματος του αντικειμένου με διαφορετική τιμή, οτιδήποτε κι αν ισχύει στον κόσμο. Όμως, όπως και προηγουμένως είναι απαραίτητες αυτές οι κενές λογικές προτάσεις γιατί μόνο έτσι θα εξαχθούν αυτόματα τα θετικά και αρνητικά αξιώματα πλαισίου όπως και αυτό που μελετάται:

- κρατάει(r, x, s) /\ χρώμα(y, c, s) => χρώμα(y, c, do(drop(r, x), s)

Προβλήματα με τη μέθοδο του Pednault

Συνοψίζοντας, θα πρέπει να τονιστεί ότι η μέθοδος του Pednault ναι μεν παράγει αυτόματα όλα τα αξιώματα πλαισίου αλλά έχει και κάποια μειονεκτήματα που περιορίζουν σημαντικά την πρακτική της εφαρμογή:

1. Για να εξαχθούν όλα τα αξιώματα πλαισίου θα πρέπει να καταμετρηθούν όλες οι σχέσεις μεταξύ των ενεργειών και των αντικειμένων, ασχέτως με το αν υπάρχει πιθανότητα να επηρεάσουν με οποιοδήποτε τρόπο την αξιολόγηση της

μεταβλητής. Έτσι, θα χρειαστεί να καταμετρηθούν A x F αξιώματα αποτελέσματος, όπου το A είναι ο αριθμός των ενεργειών του κόσμου και F είναι ο αριθμός των μεταβλητών που υπάρχουν στον κόσμο. Στον παραπάνω αριθμό είναι φυσιολογικό η πλειονότητα των σχέσεων να αποτελείται από κενές λογικές προτάσεις οι οποίες πρέπει να καταμετρηθούν για να αναπαραχθούν όλα τα αξιώματα πλαισίου. Επίσης, αφού θα πρέπει να ελέγχεται τόσο η μετάβαση μιας κατάστασης από την τιμή αληθής στην τιμή ψευδής, αλλά και από την τιμή ψευδής στην τιμή αληθής, ο αριθμός των σχέσεων που θα πρέπει να καταμετρηθούν διπλασιάζεται φτάνοντας τις 2 x A x F.

2. Στη μέθοδο του Pednault έχει υποτεθεί ότι ισχύει το θεώρημα της πληρότητας, σύμφωνα με το οποίο τα αποτελέσματα από την εκτέλεση μιας ενέργειας πάνω σε μια μεταβλητή είναι πλήρως περιγεγραμμένα και δε μπορούν να δημιουργήσουν διφορούμενα σενάρια ως προς την τιμή της μεταβλητής. Σαν παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ότι υπάρχει σε έναν ιδεατό κόσμο ένα όπλο το οποίο μπορεί να είναι γεμισμένο αλλά μπορεί και να μην είναι. Έτσι, η μεταβλητή γεμισμένο δεν είναι σίγουρο ότι είναι στην τιμή αληθής αλλά ούτε και στην τιμή ψευδής σε κάποιο στιγμιότυπο του κόσμου. Επίσης δεν είναι σίγουρο για το πόσες σφαίρες υπάρχουν στο όπλο. Αν στο ίδιο στιγμιότυπο εκτελεστεί η ενέργεια τράβηγμα-σκανδάλης υπάρχουν δύο πιθανά σενάρια ανάλογα με την αρχική τιμή της μεταβλητής γεμισμένο:

    - αν η μεταβλητή γεμισμένο είναι στην τιμή αληθής το αποτέλεσμα της ενέργειας τράβηγμα-σκανδάλης είναι ο πυροβολισμός του όπλου με ότι αυτό μπορεί να συνεπάγεται για τον κόσμο που μελετάται. Επίσης, αν το όπλο έχει περισσότερες από μία σφαίρες, τότε η μεταβλητή γεμισμένο θα παραμείνει στην τιμή αληθής. Έτσι το αρνητικό αξίωμα αποτελέσματος σε αυτή την περίπτωση θα είναι ως εξής:

- false => ┐γεμισμένο(do(pulltrigger, s))

Το θετικό αξίωμα πλαισίου που προκύπτει από την παραπάνω λογική πρόταση είναι ως εξής:

- γεμισμένο(s) => γεμισμένο(do(pulltrigger, s))

Αυτή η λογική πρόταση δείχνει ότι η ενέργεια pulltrigger δεν έχει καμία προϋπόθεση για να εκτελεστεί κι επίσης η τιμή της μεταβλητής γεμισμένο θα παραμείνει στην τιμή αληθής ανεξαρτήτως άλλων προϋποθέσεων. Για να συγκεκριμενοποιηθεί η παραπάνω λογική πρόταση θα πρέπει να ισχύουν μερικές ακόμα βοηθητικές υποθέσεις. Αυτές είναι ότι το όπλο περιέχει περισσότερες από μία σφαίρες και ότι είναι γεμισμένο γενικά με οποιοδήποτε αριθμό από σφαίρες. Έτσι το θετικό αξίωμα αποτελέσματος θα πρέπει να αλλαχθεί σε:

- containsbullets(n, s) /\ n>=2 => γεμισμένο(do(pulltrigger, s))

Έτσι τώρα είναι πιο ξεκάθαρος ο μηχανισμός με τον οποίο η μεταβλητή γεμισμένο θα παραμείνει στην τιμή γεμισμένο περιγράφοντας έτσι το θετικό αξίωμα πλαισίου με την παρακάτω λογική πρόταση:

- ┐γεμισμένο(s) /\ ┐[containsbullets(n, s) /\ n>=2] => ┐γεμισμένο(do(pulltrigger, s))

- αν η μεταβλητή γεμισμένο είναι στην τιμή ψευδής το αποτέλεσμα της ενέργειας τράβηγμα-σκανδάλης είναι να μην αλλάξει κατάσταση κάποια από τις μεταβλητές που χαρακτηρίζουν τον κόσμο κι έτσι και η ίδια η μεταβλητή γεμισμένο θα πρέπει ανεξάρτητα των υπολοίπων τιμών των μεταβλητών του κόσμου να παραμένει στην τιμή ψευδής:

- false => γεμισμένο(do(pulltrigger, s))

Το αρνητικό αξίωμα πλαισίου που μπορεί να εξαχθεί από την παραπάνω σχέση θα είναι ως εξής:

- ┐γεμισμένο(s) => ┐γεμισμένο(do(pulltrigger, s))

Αυτό βέβαια δεν ισχύει πάντα μιας και δεν έχει γίνει καμία αναφορά στην περίπτωση που στο όπλο υπάρχει ακριβώς μια σφαίρα οπότε μετά τον τράβηγμα της σκανδάλης η μεταβλητή γεμισμένο αλλάζει τιμή και από αληθής γίνεται ψευδής. Μετά και την τελευταία προσθήκη, το αρνητικό αξίωμα αποτελέσματος θα πρέπει να αλλάξει και να γίνει:

- containsbullets(n, s) /\ n>=1 => ┐γεμισμένο(do(pulltrigger, s))

Έτσι το αξίωμα αποτελέσματος σε αυτή την περίπτωση θα αλλάξει λαμβάνοντας υπόψιν και την τελευταία συγκεκριμενοποίηση του αξιώματος αποτελέσματος και θα γίνει:

- γεμισμένο(s) /\ ┐ [containsbullets(n, s) /\ n>=1] => γεμισμένο(do(pulltrigger, s))

Συνολικά, για να είναι δυνατόν να βασιστεί μια μέθοδος στο θεώρημα της πληρότητας θα πρέπει για όλες τις ενέργειες να είναι ξεκάθαρο και ντετερμινιστικό το αποτέλεσμα που μπορεί να έχουν στις διάφορες μεταβλητές του περιβάλλοντος. Διαφορετικά η μέθοδος που μόλις περιγράφηκε θα έχει περιορισμένη εφαρμογή.

Η πρόταση του Schubert για τα Αξιώματα Πλαισίου

Σε πολλές περιπτώσεις ο άνθρωπος εμπειρικά μπορεί να καταλάβει τι ακριβώς μπορεί να προκάλεσε την αλλαγή σε ένα σύνολο μεταβλητών του κόσμου που ζει, μονάχα μελετώντας την αρχική και την τελική τιμή των μεταβλητών που συνθέτουν τις διαφορετικές καταστάσεις του κόσμου. Για παράδειγμα, αν σε κάποιο στιγμιότυπο του κόσμου υπάρχει ένα φυτό το οποίο είναι υγιές και σε κάποιο επόμενο στιγμιότυπο του κόσμου το ίδιο φυτό έχει μαραθεί, ο άνθρωπος μπορεί να συμπεράνει ότι είτε το φυτό έμεινε απότιστο είτε το χτύπησε κάποια αρρώστια η οποία έχει σαν συνέπεια το μαρασμό του.

Ξεκινώντας από αυτή την παρατήρηση ο Schubert, εισήγαγε τη θεωρία της κάλυψης εξήγησης για να λύσει πιο αποδοτικά το πρόβλημα του πλαισίου. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, για κάθε αλλαγή τιμής μιας μεταβλητής μπορεί να δοθεί σαν εξήγηση, η εκτέλεση κάποιας εντολής από ένα σύνολο εντολών που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την τιμή της προηγούμενης.

Σαν παράδειγμα, ας θεωρηθεί ο ίδιος κόσμος με πριν και ας επικεντρωθούμε στη μεταβλητή 'κρατάει'. Ας θεωρήσουμε ότι στο στιγμιότυπο του κόσμου που αναπαριστάται από την κατάσταση s, η μεταβλητή 'κρατάει' έχει την τιμή αληθής και ότι στην επόμενη κατάσταση η τιμή της ίδιας μεταβλητής έχει πάρει την τιμή ψευδής. Αν εμπειρικά οι μόνοι τρόποι με τους οποίους η μεταβλητή 'κρατάει' μπορεί να αλλάξει τιμή και από αληθής να γίνει ψευδής είναι οι:

- Εκτέλεση της εντολής putdown(r, x) όπου το αντικείμενο x είναι ακριβώς το ίδιο με το οποίο η μεταβλητή κρατάει αρχικά αξιολογήθηκε στην τιμή αληθής κι έπειτα στην τιμή ψευδής,
- εκτέλεση της εντολής drop(r, x) όπου το αντικείμενο x είναι ακριβώς το ίδιο με το οποίο η μεταβλητή κρατάει αρχικά αξιολογήθηκε στην τιμή αληθής κι έπειτα στην τιμή ψευδής,

τότε μπορεί να εξαχθεί η παρακάτω λογική πρόταση που περιέχει και όλη την ουσία της θεωρίας του Schubert:

κρατάει(r, x, s) $\wedge \neg$ κρατάει(r, x, do(a, s)) => a = putdown(r, x) $\vee$ a = drop(r, x)

Σύμφωνα με την πρόταση αυτή αν στην κατάσταση s το ρομπότ r κρατάει ένα αντικείμενο x και μετέπειτα στην κατάσταση η οποία ακολουθεί της s αν εκτελεστεί μονάχα η ενέργεια a η μεταβλητή αξιολογείται στην τιμή ψευδής τότε μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι είτε το ρομπότ εκτέλεσε την ενέργεια putdown με το αντικείμενο x είτε το ρομπότ εκτέλεσε την εντολή drop με το ίδιο αντικείμενο.

Αξιώματα Πλαισίου μέσω της Κάλυψης Εξήγησης

Μέσω της κάλυψης εξήγησης μπορούν να εξαχθούν πολύ λιγότερα αξιώματα πλαισίου κι έτσι να φτάσουμε σε έναν πολύ αποδοτικό τρόπο για την αναπαράσταση των μεταβλητών που δεν αλλάζουν τιμή έπειτα από την εκτέλεση κάποιας εντολής.

Αν ξεκινήσουμε από τη λογική πρόταση για το σενάριο που περιγράφηκε στο προηγούμενο μέρος της εργασίας, μπορούμε να δημιουργήσουμε την εξής λογική συνεπαγωγή:

$$\text{κρατάει}(r, x, s) \wedge \neg\, \text{κρατάει}(r, x, do(a, s)) \Rightarrow a = putdown(r, x) \vee a = drop(r, x)$$

οπότε,

$$\text{κρατάει}(r, x, s) \wedge \neg\, (a = putdown(r, x) \vee a = drop(r, x)) \Rightarrow \text{κρατάει}(r, x, do(a, s))$$

οπότε,

$$\text{κρατάει}(r, x, s) \wedge \alpha \neq putdown(r, x) \wedge a \neq drop(r, x)) \Rightarrow \text{κρατάει}(r, x, do(a, s))$$

Αν στην τελευταία πρόταση αντικαταστήσουμε τη λογική συνθήκη $\alpha \neq putdown(r, x) \wedge a \neq drop(r, x)$ με τη πρόταση $\varphi\text{κρατάει}+(x, y, s)$ τότε καταλήγουμε στη γνωστή λογική πρόταση:

$$\text{κρατάει}(r, x, s) \wedge \varphi\text{κρατάει}+(x, y, s) \Rightarrow \text{κρατάει}(r, x, do(a, s))$$

η οποία αποτελεί και την αναπαράσταση των θετικών αξιωμάτων πλαισίου, όπως αυτά παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η περαιτέρω ανάλυση της λογικής αυτής πρότασης αποκαλύπτει ότι όλες οι ενέργειες πέρα των drop και putdown αφήνουν την τιμή της μεταβλητής 'κρατάει' ανεπηρέαστη.

Η βελτιστοποίηση σε σχέση με τις προηγούμενες προσεγγίσεις είναι ότι για να αναπαραστήσουμε τα αξιώματα πλαισίου αρκεί να έχουμε μια λογική πρόταση ανά μεταβλητή και ανά τιμή της μεταβλητής στην οποία θα φαίνονται ξεκάθαρα όλοι οι τρόποι με τους οποίους αυτή η μεταβλητή μπορεί να αλλάξει τιμή. Κάθε ένας τέτοιος τρόπος αποτελεί στην ουσία και μία ενέργεια που μπορεί να επηρεάσει τη μεταβλητή.

Συνολικά ο αριθμός των αξιωμάτων πλαισίου είχε υπολογιστεί με τη μέθοδο του Pednault σε 2 * A * F. Αυτό συνέβαινε διότι πρέπει να υπάρχει μια λογική πρόταση για κάθε ζευγάρι ενέργειας-μεταβλητής η οποία να δείχνει τις συνθήκες κάτω από τις οποίες η μεταβλητή αυτή όταν εκτελεστεί η ενέργεια θα κρατήσει την τιμή της.

Με τη μέθοδο του Schubert, για να αναπαρασταθούν τα αξιώματα πλαισίου απαιτείται μονάχα να υπάρχει μια λογική πρόταση ανά μεταβλητή κι έτσι ο αριθμός των αξιωμάτων πλαισίου μειώνεται κατά τον παράγοντα A σε 2 * F.

Θετικά Αξιώματα Πλαισίου μέσω της κάλυψης εξήγησης

Γενικά ένα θετικό θεώρημα πλαισίου το οποίο προκύπτει από το θεώρημα της κάλυψης εξήγησης έχει τη μορφή:

$$R(x, s) \land \neg R(x, do(a, s)) \Rightarrow a_R(x, a, s)$$

το οποίο αναλύεται στη λογική πρόταση:

$$R(x, s) \land \neg a_R(x, a, s) \Rightarrow R(x, do(a, s))$$

Στο παραπάνω αποτέλεσμα το οποίο αντιστοιχεί στη γνωστή λογική πρόταση που αναπαριστά το θετικό αξίωμα πλαισίου:

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

$$R(y, s) \wedge \pi_{\alpha}(x, s) \wedge \varphi_{R+}(x, y, s) \Rightarrow R(y, do(a(x), s)$$

αντικαθιστούμε τις προϋποθέσεις εκτέλεσης της ενέργειας a και τις προϋποθέσεις μετά την εκτέλεση της ενέργειας να βρίσκονται μεταβλητές του περιβάλλοντος σε συγκεκριμένες τιμές, με την πρόταση $\neg a_R(x, a, s)$ η οποία υποθέτει ότι ο μόνος τρόπος η μεταβλητή R να παραμείνει στην προηγούμενη της τιμή, είναι καμία από τις ενέργειες οι οποίες προκαλούν την αλλαγή της να μη συμβούν. Στην τελευταία περίπτωση δε μας ενδιαφέρει τι ακριβώς χρειάζεται να ισχύει για να εκτελεστεί η κάθε μία από τις πιθανές ενέργειες. Αρκεί να καταλάβουμε ότι συνέβη κάποια ενέργεια πάνω στο αντικείμενο x η οποία ξέρουμε ότι θα μπορούσε να το επηρεάσει όσον αφορά τη μεταβλητή x κι αφού επηρεάστηκε συμπεραίνουμε ότι πράγματι εκτελέστηκε.

Αρνητικά Αξιώματα Πλαισίου μέσω της κάλυψης εξήγησης

Γενικά ένα αρνητικό θεώρημα πλαισίου το οποίο προκύπτει από το θεώρημα της κάλυψης εξήγησης έχει τη μορφή:

$$\neg R(x, s) \wedge R(x, do(a, s)) \Rightarrow a_R(x, a, s)$$

το οποίο αναλύεται στη λογική πρόταση:

$$\neg R(x, s) \wedge \neg \beta_R(x, a, s) \Rightarrow \neg R(x, do(a, s))$$

Κυριάκος Μανιατέας

Στο παραπάνω αποτέλεσμα το οποίο αντιστοιχεί στη γνωστή λογική πρόταση που αναπαριστά το αρνητικό αξίωμα πλαισίου:

$\neg R(y, s) \wedge \pi_{\alpha}(x, s) \wedge \varphi_{R-}(x, y, s) \Rightarrow \neg R(y, do(a(x), s)$

αντικαθιστούμε τις προϋποθέσεις εκτέλεσης της ενέργειας a και τις προϋποθέσεις μετά την εκτέλεση της ενέργειας να βρίσκονται μεταβλητές του περιβάλλοντος σε συγκεκριμένες τιμές, με την πρόταση $\neg \beta_R(x, a, s)$ η οποία υποθέτει ότι ο μόνος τρόπος η μεταβλητή R να παραμείνει στην προηγούμενη της τιμή, είναι καμία από τις ενέργειες οι οποίες προκαλούν την αλλαγή της να μη συμβούν. Όπως και στα αντίστοιχα θετικά αξιώματα πλαισίου, δε μας ενδιαφέρει τι ακριβώς χρειάζεται να ισχύει για να εκτελεστεί η κάθε μία από τις πιθανές ενέργειες.

Ελάττωση των αξιωμάτων πλαισίου με τη μέθοδο του Schubert

Σαν παράδειγμα ας θεωρήσουμε την παραγωγή των αξιωμάτων πλαισίου για τη μεταβλητή 'σπασμένο' ως προς όλες τις ενέργειες τις οποίες θα μπορούσαμε να αναγνωρίσουμε στον ιδεατό κόσμο. Ας πούμε ότι οι τελευταίες είναι οι σηκώνει(r, x), επισκευάζει(r, x), αφήνει_κάτω(r, x), ρίχνει(r, x).

Σύμφωνα με τη βασική θεώρηση τα αξιώματα πλαισίου θα έπρεπε να είναι τα εξής:

false => σπασμένο(do(σηκώνει(r, x), s)

false => ¬ σπασμένο(do(σηκώνει(r, x), s)

false => σπασμένο(do(αφήνει_κάτω(r, x), s)

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

false => ┐ σπασμένο(do(αφήνει_κάτω(r, x), s)

σπασμένο(y, s) /\ ┐ (y=x) => σπασμένο(y, do(επισκευάζει(r, x)), s)

false => ┐ σπασμένο(y, do(επισκευάζει(r, x)), s)

false => σπασμένο(y, do(ρίχνει(r, x)), s)

┐ σπασμένο(y, s) /\ ┐ [(y=x) \/ εύθραυστο(x)] => ┐ σπασμένο(y, do(ρίχνει(r, x)), s)

Όπως περιμέναμε ο αριθμός των αξιωμάτων πλαισίου για τη μεταβλητή σπασμένο είναι 2 * A = 8.

Με τη θεώρηση του Schubert τα θεωρήματα πλαισίου μειώνονται σε 2 μονάχα, ένα για κάθε μία από τις πιθανές τιμές της μεταβλητής σπασμένο:

σπασμένο(x, s) /\ a ≠ επισκευάζει(x, s) => σπασμένο(x, do(a, s))

┐ σπασμένο(x, s) /\ a ≠ ρίχνει(x, s) =>┐ σπασμένο(x, do(a, s))

Με τον ίδιο τρόπο είναι δυνατόν τα αξιώματα πλαισίου όπως είχαν αναλυθεί μέχρι τώρα να μην αποτελούν πρόβλημα, μιας και δεν υφίσταται πια ο μεγάλος τους αριθμός και χρειάζεται να αναλύονται μονάχα οι ενέργειες οι οποίες είναι σε θέση να αλλάξουν την τιμή της μεταβλητής. Έτσι, όλα τα αξιώματα τα οποία προέκυπταν από κενές προτάσεις δε χρειάζεται να υπολογίζονται πλέον.

Κυριάκος Μανιατέας

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 λογιμός 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 μεταβητές 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 α 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 προυποθέσεις οι οποίες μοντελοποιούνται από τη συνάρτηση Poss. Έτσι με Poss(a, s) χαρακτηρίζονται οι προυποθέσεις 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

Το πρόβλημα του πλαισίου στη Ρομποτική

Poss(pickup(r, x), s) → [(∀z)¬holding(r, x, z)/\¬heavy(x)/\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 ¬broken(x, do(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 περισσοτέρων ενεργειών.

Μία από τις πιο δημοφιλείς προσεγγίσεις στο πρόβλημα του πλαισίου η οποία είχε ως βάση το λογισμό καταστάσεων προτάθηκε από τον Pednault το 1989. Στη γενική περίπτωση, ο αριθμός των αξιωμάτων πλαισίου είναι υπερβολικά μεγάλος. Στη χειρότερη περίπτωση είναι 2 * A * F όπου

- A είναι ο αριθμός των ενεργειών που είναι δυνατόν να συμβούν στον κόσμο και
- F είναι ο αριθμός των μεταβλητών που χαρακτηρίζουν τον κόσμο.

Το 2 στην παραπάνω σχέση προκύπτει από το γεγονός ότι υπάρχει για κάθε ζευγάρι ενέργειας και μεταβλητής ένα αξίωμα που κρατάει τη μεταβλητή στην τιμή αληθής μετά την εκτέλεση της εντολής κι ένα αξίωμα το οποίο περιγράφει το μηχανισμό με τον οποίο είναι δυνατόν να κρατηθεί μια μεταβλητή στην τιμή ψευδής μετά την εκτέλεση μιας εντολής. Επίσης, η διαδικασία να εξάγονται κάθε φορά όλα αυτά τα αξιώματα είναι πολύπλοκη.

Κυριάκος Μανιατέας

Ο Pednault[2] παρουσίασε έναν τρόπο με τον οποίο είναι δυνατόν να εξαχθούν όλα τα αξιώματα πλαισίου μέσω των αξιωμάτων αποτελέσματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα αποδοτικό μιας και σε ένα τυπικό κόσμο, τα αποτελέσματα από την εκτέλεση μιας ενέργειας είναι πολύ λίγα λόγω της συνηθισμένης τοπικότητας των αποτελεσμάτων. Ο αριθμός των αξιωμάτων πλαισίου θα παραμείνει στην παραπάνω πολυπλοκότητα αλλά πλέον δε θα χρειάζεται κάποιος να σκέφτεται ένα προς ένα όλες τις σχέσεις των ενεργειών με τις μεταβλητές του κόσμου αφού θα υπάρχει ένας απλός και αυτόματος τρόπος για την εξαγωγή των αξιωμάτων.

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

[9] 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, Dortrecht, 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)