Α.Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ

Υλοποίηση σε C λύσεων για το πρόβλημα επιπτώσεων και συγκριτικά αποτελέσματα

ΤΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ
ΠΑΓΚΑΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ
(ΑΜ:5534, 11ο ΕΞΑΜΗΝΟ)

ΔΙΔΑΣΚΩΝ: ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ 3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ 5
1. Τα θεμέλια των θεωριών πράξης 7
1.1 Σκοπός 7
1.1.1 Σημειογραφία 10
1.2 Μία βασική θεωρία πράξης 11
2. Βιβλιογραφικές Σημειώσεις 23
3. Το πρόβλημα της διακλάδωσης 28
3.1 Έμμεσες επιδράσεις των πράξεων 28
3.2 Ελαχιστοποιώντας την αλλαγή 30
3.3 Η κατηγοριοποίηση των ευρών 35
3.4 Αιτιολογικές σχέσεις 40
3.4.1 Οι αιτιολογικές σχέσεις και η εφαρμογή τους 41
3.5 Πληροφορίες Επιρροής 51
4. Μη ελαχιστοποιημένες διάδοχες καταστάσεις 62
Βιβλιογραφία 65

Πρόλογος

Ως βάση για τα υπολογιστικά συστήματα της νέας γενιάς έχει ανακηρυχθεί η λογική [17]. Η λογική και οι συμβατικές μέθοδοι κερδίζουν έδαφος σε πολλές περιοχές της επιστήμης των υπολογιστών και της τεχνητής νοημοσύνης, αλλά η επικείμενη επανάσταση δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμα. Παρόλα αυτά, έντονες συνέπειες στην ποιότητα των λογισμικών και μηχανικών προϊόντων έχει ο κατευθυνόμενος από αντικείμενα προγραμματισμός καθώς και το διάδοχο σχέδιο.

Μια λογική προσέγγιση αντίθετα, θα προσέφερε πολλά πλεονεκτήματα όπως η ορθότητα ελεγχόμενη από μηχανές, η γρήγορη προσαρμογή σε σχεδιαστικές αλλαγές, η δραματική μείωση του κόστους συντήρησης, η καλύτερη κατανόηση του σχεδιασμού, το μεγαλεπήβολο δυναμικό για την αυτοματοποίηση της σύνθεσης του προϊόντος από τον σχεδιασμό των περιορισμών και ούτω καθεξής. Τότε, γιατί δεν ακολουθούν όλοι την λογική προσέγγιση;

Κατά την διάρκεια της δεκαετίας του ογδόντα έγινε προφανές στην λογική κοινότητα ότι για τις περισσότερες εφαρμογές, η λογική, όπως εφαρμοζόταν τότε, μπορεί να έχει έλλειψη από ένα ζωτικό συστατικό, το οποίο από την άλλη πλευρά είναι έμφυτο στις κανονικές γλώσσες. Αυτό που λείπει από τη λογική είναι ένας απλός και φυσικός τρόπος περιγραφής των πράξεων καθώς και η αλλαγή χωρίς να εμφανίζονται προβλήματα. Αυτά τα προβλήματα αφορούν αυτό που καλείται πρόβλημα πλαισίου. Χωρίς λύση στο πρόβλημα πλαισίου η λογική θα συνεχίσει να υποφέρει από αυτό το μειονέκτημα. Ευτυχώς, το πρόβλημα πλαισίου έχει επιλυθεί πλέον με ένα τέτοιο τρόπο που το μειονέκτημα έχει εξαφανιστεί.

Σήμερα, υπάρχει ένας αριθμός από συμβατικές μεταβλητές της λύσης του προβλήματος πλαισίου. Μία από αυτές αποτελείται από την περιγραφή πράξεων και μεταβολής μέσα στην μαθηματική ανάλυση του εύρους, ένα φορμαλισμό Prolog πρώτου βαθμού. Η μαθηματική ανάλυση του εύρους αποτελεί τη βάση του περιεχομένου αυτής της εργασίας. Έτσι ξεκινάει από μία βάση η οποία έχει ξεπεράσει το μειονέκτημα το οποίο είχε η λογική για πολλά χρόνια.

Παρ'όλα αυτά, από το πρόβλημα πλαισίου μπορούν να δημιουργηθούν και άλλα συγγενή προβλήματα, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν με μια απόλυτα σωστή λύση. Τα πιο συχνά προβλήματα που ανήκουν σε αυτή την οικογένεια είναι το πρόβλημα διακλάδωσης και το πρόβλημα τροποποίησης. Ο καθηγητής Thielscher έχει παρουσιάσει έναν τρόπο επίλυσης για αυτές τις δύο προκλήσεις. Υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις λογικές προσεγγίσεις και γίνονται προσπάθειες οι λύσεις να γίνουν γνωστές.

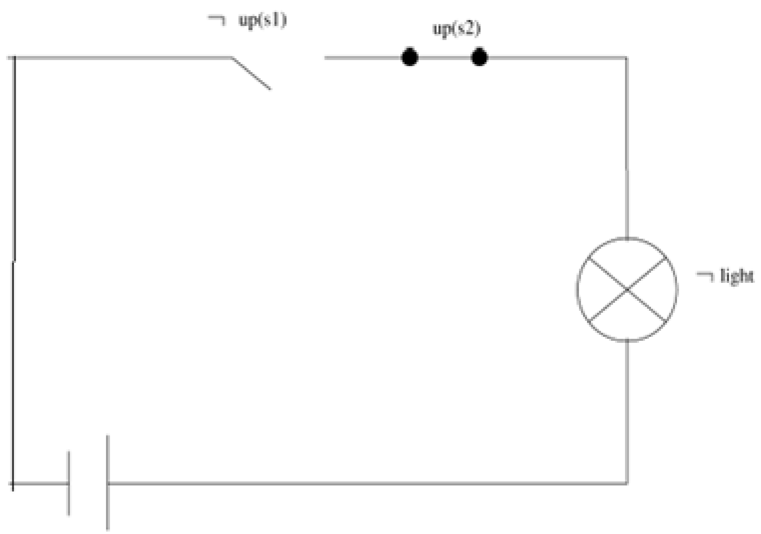
Τα ενδεικτικά παραδείγματα και η ακρίβεια της εργασίας την καθιστά εύκολα αναγνώσιμη στο κοινό. Επιπλέον στην εργασία αυτή προσπαθούμε να περιγράψουμε το θέμα σε βάθος, ένα θέμα που έχει σπουδαία σημασία για την ανθρώπινη σκέψη και απασχόλησε σε ένα κυρίως φιλοσοφικό επίπεδο για τουλάχιστον δύο χιλιάδες χρόνια. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το επίπεδο που επιτεύχθηκε από τις συνδυασμένες λύσεις στο πρόβλημα πλαισίου και των συγγενών προβλημάτων που προκύπτουν.

Ο προγραμματισμός στη λογική μπορεί να περιλαμβάνει εντολές οι οποίες απαιτούν αλλαγές οριζόμενες με λογική χωρίς συμβιβασμούς. Ομοίως, η μηχανική σχεδίαση, η οποία περιλαμβάνει πάντα την αλλαγή, μπορεί τώρα να τυποποιηθεί φυσικά σε μια λογική ρύθμιση με όλα τα ελκυστικά πλεονεκτήματα που αναφέρονται παραπάνω. Αυτό περιλαμβάνει το λογικό προσδιορισμό των παραγόντων στα δίκτυα ή αυτόνομα ρομπότ που ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους καθώς και με τους χρήστες σε ένα πιο άνετο γλωσσικό επίπεδο.

Συνήθως χρειάζονται αρκετά χρόνια έως ότου να διαχυθούν οι θεμελιώδεις ιδέες μέσα στην κοινότητα σε βαθμό να υλοποιηθούν οι πιθανές συνέπειες τους. Μακάρι αυτή η εργασία να είναι το ίδιο ενδιαφέρουσα για τον αναγνώστη όσο ήταν και για εμένα η πορεία της διεκπεραίωσης της.

Εισαγωγή

Από τα πιο δύσκολα προβλήματα στον τομέα της ρομποτικής, της τεχνολογίας λογισμικού, καθώς και των βάσεων δεδομένων θεωρείται το πρόβλημα της διακλάδωσης. Για να εισάγουμε αυτό το πρόβλημα θα δώσουμε ένα παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι μας ενδιαφέρει να διατηρήσουμε μια βάση δεδομένων που περιγράφει ένα απλό κύκλωμα (Εικόνα 1), το οποίο έχει δύο διακόπτες και μία λάμπα.



Εικόνα 1 - Απλό Κύκλωμα

Η συμπεριφορά του κυκλώματος μπορεί να περιγραφτεί από τους ακόλουθους περιορισμούς ακεραιότητας:

$$up(s1) \wedge up(s2) \equiv light$$

$$\neg up(s1) \rightarrow \neg light$$

$$\neg up(s2) \rightarrow \neg light$$

Από τον πρώτο περιορισμό συνεπάγεται ότι όταν οι δύο διακόπτες είναι ενεργοποιημένη, τότε η λάμπα είναι αναμμένη. Από τον δεύτερο και τον τρίτο περιορισμό συνεπάγεται ότι αν ένας διακόπτης είναι απενεργοποιημένος, τότε η λάμπα δεν πρέπει να είναι αναμμένη.

Οι παραπάνω προτάσεις περιγράφουν τα άμεσα αποτελέσματα της ενέργειας toggle_switch. Μια κατάσταση θεωρείται συνεπής όταν ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς ακεραιότητας. Ας υποθέσουμε ότι το κύκλωμα είναι στην κατάσταση $S = \{\neg up(s_1), up(s_2), \neg light\}$. **Η S κατάσταση είναι συνεπής, γιατί ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς ακεραιότητας**. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε εκτελέσει την ενέργεια toggle_switch (S1). Η ενέργεια αυτή έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αλλαγή της κατάστασης του διακόπτη S1 από ¬ up (S1) σε up(S1). Τώρα η κατάσταση του κυκλώματος είναι $S1 = \{up(s1), up(s2), \neg light\}$. Η κατάσταση αυτή έρχεται σε αντίθεση, διότι παραβιάζει τον πρώτο περιορισμό ακεραιότητας. Προκειμένου να πετύχουμε μια συνεπή κατάσταση πρέπει να αλλάξουμε την κατάσταση S1 σε μία από τις ακόλουθες καταστάσεις:

$$S_1 = \{up(s1), up(s2), light\},$$

$$S_2 = \{up(s1), \neg up(s2), \neg light\}.$$

Και οι δύο καταστάσεις (S_1, S_2) είναι συνεπείς, επειδή πληρούνται όλοι οι περιορισμοί ακεραιότητας. Όπως παρατηρούμε, οι αλλαγές από ¬*light* σε *light* της κατάστασης S2 ή η αλλαγή από τα $up(s2)$ σε $\neg up(s2)$ στην κατάσταση S_2 συμβαίνει για την παραγωγή μιας συνεπής κατάστασης και όχι μιας κατάστασης που προκύπτει ως άμεσο αποτέλεσμα της ενέργειας toggle_switch (S1). Αυτές είναι οι έμμεσες συνέπειες της ενέργειας toggle_switch (S1). Το λογικό συμπέρασμα είναι ότι η λάμπα πρέπει να είναι αναμμένη. Για να εξαχθεί το συμπέρασμα αυτό πρέπει να καθορίσουμε ποιες μπορεί να είναι οι έμμεσες συνέπειες της ενέργειας. Να σημειώσουμε ότι υπάρχουν έμμεσες συνέπειες λόγω της ύπαρξης των περιορισμών ακεραιότητας. Το πρόβλημα διακλάδωσης αναφέρεται στη συνοπτική περιγραφή των έμμεσων επιπτώσεων μιας ενέργειας με την παρουσία περιορισμών. Αρκετοί τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος διακλάδωση έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Τα περισσότερα από αυτά βασίζονται στην κατάσταση [11] και στην περίπτωση λογισμού[12].

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα παρουσιάσουμε τα βασικά θεμέλια των θεωριών πράξη, στη συνέχεια μια αναλυτική παρουσίαση σε βιβλιογραφικές σημειώσεις στο αντικείμενο αυτό. Στο 3ο κεφάλαιο της εργασίας θα περιγράψουμε πλήρως το πρόβλημα της διακλάδωσης, και κλείνοντας την εργασία αυτή με το κεφάλαιο 4 θα παρουσιάσουμε τις μη ελαχιστοποιημένες διάδοχες καταστάσεις.

1. Τα θεμέλια των θεωριών πράξης

1.1 Σκοπός

Πριν συζητήσουμε το σκοπό των θεωριών πράξης ας δώσουμε ένα κατάλληλο ορισμό για το εν λόγω θέμα:

Μία θεωρία πράξης αποτελείται από μια επίσημη γλώσσα που επιτρέπει επαρκείς όρους πεδίων ορισμού πράξεων και σεναρίων και μας λέει με ακρίβεια τι συμπεράσματα μπορούν να αντληθούν από αυτούς τους όρους.

Φυσικά αυτός ο άτυπος ορισμός δεν μπορεί να εκτιμηθεί χωρίς περαιτέρω διευκρινήσεις των κρίσιμων όρων που χρησιμοποιούνται σ’ αυτόν. Κατ’ αρχάς, με την έννοια «πεδίο ορισμού της πράξης» εννοούμε κάθε πτυχή του κόσμου που μπορεί να τυποποιηθεί στην εκτέλεση των πράξεων και διαδραματίζει κεντρικό ρόλο. Αυτό συμβαίνει, για παράδειγμα, αν κάποιος θέλει να δημιουργήσει ένα μοντέλο ενός παράγοντα που αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του, δηλαδή, το μέρος του κόσμου που είναι σε θέση να επηρεάσει. Ένας αυτόνομος παράγοντας έχει ανάγκη από ακριβή γνώση ως προς τις επιπτώσεις των ενεργειών του, προκειμένου να ενεργεί με γνώμονα τον σκοπό ώστε να επιτευχθεί ο προκαθορισμένος στόχος. Ο τελευταίος απαιτεί να εξαχθούν τα σωστά συμπεράσματα από αυτή τη γνώση λαμβανομένων υπόψη των ιδιαίτερων καταστάσεων, στην οποία ο παράγοντας έχει αποκτήσει μερική/σχετική γνώση με την τρέχουσα κατάσταση του περιβάλλοντος και έχει ένα συγκεκριμένο στόχο στο μυαλό.

Με τον όρο «σενάριο πράξης» εννοούμε ακριβώς αυτές τις ειδικές περιπτώσεις: Είναι δεδομένες κάποιες πληροφορίες προς το παρόν, το παρελθόν και το μέλλον ακόμα η μία σχεδόν πραγματική κατάσταση του κόσμου. Ο στόχος στη συνέχεια είναι να ερμηνευτούν σωστά αυτές οι παρατηρήσεις, ώστε να εξαχθούν τα σωστά συμπεράσματα. Οι θεωρίες πράξεων το παρέχουν αυτό. Περιλαμβάνουν μια επίσημη πράξη συνεπαγωγής που καθορίζει το σύνολο των συμπερασμάτων που επιτρέπει το σενάριο μέσα σε ένα πεδίο ορισμού της πράξης.

Τόσο ένα γενικό πεδίο ορισμού πράξης, όσο και ένα συγκεκριμένο σενάριο καθορίζονται χρησιμοποιώντας την επίσημη γλώσσα που υπόκεινται στη θεωρία της πράξης. Αυτή η γλώσσα καθορίζει την εκφραστικότητα της θεωρίας. Υπάρχουν θεωρίες πράξης, για παράδειγμα, που υποστηρίζουν τον προσδιορισμό των πράξεων με μη προσδιοριστικά αποτελέσματα (όπως το ρίξιμο ενός ζαριού), και άλλες που δεν το υποστηρίζουν. Το αν μια συγκεκριμένη θεωρία πράξης, είναι κατάλληλη για μια συγκεκριμένη εφαρμογή ή όχι, εξαρτάται από την απαιτούμενη εκφραστικότητα, αν για παράδειγμα αρκεί για να εξετάσει μόνο διακριτές μεταβάσεις, τότε δεν υπάρχει καμία ανάγκη να χρησιμοποιηθεί μια θεωρία πράξης σχεδιασμένη για την μοντελοποίηση συνεχούς αλλαγής. Στην εργασία αυτή αναλύονται οι δύο πτυχές, ωστόσο οι έμμεσες επιπτώσεις και περιορισμοί της πράξης, είναι αναμφισβήτητα θεμελιώδη ζητήματα και πρέπει να ενσωματωθούν σε οποιαδήποτε θεωρία πράξης που πρόκειται να απευθυνθεί σε οτιδήποτε άλλο εκτός από τεχνητά απλοποιημένα πεδία ορισμού.

Τέλος, η αθώα λέξη «επαρκής» η οποία ο αναγνώστης μπορεί να έχει παραβλέψει στον ανωτέρω ορισμό, είναι πιθανώς η πιο κρίσιμη παράμετρος. Σημαίνει ότι ο προσδιορισμός των πράξεων και των αποτελεσμάτων τους θα είναι όσο πιο φυσικά γίνεται. Για παράδειγμα, δεν θα ήταν μόνο άβολο αλλά σαφώς αφύσικο να εξηγείται ρητά το αποτέλεσμα της εκτέλεσης μιας πράξης σε κάθε δυνατή κατάσταση. Αντίθετα, κανείς θα θέλει να διευκρινίσει ότι όταν κουβαλάς μία εφημερίδα προκαλείς την αλλαγή της θέσης της, ανεξάρτητα του τι χρώμα είναι και ποιο είναι το κόμμα στο οποίο ανήκει ο σημερινός πρόεδρος. Κατά τον ίδιο τρόπο, θα πρέπει κανείς να αποφύγει τον εκ νέου προσδιορισμό των επιπτώσεων της μεταφοράς ενός αντικείμενου το οποίο περιέχει (ή είναι κάτω από ή συνδέεται με κλπ) ένα άλλο αντικείμενο. Αντίθετα, το γεγονός ότι αυτό το πρόσθετο αντικείμενο αλλάζει τη θέση του, θα πρέπει να προκύπτει από τη γενική γνώση του κόσμου. Παρέχοντας όλα αυτά, οι θεωρίες πράξης περιλαμβάνουν πάντοτε, λιγότερο ή περισσότερο μία σιωπηρή γενική έννοια του χρόνου, της αλλαγής και της αιτιότητας. Αυτό υποδεικνύει ότι η επαρκής απαίτηση είναι αυτή που κάνει τις θεωρίες πράξης τόσο ξεχωριστές και είναι το θέμα αυτού της εργασίας.

Οι θεωρίες πράξης έχουν πολλά κοινά με τη λογική. Βασίζονται σε μια επίσημη γλώσσα και περιλαμβάνουν μια σχέση συνεπαγωγής ανάμεσα στις εκφράσεις σε λεπτή γλώσσα. Αυτή η σχέση καθορίζει τον τρόπο που εξάγονται συμπεράσματα από τους ορισμούς. Ωστόσο η συνεπαγωγή στις θεωρίες πράξης είναι κάπως διαφορετική από την συνεπαγωγή στην λεγόμενη λογική γενικής χρήσης, όπως η κλασική λογική πρώτου βαθμού. Ο λόγος είναι ότι η σχέση συνεπαγωγής αντανακλά τις ειδικές έννοιες της αλλαγής και της αιτιότητας που είναι συνυφασμένες με τις θεωρίες πράξης. Αυτός είναι συνήθως ο τυπικός ορισμός για το πώς να εξαχθούν πολύ πιο περίπλοκα συμπεράσματα σε σχέση με την πλειοψηφία της λογικής γενικής χρήσης. Επίσης οποιοσδήποτε εμπλουτισμός της οντολογίας της θεωρίας πράξης απαιτεί αλλαγές στον ορισμό της συνεπαγωγής.

Τόσο η πολυπλοκότητα όσο και οι συχνές αλλαγές της έννοιας της συνεπαγωγής των θεωριών πράξης, αποτελούν ένα σημαντικό μειονέκτημα λόγω της αυτόματης διαδικασίας της αιτιολογίας. Αυτό ευνοεί την λογική γενικής χρήσης, ως μέσο για το σκοπό αυτό. Η έρευνα στην αυτοματοποιημένη αφαίρεση σε λογική πρώτου βαθμού, για παράδειγμα, έχει κάνει αξιοσημείωτη πρόοδο κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Θα ήταν μάλλον μη συνετό να μην εκμεταλλευτεί κανείς αυτήν την εξέλιξη για την αυτοματοποίηση της λογικής σε διάφορους τομείς πράξεων. Ευτυχώς αυτό μπορεί να επιτευχθεί χωρίς να χαθεί το μεγάλο πλεονέκτημα των θεωριών πράξης, δηλαδή, η φυσικότητα τους, όταν πρόκειται για τυποποίηση του πεδίου ορισμού και του σεναρίου. Αυτό που πρέπει να γίνει προς αυτή την κατεύθυνση είναι να ενταχθεί σε αξίωμα, όπως λογικής πρώτου βαθμού τα χαρακτηριστικά μιας θεωρίας πράξης. Με άλλα λόγια, η θεωρία της αλλαγής και της αιτιότητας πρέπει να καταστεί σαφής. Είναι συνηθισμένο να καλείται «θεμελιώδες αξίωμα» η προκύπτουσα κωδικοποίηση που χαρακτηρίζει μια συγκεκριμένη θεωρία πράξης. Επιπλέον, πρόσθετα αξιώματα αποτελούν τη γνώση σχετικά με ένα συγκεκριμένο πεδίο ορισμού και σεναρίου. Μαζί παρέχουν μια (ενδεχομένως) κατάλληλη κωδικοποίηση που επιτρέπει να εξαχθούν όλα τα συμπεράσματα που προτείνονται από την υποκείμενη θεωρία πράξης μέσω όμως μιας λογικής γενικής χρήσης. Παρατηρήστε ότι το ερώτημα του αν μία τέτοια κωδικοποίηση είναι κατάλληλη, αποτελεί ένα ακριβές μαθηματικό πρόβλημα το οποίο λύνεται, με το να αποδείξει κανείς το κατά πόσον ή όχι τα εξαγόμενα συμπεράσματα είναι πάντοτε ίδια με αυτά που προκύπτουν από την άποψη της θεωρίας πράξης. Αυτή η παροχή μιας αιτιολόγησης του αξιώματος είναι ένας σημαντικός στόχος των θεωριών πράξης και η κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη τους. Περισσότερα για αυτό στο σύντομο ιστορικό στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

Στην εργασία αυτή, ασχολούμαστε με τις δύο πιο θεμελιώδεις προκλήσεις για τις θεωρίες πράξης, δηλαδή να λαμβάνονται υπόψη οι έμμεσες επιπτώσεις των πράξεων (το πρόβλημα διακλάδωσης) και για τον χειρισμό απίθανων αλλά όχι αδύνατων ακατάλληλων πράξεων με φυσικό τρόπο (το πρόβλημα συνθήκης). Έχουμε αναπτύξει μια ενιαία θεωρία πράξης, η οποία παρέχει λύσεις και στα δύο προβλήματα. Θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια ένα αποδεδειγμένα σωστό αξίωμα της θεωρίας μας, μέσω μιας λογικής γενικής χρήσης, δηλαδή κλασική λογική πρώτου βαθμού στο πρώτο μέρος, για το πρόβλημα της διακλάδωσης μόνο, και κλασικής λογικής υποβοηθούμενης από μη μονότονα χαρακτηριστικά για το σύνολο της θεωρίας μας.

1.1.1 Σημειογραφία

Η μόνη απαραίτητη γνώση για να κατανοήσουμε όλα τα μέρη της εργασίας είναι κάποιες βασικές γνώσεις της κλασικής λογικής. Αλλά ακόμα και αυτό δεν απαιτείται παντού, όπου η θεωρία της πράξης ορίζεται στην τυπική λογική.

Χρησιμοποιούμε τους πρότυπους λογικούς συνδέσμους, δηλωμένους κατά φθίνουσα σειρά προτεραιότητας, $\neg$ (άρνηση), $\wedge$ (σύζευξη), $\vee$ (διάζευξη), $\supset$ (συνεπαγωγή), $\equiv$ (ισοδυναμία), $\forall$ (καθολικός ποσοδείκτης) και $\exists$ (ποσοδεικτοδότηση ύπαρξης). Και τα σύμβολα και οι σταθερές ξεκινούν με κεφαλαίο γράμμα, ενώ τα σύμβολα πράξεων και οι μεταβλητές είναι με μικρά γράμματα, μερικές φορές με εκθέτες ή δείκτες. Οι ελεύθερες μεταβλητές στους τύπους θεωρούνται παγκοσμίως ποσοτικές, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά. Τα ειδικά σύμβολα που χρησιμοποιούνται σε παράδειγμα πεδίων ορισμού, είναι τυπωμένα σε στυλ γραφομηχανής, όπως η γαλοπούλα, πατάτα, ή άδειο. Χρησιμοποιούμε περαιτέρω τις βασικές πράξεις και σχέσεις $\cup$ (ένωση), $\cap$ (τομή), \ (διαφορά), $\in$ (ανήκει), $\subseteq \supseteq$ (υπο-και υπερ- σύνολο) και $\Psi\Omega$ (κατάλληλο υπο και υπερ- σύνολο). Όλα τα άλλα σύμβολα που χρησιμοποιούνται σε αυτό το βιβλίο εξηγούνται στη πρώτη τους εμφάνιση.

1.2 Μία βασική θεωρία πράξης

Αναφερθήκαμε σε γενικές γραμμές για τις θεωρίες πράξης, στο κομμάτι αυτό θα κάνουμε μια εισαγωγή σε μια στοιχειώδη θεωρία πράξης, που περιέχει όλα τα απαραίτητα βασικά συστατικά. Όλες οι θεωρίες της πράξης, πρέπει να παρέχουν τα μέσα για την περιγραφή των καταστάσεων. Μία κατάσταση είναι ένα στιγμιότυπο από το μέρος του κόσμου που μοντελοποιείται σε μία συγκεκριμένη στιγμή στο χρόνο. Οι περιγραφές της κατάστασης πρέπει να αποτελούνται από ατομικές προτάσεις. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για τους σκοπούς μας εφόσον οι πράξεις συνήθως επηρεάζουν μόνο ένα μικρό κλάσμα του περιβάλλοντος και προκειμένου να συγκεντρωθεί κανείς σε αυτό το κλάσμα κατά τον προσδιορισμό των αποτελεσμάτων μιας πράξης, θα πρέπει να έχει πρόσβαση σε αυτό. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή, εάν οι καταστάσεις παρουσιάζονται ως αφηρημένα αντικείμενα χωρίς να φέρουν μια εσωτερική δομή (όπως είναι χαρακτηριστικό για τη θεωρία των αυτομάτων, για παράδειγμα), ο αντίκτυπος της πράξης θα μπορούσε να καθορίζεται από ένα πλήρη πίνακα μετάβασης της κατάστασης. Αυτό θα παραβίαζε την πιο βασική προϋπόθεση για την επάρκεια.

Οι ατομικές προτάσεις αντιπροσωπεύουν ιδιότητες, ή γενικότερα τις σχέσεις μεταξύ των φορέων, που ισχύουν ή δεν ισχύουν σε μια συγκεκριμένη κατάσταση. Η πραγματική τιμή μιας τέτοιας πρότασης μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια του χρόνου, ως συνέπεια της μετάβασης κατάστασης. Λόγω αυτών των δυναμικών χαρακτηριστικών, έχει καθιερωθεί ο όρος «εύρος (fluent)» ως ένα όνομα για αυτές τις προτάσεις. Έτσι, μια κατάσταση χαρακτηρίζεται λέγοντας, ποιά από τα διάφορα εύρη είναι αληθή και ποια ψευδή σε αυτή την κατάσταση.

<u>Ορισμός 1.2.1</u>: *Έστω E ένα πεπερασμένο σύνολο συμβόλων που ονομάζονται οντότητες. Το F δηλώνει ένα πεπερασμένο σύνολο από σύμβολα τα οποία καλούνται ονόματα εύρους, καθένα από τα οποία συνδέεται με ένα φυσικό αριθμό (ενδεχομένως μηδέν) που ονομάζεται τάξη. Ένα εύρος είναι μια έκφραση* $f(e_1 \ldots e_n)$ *όπου* $f \in F$ *έχει τάξη* n *και* $e_1 \ldots e_n \in E$*. Ένα λεκτικό εύρος (fluent literal) είναι το εύρος ή το αρνητικό του που συμβολίζεται ως* $\neg f(e_1, \ldots, e_n)$.

Ένα σύνολο από λεκτικά εύρη, είναι ασυνεπές αν περιέχει ένα εύρος και το αρνητικό του, αλλιώς είναι συνεπές. Μία κατάσταση είναι ένα μέγιστο συνεκτικό σύνολο από λεκτικά εύρη.

Πριν συνεχίσουμε, θα εξηγήσουμε αυτές τις έννοιες με ένα μικρό παράδειγμα. Σε πολλά σημεία σε αυτή την εργασία μοντελοποιούμε τη συμπεριφορά των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Ας υποθέσουμε ότι ένα συγκεκριμένο κύκλωμα αποτελείται από δύο δυαδικούς διακόπτες, μια λάμπα και μια μπαταρία. Οι διάφορες καταστάσεις αυτού του συστήματος μπορούν να περιγραφούν με τις δύο οντότητες **E={s_1, s_2}** που αντιπροσωπεύουν τους δύο διακόπτες, μαζί με το μοναδιαίο εύρος **up** που δηλώνει τη θέση του ορίσματός του και το μηδενικό εύρος **light** (φως), που δείχνει την κατάσταση της λάμπας. Τότε για παράδειγμα τα **up(s_2)** και **¬light** είναι λεκτικά εύρη και το **{¬up(s_1), up(s_2), ¬light}** είναι το μέγιστο συνεπές σύνολο από λεκτικά εύρη, ως εκ τούτου μια κατάσταση.

Μπορεί εύκολα να παρατηρήσει κάποιος ότι οποιοσδήποτε συνδυασμός των αληθινών τιμών, αποτελεί μια κατάσταση. Στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας θα παρουσιάσουμε τα μέσα για να διακριθούν οι καταστάσεις που δεν μπορούν να συμβούν εξαιτίας εξαρτήσεων ειδικών για το πεδίο ορισμού μεταξύ των ευρών. Για λόγους ευκολίας, εισάγουμε τις εξής σημειολογικές συμβάσεις: Εάν το l είναι ένα λεκτικό εύρος, τότε με $\|l\|$ ορίζουμε το καταφατικό του στοιχείο, δηλαδή $\|f(\overline{e})\| = \|\neg f(\overline{e})\| = f(\overline{e})$, όπου $f \in F$ και $\overline{e}$ είναι μια ακολουθία από n οντότητες με το n να είναι η τάξη του f. Αυτή η σημειογραφία επεκτείνεται σε σύνολα λεκτικά εύρη S ως $\|S\| = \{\|l\| : l \in S\}$. Δηλαδή, όποτε το S είναι μια κατάσταση, τότε το $\|S\|$ είναι το σύνολο όλων των εύροςs. Αν l είναι ένα αρνητικό εύρος, τότε το $\neg l$ θα πρέπει να ερμηνεύεται ως $\|l\|$. Με άλλα λόγια, $\neg\neg f(\bar{e}) = (\bar{e})$.

Τέλος, εάν S είναι ένα σύνολο λεκτικά εύρη, τότε με $\neg S$ συμβολίζουμε το σύνολο $\{\neg l : l \in S\}$. Δηλαδή, ένα σύνολο S από λεκτικά εύρη είναι ασυνεπές αν $S \cap \neg S \neq \{\}$.

Η δεύτερη θεμελιώδης έννοια σε κάθε θεωρία πράξης, είναι οι ίδιες οι πράξεις. Οι πράξεις όταν εκτελούνται προκαλούν μεταβάσεις της κατάστασης.
Όπως φαίνεται από τα ανωτέρω, μια θεμελιώδης παραδοχή σχετικά με τις πράξεις είναι ότι πάντα επηρεάζουν μόνο ένα μικρό μέρος μιας ολόκληρης κατάστασης. Η απαίτηση της επάρκειας υπαγορεύει ότι οι όροι της πράξης επικεντρώνονται μόνο σε αυτό το κλάσμα. Υπενθυμίζεται ότι η απόφαση να χωριστεί η κατάσταση σε εύρος s έχει γίνει για αυτό τον λόγο. Η περιγραφή της επίδρασης μιας πράξης ανάγεται στον καθορισμό του ποιου εύρος s αλλάζουν την πραγματική τους τιμή όταν εκτελείται η πράξη.

Για παράδειγμα, το σβήσιμο του δεύτερου διακόπτη, S_2, έχει πάντοτε ως αποτέλεσμα το εύρος **up(s_2)** να γίνεται ψευδές, ανεξάρτητα από τις τιμές όλων των άλλων εύρος s. Η ερμηνεία αυτή μπορεί να περιγραφτεί ως:

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

Σχέση 1.1

Αυτό σημαίνει ότι η πράξη *κλείσιμο του* s_2 μπορεί να εκτελεστεί σε οποιαδήποτε κατάσταση S, η οποία ικανοποιεί την $up(s_2) \in S$ και η προκύπτουσα κατάσταση λαμβάνεται με την αντικατάσταση του $up(s_2)$ από $\neg up(s_2)$ στο S. Έτσι, αν για παράδειγμα σβήναμε το s_2 στην παραπάνω κατάσταση $\{\neg up(s_1), up(s_2), \neg light\}$ τότε η προκύπτουσα κατάσταση θα ήταν $\{\neg up(s_1), \neg up(s_2), \neg light\}$.

Ο καθορισμός της πράξης στο παράδειγμα μας ήταν ιδιαίτερα εύκολος, επειδή το αποτέλεσμα είναι πάντα το ίδιο. Δεν είναι δύσκολο να φανταστεί κανείς πιο σύνθετες πράξεις που παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία εκτελούνται. Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να περιγράψουμε τι θα συμβεί αν αλλάξουμε το δεύτερο διακόπτη. Προφανώς υπάρχουν δύο περιπτώσεις που πρέπει να εξεταστούν. Κατ' αρχάς, αν ο διακόπτης είναι επί του παρόντος ανοικτός, τότε είναι κλειστός στη συνέχεια, και, δεύτερον, αν είναι ήδη κλειστός, τότε η εναλλαγή προκαλεί να είναι ανοικτός. Οι πράξεις αυτού του πιο σύνθετου είδους περιγράφονται από δύο ή περισσότερους «κανόνες» από τη μορφή της (Σχέση 1.1). Η εναλλαγή στο δεύτερο διακόπτη, για παράδειγμα, μπορεί να προσδιοριστεί μέσω:

$$
\begin{aligned}
&\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\ \ \sigma\tau o\ s_2\ \mu\varepsilon\tau\alpha\tau\rho\acute{\varepsilon}\pi\varepsilon\iota\, \tau\eta\nu\,\{up(s_2)\}\ \sigma\varepsilon\ \{\neg up(s_2)\}\\
&\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\ \ \sigma\tau o\ s_2\ \mu\varepsilon\tau\alpha\tau\rho\acute{\varepsilon}\pi\varepsilon\iota\, \tau\eta\nu\,\{\neg up(s_2)\}\ \sigma\varepsilon\ \{up(s_2)\}
\end{aligned}
$$

Παρατηρήστε ότι δεδομένου ότι οι καταστάσεις είναι μέγιστα συνεπή σύνολα, περιέχουν πάντα είτε $up(s_2)$, είτε $\neg up(s_2)$, τουλάχιστον στο πεδίο ορισμού στο παράδειγμά μας. Σε κάθε περίπτωση ως εκ τούτου, ακριβώς ένας από τους δύο κανόνες της πράξης για την $\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\ \ \sigma\tau o\ s_2$ εφαρμόζεται και αποδίδει το αναμενόμενο αποτέλεσμα, δηλαδή, ότι ο διακόπτης αλλάζει θέση.

Συχνά είναι βολικό να καθορίσετε μια πράξη ταυτόχρονα για μια ολόκληρη συλλογή από παρόμοιες οντότητες. Για το σκοπό αυτό, οι κανόνες της πράξης μπορεί να περιέχουν μεταβλητές που πρέπει να αντικατασταθούν από οντότητες. Για παράδειγμα, οι δύο όροι:

$$
\begin{aligned}
&\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\ \ \sigma\tau o\ x\ \mu\varepsilon\tau\alpha\tau\rho\acute{\varepsilon}\pi\varepsilon\iota\, \tau\eta\nu\,\{up(x)\}\ \sigma\varepsilon\ \{\neg up(x)\}\\
&\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\ \ \sigma\tau o\ x\ \mu\varepsilon\tau\alpha\tau\rho\acute{\varepsilon}\pi\varepsilon\iota\, \tau\eta\nu\,\{\neg up(x)\}\ \sigma\varepsilon\ \{up(x)\}
\end{aligned}
$$

περιγράφουν τι σημαίνει μετάπτωση γενικά. Για να είμαστε πιο ακριβείς, έστω ότι το Ξ συμβολίζει μια πεπερασμένη ακολουθία μεταβλητών που επιλέγονται από ένα δεδομένο μη αριθμήσιμο σύνολο V. Αν το Ξ περιέχει τις μεταβλητές που εμφανίζονται σε ορισμένες εκφράσεις ξ, τότε αυτές γράφονται ως $\xi\left|\bar{x}\right|$. Έστω ότι $\bar{x} = x_1,...,x_n$, τότε το θεμελιώδες στιγμιότυπο μιας έκφρασης $\xi\left|\bar{x}\right|$ λαμβάνεται με την αντικατάσταση του $\theta = \{x_1 \to e_1,...,x_n \to e_n\}$ στο ξ, όπου

$e_1,...,e_n \in E$ είναι οντότητες. Ας υποθέσουμε ότι $\bar{e} = e_1,...,e_n$, τότε το $\xi|\bar{x}|\theta$ γράφεται επίσης και $\xi|\bar{e}|$. Για παράδειγμα το θεμελιώδες στιγμιότυπο:

$$a|s_2| = \mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\,(s_2)\ \ \mu\varepsilon\tau\alpha\tau\rho\acute{\varepsilon}\pi\varepsilon\iota\ \ \tau o\ \{up(s_2)\}\ \sigma\varepsilon\ \ \{\neg up(s_2)\}$$

Μπορεί να ληφθεί από την:
$a|x| = \mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\,(x)\ \ \mu\varepsilon\tau\alpha\tau\rho\acute{\varepsilon}\pi\varepsilon\iota\ \ \tau o\ \{up(x)\}\ \sigma\varepsilon\ \ \{\neg up(x)\}$, αντικαθιστώντας $\{x \rightarrow s_2\}$.

Τέλος αυτό οδηγεί στο τελικό ορισμό των πράξεων και τους όρους τους. Καλούμε ως εύρος εκφράσεις κάθε $f(t_1,..,t_n)$ και την αρνητική της $\neg f(t_1,..,t_n)$, όπου το f είναι το εύρος όνομα της τάξη $n \geq 0$ για κάθε t_i είναι είτε μια οντότητα ή μια μεταβλητή $(1 \leq t_i \leq n)$.

<u>Ορισμός 1.2.2:</u> *Έστω ότι το A είναι ένα πεπερασμένο σύνολο από ονόματα πράξεων, κάθε μία από τις οποίες σχετίζεται με ένα φυσικό αριθμό (πιθανόν μηδέν) ο όποιος λέγεται τάξη. Μία πράξη είναι ένας θεμελιώδης όρος $a(\bar{e})$, όπου $a \in A$ έχει τάξη ίση με το μήκος του $\bar{e}$.*

Ένας κανόνας πράξης έχει τη μορφή:

$$a(\bar{x})\ \ \mu\varepsilon\tau\alpha\tau\rho\acute{\varepsilon}\pi\varepsilon\iota\ C|\bar{x}|\ \ \sigma\varepsilon\ \ E|\bar{x}|$$

- όπου $a \in A$ έχει τάξη ίση με το μήκος του $\bar{x}$,
- και $C|\bar{x}|$ και $E|\bar{x}|$ είναι σύνολα από εύρος εκφράσεις που ικανοποιούν τα ακόλουθα.

Και το $C|\bar{e}|$ και το $E|\bar{e}|$ για κάθε $\bar{e}$ είναι συνεπή και $\|C|\bar{e}|\| = \|E|\bar{e}|\|$, το οποίο σημαίνει ότι το C και το E αναφέρονται πάντα στα ίδια εύρος. Αν το S είναι μια κατάσταση, τότε ένα θεμελιώδες στιγμιότυπο $a|\bar{e}|$ ενός κανόνα πράξης $a|\bar{x}| = a(\bar{x})\ \ \mu\varepsilon\tau\alpha\tau\rho\acute{\varepsilon}\pi\varepsilon\iota\, C|\bar{x}|\ \ \sigma\varepsilon\, E|\bar{x}|$ εφαρμόζεται στο S αν και μόνο αν, $C|\bar{e}| \subseteq S$. Η εφαρμογή του $a|\bar{e}|$ στο S παράγει $(S \setminus C|\bar{e}|) \cup E|\bar{e}|$. Το τελευταίο καλείται προκαταρτική διάδοχη κατάσταση των S και $a(\bar{e})$.

Ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει ότι καθώς το S είναι μια κατάσταση, τα $C|\bar{e}|$ και $E|\bar{e}|$ είναι συνεπή και $\|C|\bar{e}|\| = \|E|\bar{e}|\|$, εξασφαλίζεται ότι το $(S \setminus C|\bar{e}|) \cup E|\bar{e}|$ είναι επίσης κατάσταση.

Μέχρι τώρα έχουμε δει μόνο τις πράξεις που καθορίζουν το πολύ μία προκαταρτική διάδοχη κατάσταση, όταν εκτελείται. Χρειαζόμαστε δύο διαφορετικούς κανόνες πράξης για να καθορίσουμε τις επιπτώσεις της μετάπτωσης(x), αλλά οι δύο συνθήκες είναι αμοιβαία αποκλειόμενες, έτσι ώστε οι δύο κανόνες δεν ισχύουν ποτέ ταυτόχρονα. Ωστόσο ο Ορισμός 1.2.2 δεν αποκλείει την ύπαρξη δύο (ή περισσότερων) ταυτόχρονων ισχυουσών κανόνων για τη μία και μοναδική πράξη. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι απαραίτητο αν κάποιος θέλει να περιγράψει πράξεις με απροσδιόριστο αποτελέσματα, τις αποκαλούμενες μη ντετερμινιστικές πράξεις. Το πέταγμα ενός νομίσματος είναι μια απλή πράξη η οποία προφανώς ανήκει σε αυτή την κατηγορία. Αλλά για να κολλήσει, με το τρέχον πεδίο ορισμού μας, υποθέστε ότι είναι εντελώς σκοτεινά, έτσι ώστε να είναι αδύνατο να ξεχωρίσει κανείς τους δύο διακόπτες. Παρ 'όλα αυτά θέλουμε να ανοίξουμε έναν από τους δύο (γνωρίζοντας ότι και οι δύο είναι επί του παρόντος κλειστοί). Εκτελώντας αυτό το σχέδιο, έχουμε δύο πιθανά αποτελέσματα: Είτε ανοίγουμε το πρώτο ή το δεύτερο διακόπτη. Αυτό μπορεί να μπει σε φόρμουλα από τους δύο κανόνες πράξεων

$$\begin{array}{l} \alpha\nu o\iota\gamma\mu\alpha - \tau o\upsilon - \acute{\varepsilon}\nu\alpha \;\; \mu\varepsilon\tau\alpha\tau\rho\acute{\varepsilon}\pi\varepsilon\iota \; \{\neg up(s_1)\} \;\; \sigma\varepsilon \;\; \{up(s_1)\} \\ \alpha\nu o\iota\gamma\mu\alpha - \tau o\upsilon - \acute{\varepsilon}\nu\alpha \;\; \mu\varepsilon\tau\alpha\tau\rho\acute{\varepsilon}\pi\varepsilon\iota \; \{\neg up(s_2)\} \;\; \sigma\varepsilon \;\; \{up(s_2)\} \end{array}$$

Σχέση 1.2

Σύμφωνα με τον Ορισμός 1.2.2 αυτοί οι δυο κανόνες είναι ταυτόχρονα εφαρμόσιμοι στην κατάσταση $\{\neg up(s_1), \neg up(s_2), \neg light\}$. Η εφαρμογή του καθενός καθορίζει δυο διαφορετικές διαδοχικές καταστάσεις, δηλαδή $\{up(s_1), \neg up(s_2), \neg light\}$ και $\{\neg up(s_1), up(s_2), \neg light\}$. Σε κάθε συγκεκριμένη περίπτωση, υπάρχει μόνο μία από αυτές τις πιθανότητες που θα μπορούσε να συμβεί πραγματικά. Ποια από αυτές θα συμβεί, ωστόσο, δεν μπορεί να προβλεφθεί τουλάχιστον όχι στη βάση της (περιορισμένης) γνώσης για το πεδίο ορισμού. Αυτό κάνει την πράξη, στην οποία αναφερόμαστε, μη καθοριστική.

Η έννοια των νόμων πράξης καθορίζει πως η εκτέλεση των πράξεων επηρεάζει τις περιγραφές των καταστάσεων, δηλαδή τα εύρη, επίσης μας παρέχει βασική μεθοδολογία ώστε να οριστούν πεδία ορισμού πράξης. Η σημασιολογία των ορισμών δίνεται από ολοκληρωμένα μοντέλα μετάβασης κατάστασης.

<u>Ορισμός 1.2.3:</u> *Ένα βασικό πεδίο ορισμού πράξης D είναι ένα τετραπλό (E,F,A,L) όπου E είναι ένα σύνολο οντοτήτων, F ένα σύνολο ονομάτων ευρών, A ένα σύνολο ονομάτων πράξης και L ένα σύνολο νόμων πράξης. Το μοντέλο μετάβασης D χαρτογραφεί πλήρως το* Σ *από ζεύγη κατάστασης-πράξης σε (πιθανώς κενά) σύνολα καταστάσεων όπως το* $S' \in \Sigma$ *(S,a) αν και μόνο αν το* S' *είναι ένα πρωταρχικός διάδοχος του S και του a.*

Κάθε (βασικό) πεδίο ορισμού πράξης παρέχει γενική π.χ. κατάσταση-ανεξάρτητη γνώση στον αντίκτυπο των εκτελούμενων πράξεων. Η εκμετάλλευση της γνώσης ενώ αντλούμε συμπεράσματα για συγκεκριμένα σενάρια μέσα σε ένα πεδίο ορισμού, αποτελεί το επόμενο θέμα που μας ενδιαφέρει.

Ένα σενάριο δίνεται από πληροφορίες σε ότι αφορά τις συγκεκριμένες αναπτύξεις του μέρους του πληθυσμού που έχει οριστεί ειδικά ως πεδίο ορισμού πράξης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτή η πληροφορία είναι ατελής καθώς μόνο για κάποια εύρη σε κάποια στάδια είναι γνωστές οι αληθινές αξίες. Ο γενικός στόχος της εργασίας είναι να εξαχθούν τα σωστά συμπεράσματα σε ότι αφορά τις αληθινές αξίες των άλλων ευρών σε άλλα στάδια. Φυσικά, αυτό απαιτεί γνώση των γενικών επιδράσεων των πράξεων, που δίνονται από τον τυπικό καθορισμό του βασικού πεδίου ορισμού της πράξης.

Ως ένα πολύ απλό παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι παρατηρούμε ότι αφού ο διακόπτης s_1 έχει αλλάξει θέση, βρίσκεται σε υψηλότερη θέση. Μετά, είναι λογικό να συμπεράνουμε ότι ο διακόπτης αρχικά ήταν κάτω. Αυτό προκύπτει από τη γνώση μας ως προς τις γενικές επιδράσεις της μετάπτωσης των διακόπτων, που παρέχεται από τους νόμους πράξης που ορίζονται στη Σχέση 1.2. Τυπικά, θα χρησιμοποιήσουμε εκφράσεις όπως $up(s_1)$ μετά [toggle(s_1)] για να δηλώσουμε αυτό που λέμε *παρατηρήσεις*. Ένα σενάριο μπορεί τότε να τυποποιηθεί σαν συλλογή παρατηρήσεων και αντλώντας τα σωστά συμπεράσματα ισοδυναμεί με την απόφαση για το ποιες παρατηρήσεις προκύπτουν από τις δοσμένες. π.χ. $\neg up(s_1)$ μετά από [ ] θα μπορούσε να είναι ένα τέτοιο συμπέρασμα.

Οι παρατηρήσεις μπορεί είναι πιο πολύπλοκες από τα δυο παραδείγματα που μόλις αναφέρθηκαν. Για παράδειγμα, $up(s_1) \equiv up(s_2)$ μετά το [ ] λέει ότι και οι δυο διακόπτες είναι στην ίδια θέση – αν και δεν είναι γνωστό ποια θέση μοιράζονται. Ένα λογικό συμπέρασμα θα ήταν, να λέγαμε, $\neg(up(s_1) \equiv up(s_2))$ μετά [toggle (s_2)], δηλαδή μεταπίπτοντας τον δεύτερο διακόπτη καταλήγει στο να είναι και οι δυο διακόπτες σε διαφορετικές θέσεις. Άλλη παραλλαγή είναι να γίνουν υποθετικές ερωτήσεις όπως οι ακόλουθες. Ας υποθέσουμε ότι μεταπίπτοντας το s_1 θα κατεβεί αυτός ο διακόπτης κάτω. Τότε, τι προκύπτει σε ότι αφορά το αποτέλεσμα της μετάπτωσης και του s_1 και του s_2; Προφανώς, οι υποθέσεις συνεπάγονται ότι αρχικά ο s_1 είναι πάνω και (άρα) ο s_2 είναι κάτω. Από αυτό, συμπεραίνουμε ότι η σωστή απάντηση στην ερώτηση είναι ότι ο διακόπτης s_1 είναι κάτω και ο διακόπτης s_2 είναι πάνω. Πιο τυπικά, λέμε ότι οι δυο παρατηρήσεις:

$$\forall x.up(x) \vee \forall x.\neg up(x) \text{ μετά [toggle } (s_2)]$$

$$\neg up(s_1)\,\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}[toggle(s_1)]$$

Σχέση 1.3

συνεπάγονται την παρατήρηση $\neg up(s_1) \wedge up(s_2)\,\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}[toggle(s_1), toggle(s_2)]$. Ξανά για να επαναλάβουμε το προφανές, το συμπέρασμα βασίζεται στο σωστό ορισμό των νόμων πράξης. Στο υπόλοιπο του κομματιού αυτού, δείχνουμε πως συμπεράσματα τέτοιου είδους αποκομίζονται σε τυπική βάση. Για το σκοπό αυτό, χρειαζόμαστε πρώτα ένα ακριβή ορισμό των παρατηρήσεων. Αυτός με τη σειρά του απαιτεί την τυπική άποψη της επονομαζόμενης φόρμουλας εύρους όπως $\neg(up(s_1) \equiv up(s_2)) or \forall x.\neg up(x)$.

<u>Ορισμός 1.2.4:</u> *Δίνονται σύνολα οντοτήτων, ονόματα ευρών και μεταβλητών, σύνολο ευρών τύπων ορίζονται επαγωγικά ως ακολούθως: κάθε έκφραση εύρους και Τ (ταυτολογία)* $\perp(\alpha\nu\tau\acute{\iota}\theta\varepsilon\sigma\eta)$ *είναι τύποι εύρους και αν τα εύρη τύποι* *είναι F και G τότε είναι και* $\neg F, F \wedge G, F \vee G, F \supset G, F \equiv G, \exists x.F, \forall x.F$ *(όπου x είναι μεταβλητή). Ένας κλειστός τύπος είναι τύπος εύρους χωρίς ελεύθερες μεταβλητές, δηλαδή όπου οι μεταβλητές συμβαίνουν μόνο στη σκοπιά κάποιου ποσοτικοποιητή που χρησιμοποιεί αυτή τη μεταβλητή.*

Ορισμός 1.2.5: *Έστω E,F A ένα σύνολο οντοτήτων, ονόματα ευρών και ονόματα πράξης αντίστοιχα. Μια παρατήρηση είναι του τύπου:*

F μετά $[a_1(\bar{e}_1), \ldots, a_n(\bar{e}_n)]$

όπου F είναι μια κλειστή φόρμουλα εύρους και κάθε ένα από $a_1(\bar{e}_1), \ldots, a_n(\bar{e}_n)$ *είναι μια πράξη* $(n \geq 0)$.

Ορισμός 1.2.6: *Ένα βασικό σενάριο πράξης είναι ένα ζευγάρι* (O, D) *όπου* D *είναι μια βασικό πεδίο ορισμού πράξης και* O *είναι ένα σύνολο παρατηρήσεων (βασισμένο στις οντότητες και ονόματα ευρών και πράξης στο* D*).*

Προτού καθορίσουμε ποια συμπεράσματα επιτρέπει ένα σενάριο πράξης, πρέπει να ξεκαθαρίσουμε κάτω από ποιες συνθήκες, μια συγκεκριμένη παρατήρηση μπορεί να ειπωθεί ότι είναι αληθής. Αυτό προφανώς εξαρτάται από την κατάσταση που προκύπτει υποθετικά από την εκτέλεση της συγκεκριμένης διαδοχής πράξης. Αν αυτή η κατάσταση είναι καθορισμένη, τότε είναι εύκολο να αποφασιστεί το αν ισχύει ο ίδιος ο τύπος εύρους, ακολουθώντας την τυπική ερμηνεία των λογικών συνδετικών.

Ορισμός 1.2.7: *Έστω E και F ότι είναι σύνολα οντοτήτων και ονόματα ευρών αντίστοιχα και έστω ότι το S είναι κατάσταση. Η έννοια του κλειστού τύπου ορίζεται ότι είναι αληθής (αντίθετα ψευδής) στο S επαγωγικά ως ακολούθως:*

- T είναι αληθές και το $\perp$ είναι ψευδές στο S;
- ένα λεκτικό εύρος ℓ είναι αληθές στο S αν και μόνο αν $\ell \in S$
- $\neg F$ είναι αληθές στο S αν και μόνο αν F είναι ψευδές στο S;
- F$\wedge$G είναι αληθές στο S αν και μόνο αν F και G είναι αληθή στο S;
- F$\vee$ G είναι αληθή στο S αν και μόνο αν είτε F ή G είναι αληθή στο S (ή και τα δυο);
- F$\supset$G είναι αληθές στο S αν και μόνο αν F είναι ψευδές στο S ή G είναι αληθές στο S (ή και τα δυο);

- F $\equiv$ G είναι αληθές στο S αν και μόνο αν F και G είναι αληθή στο S, είτε το F και το G είναι ψευδή στο S;
- $\exists x$ .F είναι αληθές στο S αν και μόνο αν υπάρχει κάποιο e $\in$ E όπως το F $\{x \mapsto e\}$ είναι αληθές στο S;
- $\forall x.F$ είναι αληθές στο S αν και μόνο αν για κάθε $e \in \varepsilon$, F $\{x \mapsto e\}$ είναι αληθές στο S.

Εδώ το F $\{x \mapsto e\}$ δηλώνει το τύπο εύρους που καταλήγει στην αντικατάσταση του F σε όλα τα ελεύθερα περιστατικά της μεταβλητής x με την οντότητα e.

Ως παράδειγμα θεωρείται ο τύπος $\exists x.\neg up(x) \supset \neg light$, που είναι αληθής στην κατάσταση $\{\neg up\ (s_1), up(s_2), \neg light\}$ (όπου το $\neg light$ είναι αληθές) και επίσης $\{up(s_1), up(s_2), light\}$ (αφού $\exists x.\neg up(x)$ είναι ψευδές), αλλά ο τύπος είναι ψευδής στο π.χ. $\{up(s_1), \neg up(s_2), light\}$.

Όπως φάνηκε, οι παρατηρήσεις που περιγράφουν ένα σενάριο συνήθως παρέχουν μόνο ατελείς πληροφορίες σε ότι αφορά ολόκληρη την κατάσταση των υποθέσεων. Αυτό είναι αληθές ειδικά όταν έχουμε να κάνουμε με μη-ντετερμινιστικές πράξεις, επειδή τότε οι ολοκληρωμένες πληροφορίες σημαίνουν την γνώση του πραγματικού αποτελέσματος κάθε πιθανής διαδοχής μη –ντετερμινιστικών πράξεων. Επομένως, η φυσιολογική περίπτωση είναι ότι υπάρχει περισσότερο από μία μοναδική κατάσταση υποθέσεων που ταιριάζει σε μια περιγραφή σεναρίου. Ακολουθώντας μια τυπική ορολογία στη λογική, καλούμε οποιαδήποτε πιθανή κατάσταση υποθέσεων ως μια ερμηνεία, και αν η τελευταία ταιριάζει στο σενάριο περιγραφής καλείται ως μοντέλο.

Έχουμε ήδη δει παραδείγματα που αφορούν την αιτιολόγηση των υποθετικών αναπτύξεων του κόσμου. Μια ερμηνεία λοιπόν, δεν πρέπει να μας λέει μόνο τι συμβαίνει κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης μιας ειδικής διαδοχής πράξεων. Αντιθέτως, πρέπει να παρέχει την πληροφορία για κάθε πιθανή πορεία των γεγονότων. Φυσικά υποθέτουμε ότι ο κόσμος πάντα εξελίσσεται σύμφωνα με τους θεμελιώδεις νόμους πράξεων. Αυτό σημαίνει ότι κάθε φορά που κάποια κατάσταση S απορρέει από την τέλεση κάποιας διαδοχής πράξης και εκτελείται κάποια περαιτέρω πράξη a, τότε το αποτέλεσμα θα έπρεπε να είναι ένας διάδοχος του S και a.

<u>Ορισμός 1.2.8:</u> *Έστω (O,D) ότι είναι βασικό σενάριο πράξης. Μια ερμηνεία για το (O,D) είναι ένα ζευγάρι (*$\Sigma, \mathrm{Re}\, s)$ *όπου Σ είναι το μοντέλο μετάβασης του D και το Res είναι μια μερική λειτουργία που χαρτογραφεί πεπερασμένες (πιθανώς κενές) διαδοχές δράσεις σε καταστάσεις και το οποίο ικανοποιεί τα ακόλουθα:*

1. Res ([ ]) ορίζεται.
2. Για κάθε διαδοχή α^*=$[a_{1,} \ldots, a_{k-1,} a_k]$ των πράξεων (k $\succ 0)$,

a) Res (a^*) ορίζεται αν και μόνο αν Res $([a_1, \ldots, a_{k-1}])$ ορίζεται και $\sum(\mathrm{Re}\, s([a_1, \ldots, a_{k-1}]), a_k)$ δεν είναι άδεια και

b) Res $(a^*) \in$ Σ(Res($[a_1, \ldots, a_{k-1}]), a_k$).

Το δεύτερο στοιχείο της ερμηνείας ίσως απεικονίστηκε σαν δέντρο (άπειρου βάθους) του οποίου η ρίζα κόμβος περιέχει την αρχική κατάσταση, Res ([ ]) και καθένα από τα κλαδιά του οποίου, χαρακτηρίζει την υποθετική εξέλιξη του κόσμου κάτω από μια συγκεκριμένη διαδοχή πράξεων.

Οι ερμηνείες πάντα περιγράφουν το ακριβές αποτέλεσμα της εκτέλεσης κάθε πιθανής διαδοχής πράξης. Είναι επομένως απλό να καθοριστεί αν μια παρατήρηση είναι αληθής σε σχέση με μια συγκεκριμένη ερμηνεία: πρώτα απ' όλα μπορεί να είναι αληθές μόνο αν η κατάσταση ορίζεται, που απορρέει από την εκτέλεση της διαδοχής των εν λόγω πράξεων. Αν επιπλέον, ο εν λόγω τύπος εύρους, είναι αληθής σε αυτή την κατάσταση τότε η ίδια η παρατήρηση είναι αληθής.

<u>Ορισμός 1.2.9:</u> *Έστω (Σ,Res) ότι είναι μια ερμηνεία για ένα βασικό σενάριο πράξης (O,D). Μια παρατήρηση F μετά από [*$a_1, \ldots, a_n](n \geq 0)$ *είναι αληθής στο Res αν και μόνο αν Res ([a*$_1, \cdots$, $a_n])$ *ορίζεται και το F είναι αληθές στο Res ([a*$_1, \cdots$, $a_n])$.

Επαληθεύεται εύκολα ότι οι δυο παρατηρήσεις από πάνω είναι αληθείς στην ερμηνεία αλλά όχι στην παρατήρηση $up(s_1)$ μετά [μετάπτωση(s_1), $\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\beta\alpha\sigma\eta$ ένα πάνω], ούτε στην παρατήρηση $\neg$φως μετά [μετάπτωση $(s_2), αλλαγήέναπάνω$]., επειδή το αποτέλεσμα της τελευταίας διαδοχής πράξης δεν καθορίζεται.

Ανάμεσα στις άλλες πιθανές ερμηνείες για το βασικό πεδίο ορισμού πράξης, μας ενδιαφέρουν ιδιαίτερα αυτές που ικανοποιούν όλες τις παρατηρήσεις ενός συγκεκριμένου σεναρίου. Όπως φάνηκε, αυτά καλούνται μοντέλα σεναρίου. Τα μοντέλα μας βοηθούν να ορίσουμε τι μπορεί να εξαχθεί από μια περιγραφή σεναρίου, δηλαδή κάθε παρατήρηση που είναι αληθής σε όλα τα μοντέλα της περιοχής.

<u>Ορισμός 1.2.10:</u> *Έστω (O,D) ότι είναι βασικό σενάριο πράξης. Ένα μοντέλο τέτοιου σεναρίου είναι μια ερμηνεία (Σ,Res) όπως ότι κάθε o$\in$ O είναι αληθές στο Res. Μια παρατήρηση o συνεπάγεται, γραμμένη O $|=^{DO}$ αν και μόνο αν o ότι είναι αληθής σε όλα τα μοντέλα των (O,D).*

Αυτό ολοκληρώνει την εισαγωγή στη βασική μας θεωρία πράξης. Τώρα έχουμε βάλει μαζί όλες τις απαραίτητες επίσημες έννοιες, ας δώσουμε μια ολοκληρωμένη τυπολατρική ερμηνεία του τρέχοντος παραδείγματος. Παρακάτω και από τώρα προς τα εμπρός με το ξ^k δηλώνουμε ότι το ξ είναι τάξης k.

Παράδειγμα 1.2.1: *Έστω $\varepsilon = \{s_1, s_2\}$ ότι είναι ένα σύνολο οντοτήτων $F = \{up^1, light^0\}$ να είναι το σύνολο ονομάτων ευρών και A{ $μετάπτωση^1, αλλαγήέναπάνω^0$} να είναι το σύνολο των ονομάτων πράξης.* Επιπλέον έστω L αποτελείται από τους νόμους πράξης:

Μετάπτωση(x) μετατρέπει το {up(x)}σε $\{\neg up(x)\}$

Μετάπτωση(x) μετατρέπει το$\{\neg up(x)\}$σε {up (x)}

Αλλαγή προς τα πάνω μετατρέπει το $\{\neg up(s_1)\}$σε $\{up(s_1)\}$

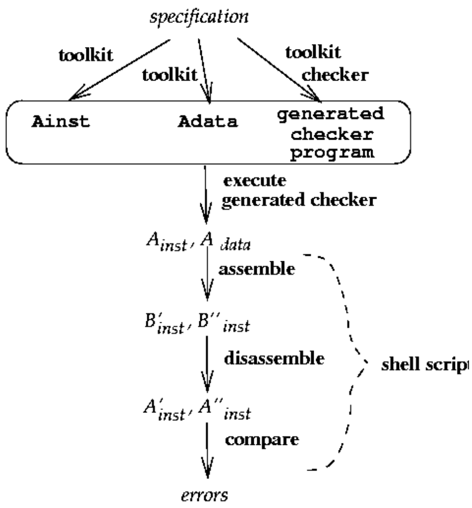
Αλλαγή προς τα πάνω μετατρέπει το $\{\neg up(s_2)\}$ σε $\{up(s_2)\}$

Μετά το D=(E, F, A, L) συνιστά μια πεδίο ορισμού πράξης. Έστω ότι O αποτελείται από τις παρατηρήσεις:

$\forall x.up(x) \vee \forall x.\neg up(x)$ μετά[μετάπτωση(s_2)]

$\neg up(s_1)$ μετά [μετάπτωση (s_1)]

Τότε το (O,D)είναι ένα σενάριο πράξης. Κάθε μοντέλο (Σ,Res) ικανοποιεί ένα από



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

ή

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

Και στις δυο καταστάσεις που καταλήγουν τα $\neg up(s_1)$ και $up(s_2)$ παραμένουν. Επομένως, κρατάμε

O $|=_D$ $\neg up(s_1) \wedge up(s_2)$ μετά [μετάπτωση (s_1), μετάπτωση (s_2)].

Η ομολογουμένως απλή θεωρία πράξης που καταλήξαμε περιέχει όλα τα βασικά που ζητήθηκαν στην αρχή: η θεωρία παρέχει μια γλώσσα για τυποποίηση και τα γενικά πεδία ορισμού πράξης και συγκεκριμένα σενάρια. Επίσης, περιλαμβάνει μια σχέση συνεπαγωγής που μας λέει ακριβώς τι μπορεί να εξαχθεί από την περιγραφή σεναρίου. Η θεωρία μας ικανοποιεί την πιο βασική απαίτηση επάρκειας, δηλαδή, οι κανόνες πράξης επικεντρώνονται στο μέρος του κόσμου που επηρεάζεται όταν εκτελείται η πράξη. Από την άλλη πλευρά, η βασική θεωρία δίνει δυο πολύ δυνατές υποθέσεις. Πρώτα, απαιτεί οποιοσδήποτε κανόνας πράξης να περιέχει ολόκληρη την επίδραση της πράξης που περιγράφει, δηλαδή όχι μόνο τις άμεσες αλλά επίσης τις πιθανές έμμεσες επιδράσεις. Αυτή είναι μια συνέπεια της υπόθεσης ότι κανένα εύρος δεν αλλάζει αν δεν αναφέρεται σε ένα νόμο πράξης. Δεύτερον, η θεωρία βεβαιώνει ότι μια πράξη εγγυάται να πετύχει με μιας όλες τις ειδικές συνθήκες που είναι αληθείς σε μια κατάσταση. Και οι δυο υποθέσεις, η ανεπάρκεια τους, και μια πιο εκλεπτυσμένη θεωρία πράξης που ξεπερνά αυτές τις υποθέσεις είναι θέμα σε από τα επόμενα κεφάλαια.

2. Βιβλιογραφικές Σημειώσεις

Οι επίσημες θεωρίες πράξης δεν είχαν αναπτυχθεί μέχρι πρόσφατα. Η βασική ιδέα της τυποποίησης της λογικής για πράξεις και σχεδιασμό, είναι πολύ παλιότερη. Στην πραγματικότητα, η αυτοματοποίηση της ικανότητας της κοινής λογικής να δικαιολογήσει τις πράξεις και τις επιδράσεις της, ήταν ανάμεσα στα πρώτα θέματα που ηγέρθησαν στην έρευνα της τεχνητής νοημοσύνης. Έτσι η υποστήριξη ότι η πεποίθηση της έξυπνης συμπεριφοράς βασίζεται στην ικανότητα να διατηρηθεί ένα νοητικό μοντέλο του κόσμου έτσι ώστε να εξαχθούν τα σωστά συμπεράσματα για τις παρατηρήσεις και τις προθέσεις.

Η πρώτη επίσημη ιστορικά προσέγγιση στην αιτιολογία των πράξεων ήταν μια καθαρά πρώτης τάξης κωδικοποίηση κάποιων παραδειγμάτων πεδίων ορισμών πράξης και σεναρίων. Αυτή η κωδικοποίηση εισήγαγε το επονομαζόμενο παράδειγμα της Μαθηματικής Ανάλυσης Καταστάσεων που ικανοποιεί τη βασική απαίτηση για επάρκεια στις πράξεις που καθορίζονται από τις επιδράσεις τους. Έτσι, η Μαθηματική Ανάλυση Καταστάσεων επιφέρει το Πρόβλημα Πλαισίου, που δηλώνει το πρόβλημα και το πως αναπαριστάνεται λογικά, η γενική υπόθεση ότι κάθε μη-επηρεασμένο εύρος διατηρεί την αληθινή-αξία όταν εκτελείται μια πράξη και του πως δικαιολογείται αποδοτικά με αυτή την αναπαράσταση.

Ενώ οι τελευταίες κωδικοποιήσεις Καταστάσεων βασισμένες σε Αριθμητική Ανάλυση ήταν διαισθητικά αληθείς, οι λύσεις στο Πρόβλημα Πλαισίου που προτάθηκαν και μας απασχόλησαν σε αυτό το πλαίσιο, ήταν δυσκίνητες και μη αποδοτικές. Η περισσότερη από τη δουλειά που ακολουθεί στον τομέα αυτό ήταν αφοσιωμένη στην εύρεση καλύτερων λύσεων στο πρόβλημα. Είναι πέραν αμφιβολίας ότι έχει γίνει αρκετή πρόοδος υπό αυτό το πόρισμα, αλλά αποδείχθηκε ότι πληρώθηκε ένα αξιοσημείωτο τίμημα προς αυτό το σκοπό: τα αξιώματα σεναρίου πράξης φαίνεται να γίνονται τόσο λιγότερο αληθή όσο καλύτερα αντιμετωπίζουν το Πρόβλημα Πλαισίου. Κινούμενο από τον αυξανόμενο αριθμό τυποποίησης της πράξης που είναι λανθασμένος στο να επιτρέπει ακούσια και αντί-διαισθητικά συμπεράσματα, η αξιοπιστία των κωδικοποιήσεων της πράξης έγινε ένα μεγάλο πρόβλημα. Η μακράν πιο δημοφιλής περίπτωση είναι η πρόταση που χρησιμοποιεί μια ειδική έκταση στη κλασσική λογική πρώτου βαθμού, που απευθύνεται στο Πρόβλημα Πλαισίου. Ακολουθώντας την κοινή πρακτική, αυτή η προσέγγιση επικυρώθηκε μερικώς από το παράδειγμα. Σύντομα, ωστόσο ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αποκαλύφθηκε με τη βοήθεια ακόμα ενός απλού παραδείγματος που αντιμετωπίστηκε μέσω διαίσθησης.

Οι αυξανόμενες δυσκολίες με την εκτίμηση της ορθότητας της τυποποίησης της πράξης μόνο με τη διαίσθηση, οδήγησε στην επίγνωση ότι χρειάζονται μέθοδοι τυπικής επικύρωσης με σκοπό να εγγυηθούν την αξιοπιστία. Το πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση ήταν, η γενίκευση της διαισθητικά σωστής κωδικοποίησης ενός πεδίου ορισμού ενός παραδείγματος, έτσι ώστε μια ολόκληρη, καλώς ορισμένη τάξη των πεδίων ορισμού να καλυφτεί. Αυτή η γενίκευση συνοδεύτηκε από μια τυπική απόδειξη ότι η κωδικοποίηση κάθε τέτοιου πεδίου ορισμού θα αποδώσει τα ίδια αποτελέσματα που αποκομίσθηκαν στο παράδειγμα, άρα θα κληρονομήσουν τη διαισθητική ορθότητα. Αν και το αποτέλεσμα επαληθεύτηκε για μια περιορισμένη τάξη πεδίων ορισμού (συγκρινόμενη π.χ. με αυτό που εκφράζεται στη βασική μας θεωρία πράξης), αυτή ήταν η πρώτη φορά που μια πράξη τυποποίησης, υπόκειται σε τυπική απόδειξη της ορθότητας της.

Η πρώτη θεωρία πράξης που αξίζει αυτό το όνομα στο να είναι εντελώς ανεξάρτητη από κάποιο συγκεκριμένο αξίωμα είναι η Γλώσσα Περιγραφής Πράξης, που εν συντομία εκφράζεται ως A. Αυτή η τυποποίηση και η βασική μας θεωρία πράξης έχουν παρόμοια εκφραστικότητα εκτός από την A που περιορίζεται στα μηδενικά (π.χ. προτασιακά) εύρη και δεν υποστηρίζει μη ντετερμινιστικές πράξεις. Στην πραγματικότητα, πολλές από τις έννοιες και τα σύμβολα έχουν δανειστεί από την προηγούμενη προσέγγιση. Η Γλώσσα Περιγραφής Πράξης πρώτα απασχολήθηκε για να επιβεβαιώσει την κωδικοποίηση των πεδίων ορισμού πράξης βασισμένο στην Αριθμητική Ανάλυση Καταστάσεων και χρησιμοποιεί τα επονομαζόμενα εκτεταμένα λογικά προγράμματα. Αργότερα, η A απασχολήθηκε για την αξιολόγηση τυποποίησης πράξης όπως η Αριθμητική Ανάλυση Καταστάσεων βασισμένη σε απαγωγικά λογικά προγράμματα, η Αριθμητική Ανάλυση Καταστάσεων με τα επονομαζόμενα αξιώματα διαδοχής κατάστασης (1.2.10) και η Αριθμητική Ανάλυση Καταστάσεων με περιορισμό αντίστοιχα και αριθμητικό εύρος (1.2.9) βασισμένη στα επονομαζόμενα εξισωτικά λογικά προγράμματα, απλά για να αναφέρουμε μερικά. Κάθε ένα από αυτά τα αποτελέσματα επαληθεύει την ορθότητα της αντίστοιχης τυποποίησης πράξης αν εφαρμοστεί σε πεδία ορισμού εκφρασμένα στην A. Με σκοπό να αποκομίσουμε περισσότερα αποτελέσματα γενικής εκτίμησης, η αυθεντική Γλώσσα Περιγραφής Πράξης έχει εκταθεί σε διάφορες κατευθύνσεις ανάμεσα στις οποίες εμείς ξανά αναφέραμε μόλις μερικές. Η διάλεκτος Αc επιτρέπει να αναπαρασταθούν και να δικαιολογηθούν τις επιδράσεις των παράλληλα εκτελεσμένων πράξεων.

Οι μη-ντετερμινιστικές δράσεις υποστηρίζονται στο A_N και η γλώσσα Α$_{NCC}$ εκτείνει το τελευταίο και το συνδυάζει με το Αc. Επίσης στο AR, μη ντετερμινιστικές πράξεις μπορούν να τυποποιηθούν και επιπλέον περιλαμβάνει μια βασική λύση στο πρόβλημα των έμμεσων επιδράσεων των πράξεων. Η επέκταση L$_0$ υποστηρίζει ατελή ειδίκευση της διαδοχής πράξης που συμβαίνει στην πραγματικότητα σε ένα σενάριο. Η συγκέντρωση πληροφορίας για τις πράξεις μπορεί να αναπαρασταθεί στη γλώσσα Α$_k$. Η γλώσσα ε βασίζεται σε δομή γραμμικού χρόνου και επιτρέπει την αναπαράσταση αφήγησης των γεγονότων.

Η δεύτερη μεγαλύτερη τάξη των θεωριών πράξης έχει τις ρίζες της στη γλώσσα και στη σημασιολογία που αναπτύχθηκε στο [7]. Ένα διακριτικό στοιχείο του πλαισίου, το οποίο αποκαλείται κοινώς «Στοιχεία και Εύρη», είναι ότι επιτρέπει την αιτιολόγηση για τη διάρκεια των πράξεων. Μια λεπτομερής και καλά δουλεμένη ιεραρχία των υπο-τάξεων με περιορισμένη εκφραστικότητα επιτρέπει ακριβή αποτελέσματα εκτίμησης για τυπολατρίες διαφορετικών πράξεων. Πολύς σημαντικά αποτελέσματα αποτίμησης αναφέρθηκαν στο [9]. Διάφορες επεκτάσεις στο αυθεντικό πλαίσιο έχουν αναπτυχθεί π.χ. συνεργασία των πράξεων, πράξεις με έμμεσα αποτελέσματα και προσανατολισμός στο στόχο.

Μια πρώτη επίσημη σύγκριση μεταξύ Γλώσσας Περιγραφής Πράξης Α και «Στοιχεία και Εύρη» καθιερώθηκε στο [15] όπου και οι δυο θεωρίες απεδείχθησαν ισοδύναμες για μια συγκεκριμένη τάξη πεδίου ορισμού. Φυσικά υπάρχουν πολλές περισσότερες τυποποιήσεις που αξίζουν αδιαμφισβήτητα να λέγονται θεωρίες πράξης. Η Γλώσσα Περιγραφής Πράξης και το πλαίσιο «Στοιχεία και Εύρη», ωστόσο είναι τα μόνα που βρήκαν ευρύτερη διασπορά σε δυο εκτιμήσεις: απασχολήθηκαν για την επικύρωση της ποικιλίας της τυποποίησης πράξεων και χρησιμοποιήθηκαν ως ενιαία βάση για την αντιμετώπιση της ποικιλίας οντολογικών απόψεων. Στον βαθμό που αυτές και άλλες πολλές ειδικές θεωρίες απευθύνονται στα προβλήματα που μας αφορούν στα ακόλουθα κεφάλαια, θα περιγραφούν και θα συζητηθούν λεπτομερώς στη συνέχεια.

3. Το πρόβλημα της διακλάδωσης

3.1 Έμμεσες επιδράσεις των πράξεων

Ένα ανεκτίμητο πλεονέκτημα των νόμων πράξης είναι ότι επιτρέπουν την περιγραφή πράξεων μέσα από τις επιδράσεις τους παρά από ένα πίνακα εξαντλητικής μεταβατικής κατάστασης. Ωστόσο, η αποκλειστική χρήση των νόμων πράξης γίνεται γρήγορα δύσχρηστη σε πολύπλοκα πεδία ορισμού. Και αυτό γιατί οι νόμοι πράξης ως έχουν, είναι ολοκληρωμένοι στο ότι καθορίζουν την ολοκληρωμένη επίδραση της πράξης. Όμως, αν και υπάρχουν καλοί λόγοι για να υποθέσουμε ότι μια πράξη προκαλεί μόνο ένα μικρό αριθμό άμεσων αλλαγών, αυτές με τη σειρά τους μπορεί να ξεκινήσουν μια μακριά αλυσίδα έμμεσων επιδράσεων. Ξαναθυμηθείτε την πράξη της μετάπτωσης ενός διακόπτη, που αρχικά, δεν προκαλεί τίποτα άλλο παρά μια αλλαγή στη θέση του διακόπτη. Ωστόσο, ο διακόπτης μπορεί να είναι μέρος ηλεκτρικού κυκλώματος έτσι ώστε, ας πούμε κάποια λυχνία φωτός είναι κλειστή σαν παρενέργεια, που με τη σειρά της μπορεί να προκαλέσει τον τραυματισμό κάποιου σε ένα ξαφνικά σκοτεινό δωμάτιο, αν πέσει πάνω σε μια καρέκλα και αυτή πέσει σε μια τηλεόραση, της οποίας η έκρηξη ενεργοποιεί το συναγερμό πυρός και ούτω καθεξής.

Ας εκθέσουμε το πρόβλημα πιο λεπτομερώς. Ας υποθέσουμε ότι εκτελούμε την πράξη της μετάπτωσης του διακόπτη στο απλό ηλεκτρικό κύκλωμα. Αρχικά, η πράξη δεν αλλάζει τίποτε άλλο παρά τη θέση του διακόπτη που άρα είναι η άμεση επίδραση. Προφανώς ωστόσο, ένα πλέον κλειστό κύκλωμα σημαίνει ότι ανάβει το φως. Αυτή είναι μια έμμεση επίδραση της πράξης μας. Αυτή η επιπρόσθετη επίδραση είναι συνέπεια της γενικής σχέσης μεταξύ της θέσης του διακόπτη και της κατάστασης της λυχνίας δηλαδή, το φως είναι αναμμένο αν και μόνο αν ο διακόπτης είναι στην επάνω θέση. Αυτή η σχέση περιγράφεται τυπικά από το τύπο εύρους $light \equiv up(s_1)$. Οι φόρμουλες εύρους αυτού του είδους, που υποτίθεται ότι είναι αληθείς σε κάθε κατάσταση καλούνται περιορισμοί κατάστασης. Οι καταστάσεις που ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς του πεδίου ορισμού θα λέγονται αποδεκτές.

Οι περιορισμοί κατάστασης, όπως έχουμε δει, είναι η αφορμή για επιπρόσθετες επιδράσεις αν παραβιαστούν μετά τις άμεσες επιδράσεις της πράξης που έχει θεωρηθεί. Οι πράξεις που έχουν έμμεσες επιπτώσεις αντίκειται στη γενική υπόθεση ότι τίποτα δεν αλλάζει εκτός από αυτό που αναφέρεται στο νόμο πράξης. Αυτό μπορεί εύκολα να φανεί με το παράδειγμα κυκλώματος: έστω $S = \{\neg up(s_1), \neg light\}$ ότι είναι η τρέχουσα κατάσταση όπως εκτελώντας μια πράξη μετάπτωσης (s_1) στο S παράγει την κατάσταση S' ={up(s_1), $\neg light\}$ που ακολουθεί τους γνωστούς νόμους πράξης (Σχέση 1.2) και σύμφωνα με τον ορισμό του πως τους εφαρμόζει. Αυτή δεν είναι η αναμενόμενη διαδοχή κατάστασης όπως είναι εμφανές από την παραβίαση του βασικού περιορισμού της κατάστασης light$\equiv$up(s_1). Ορίζουμε ως «προκαταρκτικές» καταστάσεις σαν S'. Το γεγονός ότι συχνά δεν επαρκεί να υπολογίσει κανείς μέσω της εφαρμογής των νόμων πράξης τις απλές άμεσες επιδράσεις, καλείται Πρόβλημα Διακλάδωσης.

Η απλή «λύση» στο πρόβλημα διακλάδωσης είναι να το παρακάμψουμε. Δηλαδή, κάποιος θα μπορούσε να παραμείνει στην υπόθεση ότι οι κανόνες πράξης είναι ολοκληρωμένοι στον καθορισμό ολόκληρης της επίδρασης. Για το σκοπό αυτό, όλες οι έμμεσες επιδράσεις πρέπει κάπως να συλλεχθούν σε νόμους πράξης. Αυτή η διαδικασία ωστόσο, γεννά δυο μεγάλα προβλήματα που απεικονίζουν την ανεπάρκεια αυτής της λύσης. Πρώτα, απαιτείται ίσως ένας τεράστιος αριθμός νόμων πράξης για να εξηγήσει κάθε πιθανό συνδυασμό των έμμεσων επιδράσεων. Για να δούμε το γιατί, θεωρείστε ένα μοντέλο ηλεκτρικού κυκλώματος όπου ένας συγκεκριμένος διακόπτης εμπλέκεται σε n υπό-κυκλώματα καθένα από τα οποία περιέχει πρόσθετα ένα ζευγάρι διακόπτη-λυχνία. Ορίζοντας όλες τις επιδράσεις της μετάπτωσης του ξεχωριστού διακόπτη μόνο από τα μέσα των νόμων πράξης τότε απαιτούνται 2^{n+1} διαφορετικοί νόμοι, ένας για κάθε πιθανό συνδυασμό των αληθινών-τιμών που προσδιορίζει το διακόπτη που λειτουργεί και τους άλλους διακόπτες n. Ένα αυθαίρετο παράδειγμα είναι το ακόλουθο:

μετάπτωση (s_0) μετασχηματίζει $\begin{array}{l}\{\neg up(s_0), up(s_1), \neg light_1, \neg up(s_2), \neg light_2, \ldots\} \\ \sigma\varepsilon \{up(s_0), up(s_1), light_{1,} \neg up(s_2), \neg light_2, \ldots\}\end{array}$

Και οι άλλοι κανόνες είναι επίσης το ίδιο δύσκολοι όσο και αυτός. Αυτό είναι ξεκάθαρα μακράν από αυτό που θεωρούμε επαρκή ορισμό. Η πλήρης επάρκεια επιτυγχάνεται μόνο αν ο αυθεντικός, απλός ορισμός (1.2.1) της πράξης μετάπτωσης (x) επίσης εφαρμόζει σε διακόπτη s_0 στο πιο πολύπλοκο πεδίο ορισμού και αν η κατάσταση περιορισμών n $light_i \equiv up(s_0) \wedge up(s_i)$ κάνει τα υπόλοιπα. Λάβετε υπόψη ότι το μέγεθος του ορισμού είναι γραμμικά αντίθετο με τον εκθετικό αριθμό των νόμων πράξης.

Το δεύτερο πρόβλημα με τους εξαντλητικούς νόμους πράξης που περιέχουν την ολοκληρωμένη επίδραση, είναι ότι η εισαγωγή του νέου περιορισμού της κατάστασης ίσως απαιτεί στη χειρότερη περίπτωση, την επανεξέταση ολόκληρου του συνόλου νόμων πράξης που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως. Απλά υποθέστε ακόμα ένα ζευγάρι διακόπτη-λάμπας $up(s_{n+1}), light_{n+1}$ να προστίθεται στο κύκλωμα. Τότε όλοι οι προηγούμενα προσεκτικά σχεδιασμένοι κανόνες πράξης για τη μετάπτωση (s_0) - και θυμηθείτε τον εκθετικό τους αριθμό – θα χρειάζονται αναθεώρηση.

Έτσι φαίνεται ότι πρέπει να σκεφτούμε πραγματικές λύσεις στο πρόβλημα διακλάδωσης.

3.2 Ελαχιστοποιώντας την αλλαγή

Έχουμε δει ότι το βασικό θέμα του προβλήματος διακλάδωσης είναι να επιλυθεί η σύγκρουση ανάμεσα της πιθανότητας έμμεσων επιδράσεων και του αξιώματος της επιμονής π.χ. ότι ένα εύρος δεν αλλάζει αν δεν δηλωθεί ρητά στον αντίστοιχο νόμο πράξης. Η πρόκληση επομένως, είναι να βρεθεί η πιο αδύναμη έκδοση του αξιώματος. Η γενική δυσκολία με αυτό, είναι ότι πρέπει κανείς να εκτελέσει κάποιου είδους περπάτημα σε τεντωμένο σκοινί. Από τη μια πλευρά, η ακριβής επιμονή των μη επηρεασμένων ευρών ακόμα απαιτείται. Από την άλλη πλευρά, πρέπει να ερμηνευτούν οι αυθαιρέτως περίπλοκες αλυσίδες έμμεσων επιδράσεων.

Ας κάνουμε ένα βήμα εμπρός πάνω στο τεντωμένο σκοινί. Οι έμμεσες επιδράσεις είναι για τη θεώρηση ότι η εφαρμογή του νόμου πράξης καταλήγει στην κατάσταση που παραβιάζει ένα ή περισσότερους περιορισμούς καταστάσεων. Προφανώς, τέτοια κατάσταση ερμηνεύει τέλεια την επιμονή - αλλά καθόλου τις έμμεσες επιδράσεις. Από την άλλη πλευρά, λάβετε υπόψη ότι η κατάσταση διαδοχής που ψάχνουμε, δηλαδή αυτή που εξηγεί όλες τις έμμεσες επιδράσεις είναι προφανές ότι θα βρεθεί ανάμεσα σε αποδεκτές καταστάσεις π.χ. αυτές που ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς. Στη χειρότερη περίπτωση ωστόσο, μία αυθαίρετη από όλες αυτές τις καταστάσεις δεν εξηγεί καθόλου την επιμονή. Αλλά τώρα υποθέστε ότι συνδυάζουμε το ένα άκρο με το άλλο. Δηλαδή, επιλέγουμε ανάμεσα σε όλες τις αποδεκτές καταστάσεις αυτή που μοιράζεται τα περισσότερα λεκτικά εύρη με την προκαταρκτική κατάσταση διαδοχής. Μετά, ερμηνεύουμε και τα δυο για έμμεσες επιδράσεις (αφού κανένας περιορισμός δεν παραβιάστηκε) και για επιμονή στην πιο μεγάλη πιθανή έκταση (αφού δεν έχουν αλλάξει τα εύρη από το απολύτως απαραίτητα ώστε να αποκομίσουν μια αποδεκτή κατάσταση). Με άλλα λόγια, και από μια εποικοδομητική προοπτική, η ιδέα είναι να πάρουμε την προκαταρκτική διαδοχή και να αλλάξουμε τις αληθινές - αξίες των λιγότερων πιο πιθανών ευρών - φυσικά χωρίς να αγγίξουμε μια από τις άμεσες επιδράσεις- μέχρι τα αποτελέσματα μιας κατάστασης να ικανοποιούν τους περιορισμούς της κατάστασης.

Για να δούμε πως δουλεύει αυτή η προσέγγιση, ας θυμηθούμε το κύκλωμα που περιγράφτηκε πιο πάνω. Έχουμε δει ότι μεταπίπτοντας το διακόπτη στην τρέχουσα κατάσταση δηλαδή $\{\neg up(s_1), \neg light\}$ αποδίδει τον προκαταρκτικό διάδοχο $S' = \{up(s_1), \neg light\}$, που παραβιάζει το βασικό περιορισμό της κατάστασης $light \equiv up(s_1)$. Η πλησιέστερη κατάσταση του S' στο να ικανοποιεί το τύπο και ακόμα να περιέχει την άμεση επίδραση $up(s_1)$ είναι $T = \{up(s_1), light\}$. Αυτή είναι πράγματι η προτεινόμενη και διαισθητικά αναμενόμενη κατάσταση διαδοχής: το φως ανάβει σαν μια έμμεση επίδραση του κλεισίματος του διακόπτη.

Η ακόλουθη επίσημη εξήγηση της προσέγγισης βασίζεται σε μια συγκριτική έννοια της απόστασης μεταξύ των καταστάσεων. Εισάγουμε την έννοια των διαδόχων ελαχιστοποίησης αλλαγών που λαμβάνονται σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή .

Ορισμός 3.2.1: *Έστω ότι το D είναι ένα βασικό πεδίο ορισμού, αν τα S, T, T', είναι καταστάσεις, τότε το T είναι πιο κοντά στο S από το T', γραμμένο $T \prec_s T'$, iff $T \setminus S \not\subset T' \setminus S$. Έστω C είναι ένα σύνολο περιορισμών καταστάσεων, το S είναι μια κατάσταση που είναι αποδεκτή (γραμμένη C) και a μια πράξη. Μία* *κατάσταση T είναι διάδοχος ελαχιστοποίησης αλλαγής του S και του a αν και μόνο αν ισχύουν τα ακόλουθα: υπάρχει μια προκαταρκτική διάδοχος S' του S και μια πράξη a λαμβανόμενη μέσω άμεσης επίδρασης E όπως:*

- $E \subseteq T$
- T είναι αποδεκτό και
- δεν υπάρχει $T' \prec_{s'} T$ όπως ότι $E \subseteq T'$ και το T' είναι αποδεκτό.

Η συνθήκη $T \setminus S \not\subset T' \setminus S$ για $T \prec_s T'$ δηλώνει ότι S και T διαφέρουν σε αυστηρά λιγότερο λεκτικά εύρη από S και T'. Ο ορισμός τότε λέει ότι ένας διάδοχος ελαχιστοποίησης αλλαγής είναι μια κατάσταση που περιέχει την άμεση επίδραση της εν λόγω πράξης, (όρος 1) που ικανοποιεί τους περιορισμούς της κατάστασης (όρος 2) και που είναι πιο κοντά σε ένα προκαταρκτικό διάδοχο S' κάνοντας το αυτό (όρος 3).

Παράδειγμα 3.2.1: *Έστω D το πεδίο ορισμού που αποτελεί την οντότητα s_1, ονόματα εύρους up^1 και light^0, όνομα πράξης μετάπτωση^1 και τους γνωστούς νόμους πράξης.*

Μετάπτωση(x) μετασχηματίζει$\{up(x)\}$σε $\{\neg up(x)\}$

Μετάπτωση(x) μετασχηματίζει$\{\neg\, up(x)\}$σε $\{up(x)\}$

Μαζί με την κατάσταση περιορισμού $C = \{light \equiv up(s_1)\}$, τυποποιεί το κύκλωμα μας της Σχέση 1.2.

Έστω ότι η τρέχουσα κατάσταση είναι αποδεκτή $\{\neg up(s_1), \neg light\}$. Η μόνη κατάσταση προκαταρκτικής διαδοχής του S και μετάπτωση (s_1) είναι $S' = \{up(s_1), \neg light\}$, που αποκομίζει μέσω της άμεσης επίδρασης $E = \{up(s_1)\}$. Ούσα η μόνη υποψήφια, αυτή η κατάσταση είναι φυσικά η μόνη πιο κοντά στο S' άρα είναι η μοναδική διάδοχος ελαχιστοποίησης όταν εκτελείται μετάπτωση (s$_1$) στην κατάσταση$\{\neg up(s_1), \neg light\}$.

Η πρώτη μας προσέγγιση στο πρόβλημα διακλάδωσης πήγε καλά με το παράδειγμα μας με μικρό πεδίου ορισμού. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να επαληθεύσει, για παράδειγμα, ότι αν στη κατάσταση διαδοχής που αποκομίσθηκε από πάνω μεταπίπταμε το διακόπτη ξανά, τότε όχι μόνο παίρνει την αρχική του θέση αλλά και το φως είναι σβηστό στο να καταλήξει διάδοχο ελαχιστοποίησης αλλαγής. Ή ας υποθέσουμε ότι στη τρέχουσα κατάσταση εκτελούμε μια πράξη μη καθοριστική με αποτέλεσμα ο διακόπτης μπορεί ή όχι να μείνει κλειστός, τότε υπάρχουν δυο καταστάσεις διαδόχου ελαχιστοποίησης αλλαγής: είτε ο διακόπτης είναι πάνω και το φως είναι αναμμένο είτε η θέση του διακόπτη δεν έχει αλλάξει και το φως παραμένει κλειστό.

Για μια γενική εκτίμηση της προσέγγισης της ελαχιστοποίησης αλλαγής, αυτή η παρουσίαση είναι κρίσιμη: όλα τα εύρη του περιορισμού της κατάστασης που δεν είναι ανάμεσα στις άμεσες επιδράσεις έχουν ίσο δικαίωμα να αλλάξουν την τιμή τους στην περίπτωση που παραβιαστεί ο περιορισμός από κοντά στον προκαταρκτικό διάδοχο. Αυτό φαίνεται να μην είναι πρόβλημα αρκεί να αναμειχθούν μόνο δυο εύρη σε ένα περιορισμό, ένας από τους οποίους πρέπει να έχει αλλάξει έτσι ώστε να παραβιαστεί αυτός ο περιορισμός. Όσο πιο σύντομα μια κατάσταση περιορισμού σχετίζει τρία ή περισσότερα εύρη , ωστόσο, μπορεί να είναι λανθασμένη ώστε να θεωρήσει πιθανών ίσες όλες τις προσαρμογές κατάστασης που διορθώνουν μια παραβίαση. Για να το επεξηγήσουμε αυτό, εμπλουτίζουμε το ηλεκτρικό κύκλωμα με ένα δεύτερο διακόπτη. Αυτή η αθώα με πρώτη ματιά αλλαγή έχει μια εκπληκτική επίδραση στην εφαρμογή της πρώτης μας προσέγγισης στο πρόβλημα διακλάδωσης.

Παράδειγμα 3.2.2: *Έστω D το πεδίο ορισμού που αποτελείται από τις οντότητες s*^{1} *και s_2 τα ονόματα ευρών up^1 και light*^{0} *το όνομα πράξης μετάπτωση*^{1} *και τους ακόλουθους νόμους πράξης.*

μετάπτωση (x) μετασχηματίζει $\{up(x)\}$ σε $\{\neg up(x)\}$

μετάπτωση (x) μετασχηματίζει $\{\neg up(x)\}$ σε $\{up(x)\}$

Καθώς οι δυο διακόπτες και η λυχνία λάμπας είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, εισάγουμε την κατάσταση περιορισμού light $\equiv up(s_1) \wedge up(s_2)$.

Έστω ότι η τρέχουσα κατάσταση είναι αποδεκτή $\{\neg up(s_1), up(s_2), \neg light\}$. Τώρα ας υποθέσουμε τη μετάπτωση (s_1) να εκτελείται μέσα στην κατάσταση, τότε ο μοναδικός προκαταρκτικός διάδοχος είναι $S' = \{up(s_1), up(s_2), \neg light\}$ που προκύπτει από την άμεση επίδραση $E = \{up(s_1)\}$. Αυτή η κατάσταση παραβιάζει την κατάσταση περιορισμού. Υπάρχουν δυο αποδεκτές καταστάσεις που περιέχουν το E, δηλαδή $T_1 = \{up(s_1), up(s_2), light\}$ και $T_2 = \{up(s_1), \neg up(s_2), \neg light\}$. Σε ότι αφορά την αντίστοιχη απόσταση στο S', παρατηρούμε ότι $T_1 \setminus S' = \{light\}$ και $T_2 \setminus S' = \{\neg up(s_2)\}$. Επομένως, ούτε $T_1 \prec_{s'} T_2$ ούτε $T_2 \prec_{s'} T_1$. Συνεπώς, και το T_1 και το T_2 είναι διάδοχοι ελαχιστοποίησης αλλαγής.

Έτσι, αντί να προβούμε στο προφανές συμπέρασμα ότι το φως πρέπει να ανάψει σαν παρενέργεια της μετάπτωσης s_1, μια ισοδύναμα πιθανή πορεία γεγονότων προτείνεται , δηλαδή ότι ο διακόπτης s_2 αφήνει τη θέση του και το φως παραμένει κλειστό.

Ποιος είναι ο λόγος για το απρόβλεπτο αποτέλεσμα; Μια πιο προσεκτική εξέταση της βασικής κατάστασης περιορισμού το αποκαλύπτει. Από το $light \equiv up(s_1) \wedge up(s_2)$ μπορούμε να συμπεράνουμε αφαιρετικά ότι $up(s_1) \supset light \vee \neg up(s_2)$ αλλά όχι τη ισχυρότερη επίπτωση $up(s_1) \supset light$ (ούτε φυσικά $up(s_1) \supset \neg up(s_2)$). Με λόγια, ας υποθέσουμε ότι ξέρουμε ότι ο διακόπτης s_1 είναι στην πάνω θέση μετά συνεπάγεται ότι το φως είναι αναμμένο ή ο διακόπτης s_2 είναι κάτω. Δεν σημαίνει αναγκαστικά ότι το φως είναι αναμμένο. Επομένως, αν παραβιαστεί όντως ο περιορισμός της κατάστασης από το $up(s_1)$, ο απόλυτος διαχωρισμός $light \vee \neg up(s_2)$ πρέπει να ικανοποιηθεί. Προφανώς, αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε αλλάζοντας $\neg light$ σε $light$ ή ιδού αλλάζοντας $up(s_2)$ σε $\neg up(s_2)$. Ο σωστός περιορισμός της κατάστασης δεν επιτρέπει το διαχωρισμό μεταξύ των δυο πιθανοτήτων λαμβανόμενου υπόψη ότι προτιμάμε τον προηγούμενο όπως θα ήθελε κάποιος. Για αυτό προκύπτουν και οι δυο διαδοχικές καταστάσεις ελαχιστοποίησης αλλαγής.

Υπάρχει μια γενική αρχή πίσω από το πρόβλημα που συναντήσαμε με αυτό το παράδειγμα. Συχνά ένας απόλυτος περιορισμός της κατάστασης δεν περιέχει επαρκή πληροφόρηση για τις επιπτώσεις που αναμένεται να προκαλέσει. Από την πλευρά της λογικής, όλες οι αλλαγές εύρους που διορθώνουν μια παραβίαση περιορισμού είναι ίσες. Κάποιες από αυτές ωστόσο, ποτέ δεν θα συμβούν στην πραγματικότητα σαν έμμεση επίδραση. Συνεπώς, απαιτείται επιπρόσθετη γνώση του πεδίου ορισμού, που επιτρέπει το διαχωρισμό των αφαιρετικών συμπερασμάτων που ανταποκρίνονται στις πραγματικές επιπτώσεις από τις απόλυτες λογικές συνέπειες που στην πραγματικότητα δεν έχουν ισοδυναμία. Αυτή είναι μια πρόκληση πολύ γενικής φύσης που πρέπει να αντιμετωπίσουμε στα διάφορα μέρη του βιβλίου. Ο σκοπός μας, επομένως, είναι να προάγουμε μια λύση βάση της αρχής (που ακόμα δεν έχει βρεθεί) που να είναι τόσο καθολικά όσο το πρόβλημα που απευθύνεται.

3.3 Η κατηγοριοποίηση των ευρών

Στο τέλος του προηγούμενου τμήματος καταλήξαμε ότι γενικά ένας απόλυτος περιορισμός της κατάστασης είναι ανεπαρκής για μια σωστή αντιμετώπιση των έμμεσων επιδράσεων. Αυτό θίγει το θέμα της φύσης των πρόσθετα απαιτούμενων πληροφοριών. Σε σχέση με το παράδειγμα του πεδίου ορισμού, φυσικά θα ήταν επαρκές να προσθέσουμε την πολύ ειδικευμένη γνώση ότι «όταν κλείνουμε το διακόπτη, μια ενεργοποίηση της λυχνίας της λάμπας είναι πιθανό να συμβεί αντίθετα με τον άλλο διακόπτη που αλλάζει τη θέση». Ακόμα, ο σκοπός μας είναι να βρούμε ένα γενικό κριτήριο που βοηθά στο διαχωρισμό των σωστών έμμεσων επιδράσεων. Με άλλα λόγια, αναζητούμε την αιτία που μας κάνει να περιμένουμε να ανάψει το φως απ' ότι θα μετακινηθεί ο διακόπτης.

Πράγματι, μια βασική διαφορά μεταξύ της λυχνίας και του διακόπτη είναι αρκετά προφανής. Δηλαδή, η κατάσταση του διακόπτη μπορεί να επηρεαστεί μόνο από την άμεση λειτουργία. Η δική του κατάσταση είναι, υπό κάποια έννοια, ανεξάρτητη των τιμών των άλλων ευρών. Σε αντίθεση, δεν υπάρχει τρόπος ώστε να λειτουργήσει άμεσα η λυχνία φωτός. Αντίθετα, η κατάσταση της εξαρτάται εντελώς από τις τιμές των άλλων ευρών. Από αυτή την οπτική, δεν είναι έκπληξη ότι η μετάπτωση του διακόπτη έμμεσα ίσως επηρεάζει το φως αλλά όχι τον άλλο διακόπτη. Αυτή η παρατήρηση προτείνει την ακόλουθη εξέταση της πρώτης μας προσέγγισης στο πρόβλημα διακλάδωσης.

Για να παραχθούν μόνο οι αναμενόμενες έμμεσες επιδράσεις, τα εύρη του πεδίου ορισμού χωρίζονται σε δυο κατηγορίες. Μία από αυτές αποτελείται από τα εύρη που αναπαριστούν στοιχεία κατάστασης που χειραγωγούνται από άμεση λειτουργία. Η άλλη κατηγορία περιέχει όλα τα εύρη που αναπαριστούν στοιχεία κατάστασης που εξαρτώνται από άλλα στοιχεία. Ας ονομάσουμε κύρια εύρη αυτά της πρώτης κατηγορίας και δευτερεύοντα της δεύτερης. Το ποιο εύρος ανήκει σε ποια κατηγορία δεν μπορεί να διακριθεί φυσικά από την κατάσταση περιορισμών. Επομένως, η κατηγοριοποίηση πρέπει να δοθεί σαν μέρος της ειδίκευσης του πεδίου ορισμού. Στη βάση της πρόσθετης πληροφορίας, η διαδικασία της ελαχιστοποίηση αλλαγής προσφέρει μια επιλογή μεταξύ κύριου και δευτερεύοντος εύρους, τότε το πρώτο προτιμάται από το εναπομείναν αμετάβλητο - γι' αυτό το λόγο το τελευταίο προτιμάται να προσαρμόσει την έμμεση επίδραση.

Η τυποποίηση της προσέγγισης απαιτεί μια οριακή αλλαγή της έννοιας της ελαχιστοποίησης διαδοχικών αλλαγών (θυμηθείτε τον ορισμό 1.2.1). Δηλαδή, η έννοια της απόστασης θα σεβαστεί την προτίμηση της ελαχιστοποίησης αλλαγών των κύριων ευρών. Κατά τα άλλα ο ορισμός μας παραμένει αμετάβλητος.

<u>Ορισμός 3.3.1:</u> *Έστω ότι* $D=(E,F,A,L)$ *είναι ένα βασικό πεδίο ορισμού πράξης. Επιπλέον, έστω ότι* F_p *(κύρια εύρη) και* F_s *(δευτερογενή εύρη) να είναι τα σύνολα των ευρών όπως* $F_p \cap F_s = \{\}$ *και* $F_p \cup F_s$ *είναι το σύνολο όλων των ευρών που συντέθηκαν από ονόματα εύρων* F *και οντότητες* E*. Αν τα* S,T,T' *είναι καταστάσεις, τότε το* T *είναι πιο κοντά* S *από το* T' *γραμμένο ως* F_p,F_s *γραμμένο* $T \prec_s T' |_{F_p,F_s}$ *iff*

- $\| T \setminus S \| \cap F_p \not\subset \| T' \setminus S \| \cap F_p$ ή
- $\| T \setminus S \| \cap F_p = \| T' \setminus S \| \cap F_p$ και $\| T \setminus S \| \cap F_s \not\subset \| T' \setminus S \| \cap F_s$

Έστω ότι C είναι ένα σύνολο περιορισμών S μια κατάσταση που είναι αποδεκτή (γραμμένη C) και a μια πράξη. Η κατάσταση T κατηγοριοποιείται ως διάδοχος αλλαγής ελαχιστοποίησης του S , αν και μόνο αν ισχύουν τα ακόλουθα: υπάρχει μια προκαταρκτική διαδοχή S' του S και μια πράξη a διατηρείται μέσω άμεσης επίδρασης E ώστε:

- $E \subseteq T$
- T είναι αποδεκτό και
- δεν υπάρχει $T' \prec_{s'} T |_{F_p,F_s}$ όπως $E \subseteq T'$ και T' είναι αποδεκτό.

Με τη διορθωμένη έννοια της ομοιότητας των καταστάσεων πρώτα επικεντρωνόμαστε στα κύρια εύρη (όρος 1) όταν συγκρίνουμε αποστάσεις. Μόνο στην περίπτωση που οι αποστάσεις είναι ισοδύναμες με αυτή την έννοια, τα δευτερογενή εύρη γίνονται αποφασιστικός παράγοντας (όρος 2).

Παράδειγμα 3.3.1: *Έστω το πεδίο ορισμού* D *όπως στο Παράδειγμα 3.2.1. Υποθέτουμε ότι* $F_p = \{up(x) : x \in \{s_1, s_2\}\}$ *και* $F_s = \{light\}$ *ότι είναι η κατηγοριοποίηση εύρους του* D*. Όταν εκτελείται η* $\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\,(s_1)$ *στην αποδεκτή κατάσταση* $S = \{\neg up(s_1), up(s_2), \neg light\}$*, ο μοναδικός προκαταρκτικός διάδοχος είναι* $S' = \{up(s_1), up(s_2), \neg light\}$ *που καταλήγει μέσω άμεσης επίδρασης* $E = \{up(s_1)\}$ *όπως προηγούμενα. Υπάρχουν δυο αποδεκτές καταστάσεις που περιέχουν το* E*, δηλαδή το* $T_1 = \{up(s_1), up(s_2), light\}$ *και* $T_2 = \{up(s_1), \neg up(s_2), \neg light\}$*. Από το* $\| T_1 \setminus S' \| \cap F_p = \{light\} \cap F_p = \{\}$ *και από* $\| T_2 \setminus S' \| \cap F_p = \{up(s_2)\} \cap F_p = \{up(s_2)\}$ *συμπεραίνουμε ότι* $T_1 \prec_{S'} T_2 |_{F_p, F_s}$ *(αλλά όχι αντίθετα φυσικά). Επομένως* T_1 *είναι ο μοναδικός κατηγοριοποιημένος διάδοχος ελαχιστοποίησης αλλαγής του* $\{\neg up(s_1), up(s_2) \neg light\}$ *και* $\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\,(s_1)$.

Η διάκριση μεταξύ κύριων και δευτερευόντων ευρών επιτρέπει να οργανωθούν οι επιδράσεις «φαντάσματα» όποτε αποκτηθούν από την αλλαγή μιας γενικής ανεξάρτητης ιδιότητας, ενώ η αλλαγή μιας εξαρτημένης, θα επαρκούσε να ικανοποιήσει μια κατάσταση περιορισμού. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύγαμε για παράδειγμα, το συμπέρασμα ότι ο διακόπτης αφήνει μαγικά τη θέση του όπου ήταν επαρκής να ανάψει το φως. Από την άλλη πλευρά, είναι προφανές ότι η προσέγγιση αυτή στο πρόβλημα διακλάδωσης βασίζεται στην ύπαρξη κατάλληλης κατηγοριοποίησης για το πεδίο ορισμού. Το ακόλουθο παράδειγμα με νέο εκτεταμένο ηλεκτρικό κύκλωμα δείχνει ότι δεν είναι εγγυημένο.

Παράδειγμα 3.3.2: *Έστω ότι είναι το μοντέλο του πεδίου ορισμού* D *που αποτελείται από οντότητες* s_1, s_2, s_3*, ονόματα εύρους* $up^1, light^0 relay^0$*, όνομα πράξης μετάπτωση*[1] *και νόμους πράξης.*

$\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\,(x)$ μετασχηματίζει $\{up(x)\}$ σε $\{\neg up(x)\}$

$\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\,(x)$ μετασχηματίζει $\{\neg up(x)\}$ σε $\{up(x)\}$

Έστω C να είναι οι τρεις καταστάσεις περιορισμών:

$$light \equiv up(s_1) \wedge up(s_2)$$
$$relay \equiv \neg up(s_1) \wedge up(s_3)$$
$$relay \supset \neg up(s_2)$$

Σχέση 3. 1

Η τελευταία φόρμουλα δηλώνει ότι η ενεργοποιημένη καθυστέρηση ελκύει τον διακόπτη s_2. Έστω η τρέχουσα κατάσταση:

$S = \{\neg up(s_1), up(s_2) \neg up(s_3), \neg light, \neg relay\}$.

Τώρα για μια κατάλληλη εξήγηση πιθανών έμμεσων επιδράσεων της μετάπτωσης διακοπτών στο κύκλωμα, υποτίθεται ότι πρέπει να κατηγοριοποιήσουμε τα εύρη που εμπλέκονται. Αυτό είναι απλό στην περίπτωση του $up(s_1)$ και του $up(s_3)$ (που είναι κύρια) και *φως* και *ρελέ* (που είναι δευτερεύοντα). Είναι εύκολο να επαληθευτεί ότι οποιαδήποτε άλλη αλλαγή θα προκαλούσε άμεσα ανεπιθύμητες ενέργειες. Αλλά τι γίνεται με το δεύτερο διακόπτη, που αναπαριστάται από το $up(s_2)$; Από τη μια πλευρά, φυσικά τείνουμε να το θεωρήσουμε κύριο όπως πριν. Για το αν το s_1 έχει μεταπέσει στην τρέχουσα κατάσταση, τότε το s_2 υποτίθεται ότι δεν αλλάζει όπου το *φως* αναμένεται να το κάνει. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει λόγος που θεωρείται το s_2 δευτερεύον. Δηλαδή, αν κλείσουμε το διακόπτη s_3 στην τρέχουσα κατάσταση τότε το ρελέ ενεργοποιείται και γι' αυτό το λόγο αναμένεται να κάνει το διακόπτη s_2 να αφήσει τη θέση του. Η επίσημη εξέταση αποκαλύπτει ότι, αυτό δεν θα ήταν ο μόνος κατηγοριοποιημένος διάδοχος ελαχιστοποίησης αλλαγής στο σενάριο αυτό αν είχαμε $F_p = \{up(s_1), up(s_2) up(s_3)\}$ και $F_s = \{light, relay\}$. Ο μοναδικός προκαταρκτικός διάδοχος της κατάστασης S από *πάνω* και πράξη $\mathit{μετάπτωση}\,(s_3)$ είναι $S' = \{\neg up(s_1), up(s_2), up(s_3), \neg light, \neg relay\}$ που αποκτήθηκε μέσω της άμεσης επίδρασης $E = \{up(s_3)\}$. Υπάρχουν τρεις ακριβώς αποδεκτές καταστάσεις που περιέχουν E δηλαδή:

$$T_1 = \{\neg up(s_1), \neg up(s_2), up(s_3), \neg light, relay\}$$
$$T_2 = \{up(s_1), up(s_2), up(s_3), light, \neg relay\}$$
$$T_3 = \{up(s_1), \neg up(s_2), up(s_3), \neg light, \neg relay\}$$

Για να δούμε το γιατί, παρατηρείστε πρώτα ότι και το φως (light) και το ρελέ ορίζονται εντελώς από τις θέσεις των διακοπτών. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί συνδυασμοί των θέσεων διακοπτών δεδομένου ότι $up(s_3)$ ένας από αυτούς ωστόσο, δεν είναι αποδεκτό δηλαδή που μόνο το s_1 είναι κάτω. Όσον αφορά την αντίστοιχη απόσταση στο S', έχουμε:

$$\| T_1 \setminus S' \| \cap F_p = \{up(s_2), relay\} \cap F_p = \{up(s_2)\}$$
$$\| T_2 \setminus S' \| \cap F_p = \{up(s_1), light\} \cap F_p = \{up(s_1)\}$$
$$\| T_3 \setminus S' \| \cap F_p = \{up(s_1), up(s_2)\} \cap F_p = \{up(s_1), up(s_2)\}$$

Συνεπάγεται ότι και $T_1 \prec_{s'} T_3 |_{F_p, F_s}$ και $T_2 \prec_{s'} T_3 |_{F_p, F_S}$ αν και T_1 και T_2 δεν είναι συγκρίσιμα γραμμένα στο S'. Γι' αυτό το λόγο, οι δυο είναι κατηγοριοποιημένοι διάδοχοι ελαχιστοποίησης αλλαγής του S και $\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\,(s_3)$.

Η ύπαρξη του ακούσιου διάδοχου T_2 όπου ο διακόπτης s_1 αλλάζει αντί για το διακόπτη s_2, μπορεί να εξηγηθεί από την αναγκαιότητα της αλλαγής του κύριου εύρους -εκτός απ' αυτό $up(s_3)$ το οποίο ήταν η άμεση επίδραση –για να φτάσεις σε μια αποδεκτή κατάσταση. στον εκούσιο διάδοχο δηλ. T_1 αυτή η αλλαγή αφορά το διακόπτη s_2 που προκαλείται από την ενεργοποίηση του ρελέ. Αυτή η ίδια ενεργοποίηση αποφεύγεται ωστόσο, με τη μετακίνηση του διακόπτη s_1 αντί όπως έγινε στο T_2. Και με τους δυο τρόπους σεβόμαστε την ιδέα της ελαχιστοποίησης αλλαγής των κύριων ευρών. Γι' αυτό το λόγο οι δυο καταστάσεις διαδοχής.

Η αιτία για το απρόβλεπτο αποτέλεσμα είναι ότι αναγκαστικά αποτυγχάνουμε να προσδιορίσουμε μια μοναδική κατάλληλη κατηγορία στο εύρος $up(s_2)$ του οποίου ο ρόλος είναι διπλός: από τη μια πλευρά πρέπει να θεωρηθεί κύριος αναφορικά με το υπό-κύκλωμα που περιλαμβάνει το διακόπτη s_1 και τη λυχνία φωτός και από την άλλη πλευρά συμπεριφέρεται σαν δευτερεύον εύρος σε ότι αφορά το ρελέ. Από μια γενική προοπτική, αυτό αποδεικνύει ότι ίσως να είναι αδύνατο να χαρακτηριστεί καθολικά ένα εύρος είτε σαν να είναι πάντα «ενεργό» ή σαν να είναι «παθητικό». Ο τρόπος που συμπεριφέρεται ένα εύρος μοιάζει μάλλον με μια πιο τοπική ιδιότητα εξαρτώμενη από ποιά από τα σχετιζόμενα στοιχεία θεωρεί κάποιος. Με άλλα

λόγια, ένα εύρος μπορεί να είναι ενεργό θεωρώντας μια άποψη ενεργητική και θεωρώντας παθητική μια άλλη. Σε ότι αφορά το παράδειγμα μας, κάποιος μπορεί να προτείνει μόνο την εισαγωγή μιας πρόσθετης κατηγορίας του, ας πούμε, τριτογενών ευρών, F_t με ακόμα χαμηλότερη ιδιότητα από τα δευτερογενή. Μετά, παίρνοντας $up(s_1), up(s_3) \in F_p, up(s_2), relay \in F_S$ και $light \in F_t$, αποδίδει την αναμενόμενη μοναδική κατάσταση που καταλήγει, παρέχοντας μια κατάλληλη επέκταση της αντίληψης μας της κατάστασης απόστασης γραμμένο ως μια κατηγοριοποίηση (θυμηθείτε Ορισμός 3.3.1). Ωστόσο, αυτή η συγκεκριμένη ταξινόμηση απαιτεί μια βαθύτερη ανάλυση των πιθανών άμεσων και έμμεσων επιδράσεων στο ηλεκτρικό κύκλωμα και φαίνεται, με την πρώτη ματιά, αρκετά αφύσικη. Επιπλέον, δεν είναι δύσκολο να φανταστεί κανείς πιο περίπλοκα πεδία ορισμού που απαιτούν περισσότερες κατηγορίες που αυξάνουν σε μεγάλο βαθμό τη δυσκολία της απόφασης σε ποια τάξη πρέπει να ανήκει ένα συγκεκριμένο εύρος. Συγκεκριμένα, η πρόσθεση των περιορισμών στην εξειδίκευση του πεδίου ορισμού ίσως απαιτεί μια αλλαγή της αυθεντικής κατηγοριοποίησης (όπως στο παράδειγμα μας, όπου $up(s_2)$ μετακινείται στο F_s και το φως στο F_t)- το οποίο θεωρείται ανεπαρκές.

3.4 Αιτιολογικές σχέσεις

Οι διαφορετικές προσεγγίσεις με τις οποίες επιχειρήσαμε να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα διακλάδωσης μέχρι στιγμής κυρίως αποκάλυψαν, ότι ο υπολογισμός για έμμεσες επιπτώσεις των πράξεων είναι μια μεγαλύτερη πρόκληση όπως φαίνεται. Αν και η εμφάνιση των έμμεσων επιπτώσεων προκαλείται από την αναγκαιότητα να διορθωθούν οι παραβιάσεις της κατάστασης περιορισμών, οι πολλοί περιορισμοί απεδείχθησαν ότι δεν επαρκούσαν για την αναγνώριση λογικά προτεινόμενων επιδράσεων που ποτέ δεν θα συνέβαιναν στην πραγματικότητα. Η παροχή επιπρόσθετης γνώσης του πεδίου ορισμού στη μορφή της καθολικής ταξινόμησης των ευρών επίσης αποδείχθηκε πολύ χοντροκομμένη. Είτε αναμένεται ένα εύρος να αλλάξει είτε όχι, σαν έμμεση επίδραση είναι μια πιο τοπική ιδιότητα που εξαρτάται από το πλαίσιο. Αυτό που χρειαζόμαστε επομένως, είναι μια έννοια για γενίκευση έμμεσων επιδράσεων στη βάση της γνώσης της οποίας η δομή σέβεται και αντανακλά την ευαισθησία στο πλαίσιο. Η έννοια των αιτιολογικών σχέσεων θα υπηρετήσει αυτό το σκοπό. Καθώς αυτές οι σχέσεις αποτελούν έννοια κλειδί για την εργασία αυτή, θα εισαχθούν και θα αναλυθούν λεπτομερώς στο τέλος και στα ακόλουθα τέσσερα τμήματα.

3.4.1 Οι αιτιολογικές σχέσεις και η εφαρμογή τους

Οι αιτιολογικές σχέσεις είναι τυποποιήσεις των περιστάσεων κάτω από τις οποίες αναμένεται η εμφάνιση μιας μόνο έμμεσης επίδρασης. Δυο στοιχεία αποτελούν αυτές τις περιστάσεις. Ένα από αυτά περιγράφει το πλαίσιο που απαιτείται για την έμμεση επίδραση. Το πλαίσιο αναπαρίσταται από ένα τύπο εύρους που χρειάζεται να ικανοποιηθεί σε μια κατάσταση με σκοπό να εφαρμοστεί η αιτιολογική σχέση. Το δεύτερο στοιχείο είναι, μια ειδική μοναδική επίδραση της οποίας η προηγούμενη εμφάνιση προκαλεί (γι’ αυτό και το όνομα) την εν λόγω έμμεση επίπτωση. Αυτή η ίδια η προκλητική επίδραση μπορεί να αποκτήθηκε προηγούμενα ως έμμεση επίδραση, αν δεν ήταν ανάμεσα στις άμεσες επιδράσεις της πράξης.

Η διάκριση μεταξύ πλαισίου και μιας συγκεκριμένης προκλητικής επίδρασης είναι σημαντική. Ο λόγος για αυτό θα διασαφηνιστεί σε λίγο. Πρώτα, ας θεωρήσουμε ένα παράδειγμα της αιτιολογικής σχέσης που συμβαίνει στο ηλεκτρικό κύκλωμα με μόλις δυο διακόπτες και τη λυχνία φωτός. Ας υποθέσουμε ότι ο διακόπτης s_1 κλείνει σαν άμεση επίδραση κάποιας πράξης. Αυτή η επίδραση αναμένεται να προκαλέσει το φως να ανάψει σαν έμμεση επίδραση, εάν ο διακόπτης s_2 είναι επίσης κλειστός. Γράφουμε την αιτιολογική σχέση ως:

$$up(s_1)\ \textit{προκαλά φωςαν}\ up(s_2)$$

Σχέση 3.4.1.1

Εδώ το $up(s_1)$ είναι η επίδραση της οποίας η εμφάνιση προκαλεί έμμεση επίδραση, το φως στο πλαίσιο ορίζεται από την ατομική φόρμουλα εύρους $up(s_2)$. Φυσικά, η αναλογία είναι αληθής όπως και στο συγκεκριμένο πεδίο ορισμού δηλαδή:

$$up(s_2)\ \text{προκαλεί φως αν}\ up(s_1)$$

Σχέση 3.4.1.2

Όμως αυτή η συμμετρία δεν είναι πάντα αληθινή, όπως θα δούμε αργότερα. Σε κάθε περίπτωση οι δυο αιτιολογικές σχέσεις εκφράζουν διαφορετικά πράγματα: η πρώτη εφαρμόζεται όποτε το $up(s_1)$ γίνεται αληθές με το $up(s_2)$ που είναι ήδη αληθές, αντίθετα το τελευταίο εφαρμόζεται όποτε το $up(s_2)$ γίνεται αληθές ενώ παραμένει το $up(s_1)$.

Οι αιτιολογικές σχέσεις θα χρησιμοποιούνται για να παραχθούν επιπρόσθετα, έμμεσες επιδράσεις των πράξεων μετά την δημιουργία των άμεσων επιπτώσεων μέσω της εφαρμογής του νόμου πράξης. Συνήθως, οι αιτιολογικές σχέσεις λειτουργούν σε ζευγάρια κατάστασης-επίδρασης (S,E) όπου το S είναι κάποια «ενδιάμεση» κατάσταση, προκαταρκτικός διάδοχος, για παράδειγμα και το E περιέχει όλες τις άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις που έχουν παραχθεί μέχρι τώρα. Σαν παράδειγμα, θυμηθείτε ότι $S' = \{up(s_1), up(s_2), \neg light\}$ στον προκαταρκτικό διάδοχο της μετάπτωσης του πρώτου διακόπτη. Η κατάσταση S' αποκτήθηκε μέσω της άμεσης επίδρασης $E = \{up(s_1)\}$. Η αιτιολογική Σχέση 3.4.1.1 από πάνω εφαρμόζεται στο (S',E) εξαιτίας και των δυο $up(s_1)$ που είναι μέρος της επίδρασης E και το $up(s_2)$, το πλαίσιο που είναι αληθές στο S'. Η σχέση συνεπάγεται ότι το S' πρέπει να τροποποιηθεί έτσι ώστε να εξηγεί την έμμεση επίδραση *φως* που παράγει την κατάσταση $S'' = \{up(s_1), up(s_2), light\}$. Επιπρόσθετα, αυξάνουμε το E με τη νέα μας επίδραση, *φως*. Συνολικά το αποτέλεσμα της εφαρμογής της αιτιολογικής σχέσης στο $(S', \{up(s_1)\})$ είναι το ζευγάρι της κατάστασης-επίδρασης $(S'', \{up(s_1), light\})$. Λάβετε υπόψη ότι η δεύτερη αιτιολογική Σχέση 3.4.1.2 δεν πρέπει να εφαρμόζεται στο (S', E) παρόλο που $up(s_1)$ είναι αληθές στο S', επειδή η επίδραση του $up(s_2)$ δεν περιέχεται στο E.

Ο λόγος για τη διατήρηση του δεύτερου στοιχείου, E είναι ότι οι ίδιες ενδιάμεσες καταστάσεις (όπως το S') μπορεί συχνά να επηρεαστούν από τις διαφορετικές επιπτώσεις, καθεμία από τις οποίες ίσως απαιτεί διαφορετικούς, αντίθετους χειρισμούς όπως δείχνει εμφανώς το ακόλουθο παράδειγμα.

Παράδειγμα 3.4.1.1: *Ας υποθέσουμε ότι δυο διακόπτες s_1 και s_2 μπορούν να είναι σφιχτά δεμένοι από ένα ελατήριο έτσι ώστε να είναι πάντα στην ίδια θέση. Αυτό απεικονίζεται από την κατάσταση περιορισμού $up(s_1) \equiv up(s_2)$. Ως συνέπεια κλείνοντας ή ανοίγοντας το καθένα διακόπτη έχει την έμμεση επίδραση ότι ο άλλος διακόπτης κλείνει ή ανοίγει αντίστοιχα, επιπλέον απελευθερώνει την τάση του ελατηρίου. Αυτό εκφράζεται από τις τέσσερις αιτιολογικές σχέσεις:*

$$up(s_1) \text{ προκαλεί } up(s_2) \text{ αν T}$$

$$up(s_2) \text{ προκαλεί } up(s_1) \text{ αν T}$$

$$\neg up(s_1) \text{ προκαλεί } \neg\, up(s_2) \text{ αν T}$$

$$\neg\, up(s_2) \text{ προκαλεί } \neg up(s_1) \text{ αν T}$$

Σχέση 3.4.1.3

Τώρα, ας υποθέσουμε ότι ανοίγουμε τον πρώτο διακόπτη στην κατάσταση $\{\neg up(s_1), \neg up(s_2)\}|$. Αυτό αποδίδει τον προκαταρκτικό διάδοχο $S' = \{up(s_1), \neg up(s_2)\}$. Από την άλλη πλευρά, ας υποθέσουμε ότι κλείνουμε το δεύτερο διακόπτη στην κατάσταση $\{up(s_1), up(s_2)\}$. Αυτό προφανώς αποδίδει τον προκαταρκτικό διάδοχο S'. Παρ' όλα αυτά τα αναμενόμενα αποτελέσματα σε αυτές τις δυο καταστάσεις διαφέρουν σημαντικά: στην πρώτη περίπτωση το τελικό αποτέλεσμα πρέπει να είναι ότι και τα δυο s_1 και s_2 είναι στην πάνω θέση αντίθετα στη δεύτερη περίπτωση όπου και τα δυο αναμένονται να είναι στην κάτω. Αυτή η διάκριση μπορεί να γίνει με την αναφορά στις διαφορετικές άμεσες επιπτώσεις δηλ. $E_1 = \{up(s_1)\}$ αντίθετα με το $E_2 = \{\neg up(s_2)\}$. Η πρώτη καθιστά ικανή την εφαρμογή της πρώτης Σχέση 3.4.1.3 στο ενδιάμεσο αποτέλεσμα, η τελευταία μόνο την εφαρμογή της τελευταίας. Τα δυο ζεύγη κατάστασης-επίδρασης που καταλήγουν είναι:

$$(\{up(s_1), up(s_2)\}, \{up(s_1), up(s_2)\})$$

$$(\{\neg up(s_1), \neg up(s_2)\}, \{\neg up(s_2), \neg up(s_1)\}).$$

Συνεπώς, σε κάθε περίπτωση κρατάμε την εκτεταμένη κατάσταση διαδοχής.

Παρεμπιπτόντως, αυτό το παράδειγμα δείχνει επίσης την αναγκαιότητα της διάκρισης επιδράσεων που προκαλούνται από τα πλαίσια στις αιτιολογικές σχέσεις: υπάρχει μια προφανής κρίσιμη διαφορά μεταξύ της κατάστασης όπου $up(s_1)$ έγινε αληθές στο πλαίσιο $\neg up(s_2)$ και την κατάσταση όπου $\neg up(s_2)$ έγινε αληθές στο πλαίσιο $up(s_1)$.

Όσο περίεργο και να φαίνεται το τελευταίο παράδειγμα με τη πρώτη ματιά, ένα τέτοιο στενό ζευγάρι μεταξύ ευρών συχνά συμβαίνει σε μια σημαντική κατηγορία του περιορισμού της κατάστασης. Οι επονομαζόμενοι «προσδιοριστικοί» περιορισμοί για χάρη της ευκολίας αντιπροσωπεύουν ένα εύρος σαν συντομογραφία για ένα σύνθετο τύπο εύρους. Ο περιορισμός $\forall x \,|\, down(x) \equiv \neg up(x) \,|$ για παράδειγμα, ορίζει το *κάτω* σαν το να μην είναι *πάνω*. Είναι ξεκάθαρο ότι όποτε ένα περιστατικό του $up(x)$ αλλάζει, το αντίστοιχο περιστατικό του $down(x)$ υποτίθεται ότι αλλάζει ανάλογα και τανάπαλιν. Αυτό προκαλεί παρόμοιες καταστάσεις σαν το σενάριο του ελατηρίου, έτσι ώστε ο σωστός χειρισμός να βασίζεται επίσης στη διάκριση μεταξύ της επίδρασης που το εκκινεί και του πλαισίου. Επίσης, να αναφέρουμε ότι η καθοριστική κατάσταση περιορισμών συνεισφέρει σε ένα άλλο ειδικό πρόβλημα που θα συζητηθεί με λεπτομέρεια στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Όπως και στους κανόνες πράξης, ίσως να είναι βολικό να χρησιμοποιηθούν μεταβλητές στις αιτιολογικές σχέσεις, με σκοπό να συνοψισθεί μια ολόκληρη συλλογή παρόμοιων βασικών παραδειγμάτων. Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι όλοι οι διακόπτες του ηλεκτρικού κυκλώματος και μια λυχνία φωτός είναι συνδεδεμένα στη σειρά, τότε:

$up(x)$ προκαλεί φως αν $\forall y. up(y)$

καταστάσεις που έχουν ανοίξει οποιοδήποτε διακόπτη x προκαλεί φως εάν όλοι οι διακόπτες είναι (τώρα) στη πάνω θέση. Με αυτό φθάνουμε στον ακόλουθο επίσημο ορισμό της αιτιολογικής σχέσης και της εφαρμογής σε ζευγάρια κατάστασης-επίδρασης.

<u>Ορισμός 3.4.1.1:</u> *Έστω ε και F σύνολα οντοτήτων και ονομάτων ευρών αντίστοιχα. Μια αιτιολογική σχέση είναι του τύπου ε **προκαλεί** ρ **αν** Φ όπου Φ (το πλαίσιο) είναι μια φόρμουλα εύρους και τόσο το ε (εκκινητική επίδραση) όσο και το ρ (διακλάδωση) είναι εκφράσεις εύρους.*

Έστω (S,E) ότι είναι ένα ζευγάρι που αποτελείται από μια κατάσταση S και ένα σύνολο λεκτικού εύρους E. Επιπλέον, έστω $r=\varepsilon$ προκαλεί ρ αν Φ μια αιτιολογική σχέση και έστω $\bar{x}$ δηλώνει μια διαδοχή όλων των ελεύθερων μεταβλητών που συμβαίνει στο ε, ρ, Φ. Τότε το βασικό περιστατικό, $r[\bar{e}]$ εφαρμόζεται (S,E) αν και μόνο αν $\varepsilon[\bar{e}] \in \mathrm{E}$ και $\Phi[\bar{e}] \wedge \neg\rho[\bar{e}]$ είναι αληθές στο S. Η εφαρμογή του $r[\bar{e}]$ στο (S,E) αποδίδει το ζευγάρι (S',E') όπου $S'=(S\setminus\{\neg\rho[\bar{e}]\})\cup\{\rho[\bar{e}]\}$ και $E'=(E\setminus\{\neg\rho[\bar{e}]\})\cup\{\rho[\bar{e}]|\}$. Αν το R είναι ένα σύνολο αιτιολογικών σχέσεων τότε με το $(S,E)\rightarrow_R (S',E')$ δηλώνουμε την ύπαρξη της σχέσης στο R της οποίας η εφαρμογή σε (S,E) αποδίδει (S',E').

Για να συνοψίσουμε, μια αιτιολογική σχέση ε προκαλεί ρ αν το Φ είναι εφαρμόσιμο αν ισχύει το πλαίσιο Φ, η έμμεση επίδραση θα είναι ρ για την ώρα ψευδές και αν η αιτία του ε είναι ανάμεσα στις τρέχουσες επιδράσεις. Μια σχέση εφαρμόζεται με την αλλαγή $\neg\rho$ σε ρ στην τρέχουσα κατάσταση και προσθέτοντας το ρ στις τρέχουσες επιδράσεις. Με σκοπό το τελευταίο να μην παράγει μια ασυνέπεια ανάμεσα στις επιδράσεις, μια πιθανή προηγούμενη επίδραση $\neg\rho$ αποσύρεται. Αυτή η προφύλαξη εγγυάται ότι όποτε $(S,E)\rightarrow_R (S',E')$ με το S να είναι μια κατάσταση και το E να είναι συνεπές, τότε S' είναι μια κατάσταση και E' είναι συνεπές επίσης.

Συνεπώς μέχρι τώρα έχουμε δει πως η εφαρμογή μιας μόνο αιτιολογικής σχέσης παράγει μια ειδική έμμεση επίδραση. Οι άμεσες επιδράσεις της πράξης φυσικά ίσως δώσουν αφορμή για πολλές έμμεσες επιπτώσεις. Επιπλέον, αυτές οι επιδράσεις ίσως με τη σειρά τους προκαλέσουν περαιτέρω επιδράσεις πιθανώς προκαλώντας ακόμα περισσότερες και πάει λέγοντας. Κλείνοντας το διακόπτη s_3 στο κύκλωμα μας που περιλαμβάνει το ρελέ για παράδειγμα, προκαλεί μια ενεργοποίηση του ρελέ που με τη σειρά του πυροδοτεί μια έμμεση επίπτωση με την έλξη του διακόπτη s_2. Αυτές οι αλυσίδες έμμεσων επιπτώσεων είναι υπόδειγμα για σειριακές εφαρμογές των αιτιολογικών σχέσεων.

Παράδειγμα 3.4.1.1: *Έστω D ότι είναι το βασικό πεδίο ορισμού που τυποποιεί το ηλεκτρικό κύκλωμα όπως στο Παράδειγμα 3.2.2. Σε ότι αφορά τις ποικίλες αιτιολογικές εξαρτήσεις ανάμεσα στα στοιχεία, παρατηρούμε ότι πρώτα, το φως ανάβει αν κάποιος από τους διακόπτες s_1 και s_2 προκληθεί από τον άλλο που είναι ήδη στην πάνω θέση. Αντιστρόφως, το φως είναι σβηστό αν κάποιος από τους διακόπτες είναι κατεβασμένος, ανεξάρτητα από τη θέση του άλλου διακόπτη. Αυτό απεικονίζεται με την εισαγωγή των ακόλουθων τεσσάρων αιτιολογικών σχέσεων:*

$up(s_1)$ προκαλεί φως αν $up(s_2)$ $\neg up(s_1)$ προκαλεί $\neg$ φως αν T

$up(s_2)$ προκαλεί φως αν $up(s_1)$ $\neg up(s_2)$ προκαλεί $\neg$ φως αν Τα

Σχέση 3.4.1.4

Αναλογικά, η κατάσταση του ρελέ αιτιολογικά εξαρτάται από τους διακόπτες s_1 και s_3 ως ακολούθως:

$\neg up(s_1)$ προκαλεί ρελέ αν $up(s_3)$ $up(s_1)$ προκαλεί $\neg$ ρελέ αν T

$up(s_3)$ προκαλεί ρελέ αν $\neg up(s_1)$ $\neg$ $up(s_3)$ προκαλεί $\neg$ ρελέ αν Τα

Σχέση 3.4.1.5

Τελικά το ενεργοποιημένο ρελέ αναγκάζει το διακόπτη s_2 να είναι κάτω δηλαδή:

Ρελέ προκαλεί $\neg up(s_2)$ αν T

Σχέση 3.4.1.6

Τώρα, έστω $S = \{\neg up(s_1), up(s_2), \neg up(s_3), \neg light, \neg relay\}$ να είναι η τρέχουσα κατάσταση. Εκτελώντας την πράξη Μετάπτωση(s_3) προκύπτει το ακόλουθο ζευγάρι κατάστασης-επίδρασης:

$$(\{\neg up(s_1), up(s_2), up(s_3), \neg light, \neg relay\}, \{up(s_3)\})$$

Η μια και μόνη αιτιολογική σχέση είναι η κάτω αριστερά στη (Σχέση 3.4.1.5) που ενεργοποιεί τη ρελέ:

$$(\{\neg up(s_1), up(s_2), up(s_3), \neg light, relay\}, \{up(s_3), relay\})$$

Ως συνέπεια της έμμεσης επίπτωσης, η σχέση του (Σχέση 3.4.1.6) είναι τώρα εφαρμόσιμη που καταλήγει σε:

$$(\{\neg up(s_1), \neg up(s_2), up(s_3), \neg light, relay\}, \{up(s_3), relay, \neg up(s_2)\})$$

Αυτό το ζευγάρι κατάστασης-επίδρασης δεν επιτρέπει περαιτέρω εφαρμογή των αιτιολογικών σχέσεων. Παρεμπιπτόντως το πρώτο του στοιχείο είναι αποδεκτά γραμμένο σαν βασική κατάσταση περιορισμών και συνιστά τη (μοναδική) καταληκτική κατάσταση που αναμένεται όταν κλείσουμε τον τρίτο διακόπτη στην αρχική κατάσταση S.

Μέχρι τώρα πρέπει να έχει γίνει ξεκάθαρο πώς χρησιμοποιούνται οι αιτιολογικές σχέσεις ώστε να εφαρμοστούν στο πρόβλημα διακλάδωσης. Ξεκινώντας με κάποια προκαταρκτική κατάσταση διαδοχής, επιλέγουμε (μη ντετερμινιστικά) και (σειριακά) εφαρμόζουμε αυτές τις σχέσεις κάθε μια από τις οποίες εξυπηρετεί μια μόνο έμμεση επίπτωση. Εάν το βασικό σύνολο αιτιολογικών σχέσεων είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να αναπαριστά κατάλληλα πραγματικές αιτιολογικές εξαρτήσεις σε ένα πεδίο ορισμού, όλες οι επιδράσεις που αποκτήθηκαν είναι λογικές από την άποψη της αιτιότητας. Όποτε η εφαρμογή μιας σειράς τελικά παράγει μια αποδεκτή κατάσταση, τότε η τελευταία έχει θεωρηθεί σαν πιθανή ολική διάδοχος. Λάβετε υπόψη ότι κάθε εύρος που παραμένει στην αρχική κατάσταση και δεν επηρεάζεται σε οποιοδήποτε βήμα της διαδικασίας παραμένει ίδιο. Αυτή η προσέγγιση επομένως εξηγεί και την ακριβή επιμονή των μη-επηρεασμένων μερών από τη μια πλευρά, και τις αυθαίρετες περίπλοκες αλυσίδες των έμμεσων επιπτώσεων από την άλλη πλευρά.

Συνεπακόλουθα λέμε ότι η διαδοχή των αιτιολογικών σχέσεων $r_1,\ldots,r_n (n \geq 0)$ εφαρμόζεται σε ζευγάρι (S_0, E_0) αν και μόνο αν μπορούμε να βρούμε n ζευγάρια $(S_1, E_1),\ldots,(S_n, E_n)$ όπως αυτό για κάθε $1 \leq i \leq n, r_i$ εφαρμόζεται σε (S_{i-1}, E_{i-1}) προκύπτει (S_i, E_i). Υιοθετούμε μια τυπική σημείωση στη γραφή $(S,E) \xrightarrow{\bullet}_R (S_n, E_n)$ για να δείξουμε την ύπαρξη μιας (πεπερασμένης, πιθανώς άδειας) διαδοχής των αιτιολογικών σχέσεων στο R που εφαρμόζει σε (S,E) με τελικό αποτέλεσμα (S_n, E_n). Τα ακόλουθα είναι ένας τυπικός ορισμός της έννοιας των διαδοχικών καταστάσεων στη βάση των αιτιολογικών σχέσεων.

<u>Ορισμός 3.4.1.2 :</u> *Έστω E, F, A και L ότι είναι σύνολα οντοτήτων, ονόματα ευρών, ονόματα πράξης και νόμοι πράξης αντίστοιχα. Επιπλέον, έστω C ότι είναι σύνολο κατάστασης περιορισμών και R σύνολο αιτιολογικών σχέσεων. Αν S είναι μια αποδεκτή κατάσταση και a μια πράξη, τότε S' είναι μια αιτιολογική διαδοχή του S και a αν και μόνο αν ισχύουν τα ακόλουθα: το L περιέχει εφαρμοσμένο παράδειγμα a μεταμορφώνει C σε E του νόμου πράξης όπως:*

$((S \setminus C \cup E, E) \xrightarrow{\bullet}_R (S', E')$ για κάποιο E' και S' είναι αποδεκτό

Για ένα λόγο που θα περιγράψουμε στο επόμενο κεφάλαιο δεν είμαστε εντελώς ικανοποιημένοι με τον ορισμό σαν μια γενική λύση στο πρόβλημα διακλάδωσης. Για αυτό και αναβάλλουμε την προσαρμογή των εννοιών των ερμηνειών και μοντέλων στο κομμάτι που είναι αργότερα.

Ο τρόπος που χρησιμοποιούνται οι αιτιολογικές σχέσεις, δεν έχει προϋποθέσεις στη σειρά με την οποία εφαρμόζονται. Οι δυο σχέσεις που χρησιμοποιούνται στο παράδειγμα με το ρελέ για να εξηγήσουν τις έμμεσες επιπτώσεις του κλεισίματος του τρίτου διακόπτη μπορούν ωστόσο να εφαρμοστούν με μια μόνο σειρά. Αυτό γιατί το δεύτερο χρονικά απαιτεί το αποτέλεσμα του πρώτου δηλ. ενεργοποίηση του ρελέ όπως η επίδραση της πυροδότησης. Από την άλλη πλευρά, γενικά υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι διαδοχικά εφαρμοσμένων αιτιολογικών σχέσεων. Η τυποποίηση του παραδείγματος κυκλώματος με n παράλληλα υπό-κυκλώματα καθένα από τα οποία αποτελείται από ζευγάρι διακόπτη-λυχνίας θα το έδειχνε αυτό.

Παράδειγμα 3.4.1.2: *Έστω $D_n (n \geq 2)$ ότι είναι το βασικό πεδίο ορισμού που αποτελείται από οντότητες $s_0, s_1, \ldots, s_n$, ονόματα εύρους $up^1, light_1{}^0, \ldots, light_n{}^0$, όνομα πράξης μετάπτωση^1 και νόμους πράξης*

Μετάπτωση (x) μετασχηματίζει $\{up(x)\}$ σε $\{\neg up(x)\}$

Μετάπτωση (x) μετασχηματίζει $\{\neg up(x)\}$ σε $\{up(x)\}$

Υποθέστε ότι δίνεται περαιτέρω n η κατάσταση περιορισμών $light_i \equiv up(s_0) \wedge up(s_i)(1 \leq i \leq n)$ και για κάθε $i = 1, \ldots, n$ αυτές οι τέσσερις αιτιολογικές σχέσεις:

$up(s_0)$ προκαλεί φως$_i$ αν $up(s_i)$ $\neg up(s_0)$ προκαλεί $\neg \phi\omega\varsigma_i$ αν T

$up(s_i)$ προκαλεί φως$_i$ αν $up(s_0)$ $\neg up(s_i)$ προκαλεί $\neg \phi\omega\varsigma_i$ αν Τα

Σχέση 3.4.1.7

(προσέξτε το μέγεθος της προδιαγραφής που είναι γραμμικό στο n αντίθετα με τον εκθετικό αριθμό νόμων πράξης που χρειάζονται όταν τυποποιούν το πεδίο ορισμού χωρίς την έννοια των έμμεσων επιπτώσεων). Τώρα, υποθέστε, ότι όλοι οι διακόπτες είναι κλειστοί εκτός από τον s_0 και γι' αυτό το λόγο όλες οι λυχνίες φωτός είναι κλειστές. Δηλαδή, έστω $S=\{\neg up(s_0), up(s_1),\ldots, up(s_n), \neg light_1,\ldots,\neg light_n\}$ να είναι η τρέχουσα, αποδεκτή κατάσταση. Εκτελώντας την πράξη $\mu\varepsilon\tau\acute{\alpha}\pi\tau\omega\sigma\eta\,(s_0)$ σε αυτή την κατάσταση προκύπτει ο προκαταρκτικός διάδοχος $S'=\{up(s_0), up(s_1),\ldots, up(s_n), \neg light_1,\ldots,\neg light_n\}$ μαζί με την άμεση επίδραση $E=\{up(s_0)\}$. Προφανώς, το ζευγάρι κατάστασης-επίδρασης (S',E) επιτρέπει την εφαρμογή όλων των n αιτιολογικών σχέσεων του τύπου $up(s_0)$ προκαλεί $\varphi\omega\varsigma_i$ αν $up(s_i)$ όπου $i=1,\ldots,n$. Όποιο από αυτά εκτελεστεί πρώτο, η άλλη σχέση $n-1$ παραμένει εφαρμόσιμη στο ζευγάρι που καταλήγει κατάσταση-επίδραση και πάει λέγοντας. Γι' αυτό το λόγο υπάρχουν $n!$ διαφορετικές διαδοχές όλες από τις οποίες προφανώς καταλήγουν στην ίδια κατάσταση αιτιολογικής διαδοχής δηλαδή $\{up(s_0), up(s_1),\ldots, up(s_n), light_1,\ldots, light_n\}$.i.e. όπου όλες οι λυχνίες φωτός είναι τώρα ενεργές.

Όλες οι διαδοχές εφαρμογής που καταλήγουν στο ίδιο αποτέλεσμα στο παράδειγμα αυτό, εγείρει το ερώτημα αν ισχύει γενικά η μη σχετική σειρά. Η ακόλουθη πρόταση δείχνει ότι πράγματι η ανταλλαγή της διαδοχής των αιτιολογικών σχέσεων καταλήγει στο ίδιο συμπέρασμα εάν η εφαρμόζεται συνδυασμένη διαδοχή.

Πρόταση 3.4.1.1: *Έστω E και F ότι είναι σύνολα οντοτήτων και ονόματα εύρους αντίστοιχα S_0 να είναι μια κατάσταση και E_0 σύνολο λεκτικά εύρη. Επιπλέον έστω $r_1,\ldots,r_n$ να είναι η συνέχεια των αιτιολογικών σχέσεων $(n\geq 0)$ το οποίο εφαρμόζεται σε (S_0,E_0) και αποδίδει*

$(S_0,E_0)\mapsto_{\{r_1\}}(S_1,E_1)\rightarrow_{\{r_2\}}\ldots\rightarrow_{\{r_n\}}(S_n,E_n)$

Τότε για κάθε συνδυασμό $r_{\pi(1)},\ldots,r_{\pi(n)}$ που επίσης εφαρμόζεται σε (S_0,E_0) και αποδίδει $(S_0,E_0)\rightarrow_{\{r_{\pi(1)}\}}(S_1',E_1')\rightarrow_{\{r_{\pi(2)}\}}\ldots\rightarrow_{r_{\{\pi(n)\}}}(S_n',E_n')$

έχουμε $S_n=S_n'$ και $E_n=E_n'$

Απόδειξη. Έστω f ένα αυθαίρετο αλλά σταθερό εύρος. Με το k_f^+ δηλώνουμε τον αριθμό (πιθανόν μηδέν) των σχέσεων $r_i = \varepsilon_i$ προκαλεί f αν Φ_i και με το $k_{\bar{f}}^-$ τον αριθμό (πιθανόν μηδέν επίσης) των σχέσεων $r_j = \varepsilon_j$ προκαλεί $\neg f$ αν $\Phi_j (1 \leq i, j \leq n)$. Αφού μια αιτιολογική σχέση ε_i προκαλεί f αν Φ_i μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε κάποια $(S_{i-1,} E_{i-1})$ αν $\neg f \in S_{i-1}$ (και τανάπαλιν στην περίπτωση έμμεσης επίδρασης $\neg f$) οι αξίες για k_f^+ και $k_{\bar{f}}^-$ καθορίζουν την τελική αληθινή αξία του f ως ακολούθως:

αν $f \in S$ τότε είτε $k_f^+ = k_{\bar{f}}^-$ ή $k_f^+ = k_{\bar{f}}^-$ -1. Στην προηγούμενη περίπτωση έχουμε $f \in S_{n.}$. Επίσης έχουμε $f \in E_n$ αν $k_f^+ \succ 0$ αλλιώς $f \notin E_n$ και $\neg f \in E_n$ αφού καμιά αιτιολογική σχέση δεν επηρεάζει f. Στην τελευταία περίπτωση έχουμε τόσο $\neg f \in S_{n.}$ όσο και $\neg f \in E_n$.

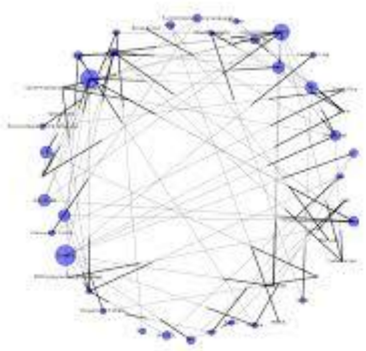
αν $\neg f \in S$ τότε είτε $k_f^+ = k_{\bar{f}}^-$ ή $k_f^+ = k_{\bar{f}}^-$ +1. Στην προηγούμενη περίπτωση έχουμε $\neg f \in S_{n.}$. Επίσης έχουμε $\neg f \in E_n$ αν $k_{\bar{f}}^- \succ 0$ αλλιώς $\neg f \notin E_n$ και $f \notin E_n$ αφού καμία αιτιολογική σχέση επηρεάζει f. Στην τελευταία περίπτωση έχουμε $f \in S_{n.}$ και $f \in E_n$.

Αφού η ανταλλαγή $r_{\pi(1)}, \ldots, r_{\pi(n)}$ περιέχει ακριβώς τις ίδιες αιτιολογικές σχέσεις όπως η αυθεντική διαδοχή, δεν διαφέρουν στις αξίες για k_f^+ και $k_{\bar{f}}^-$. Γι' αυτό το λόγο τα S_n και S_n' συμφωνούν σε ότι αφορά το f και το ίδιο κάνουν τα E_n και E_n'. Το εύρος f που είναι αυθαίρετη επιλογή αποδεικνύει τον ισχυρισμό.

Ενώ αυτό το αποτέλεσμα αποδεικνύει τη γενική σταθερότητα σε σχέση με εφαρμοσμένες αλλαγές διαδοχικών των αιτιολογικών σχέσεων, δεν συνεπάγεται σύγκλιση όλων των διαδικασιών γενικά. Στην πραγματικότητα, μια διαφορετική επιλογή στην αρχή ίσως επιτρέπει την εφαρμογή μιας εντελώς διαφορετικής συλλογής αιτιολογικών σχέσεων. Αν δυο αλυσίδες σχέσεων δεν περιέχουν πανομοιότυπα στοιχεία, τότε καμία δεν αποτελεί συνδυασμού της άλλης και η Πρόταση 3.4.1.1 δεν εφαρμόζεται. Αυτό ωστόσο, δεν αποτελεί καθόλου μειονέκτημα ή ακόμα και απάτη όπως θα υπέθετε κάποιος. Αντίθετα επιτρέπει να διευθετηθούν πράξεις που είναι ντετερμινιστικές σε ότι αφορά τις άμεσες επιδράσεις αλλά μη ντετερμινιστικές αναφορικά με τις έμμεσες επιπτώσεις που πυροδοτούν. Δηλαδή, ακόμα και αν υπάρχει μια μοναδική προκαταρκτική διάδοχος, η εκτέλεση μίας πράξης σε κάποια κατάσταση ίσως επιτρέψει περισσότερα από μια πιθανή κατάσταση αιτιολογικής διαδοχής. Ένα παράδειγμα για την πράξη που δεν είναι ντετερμινιστική με αυτή την έννοια συμβαίνει στο πεδίο ορισμού που παρουσιάζεται πιο κάτω.

Το αντίθετο της ύπαρξης των πολλαπλών καταστάσεων διαδοχής είναι ότι κανένας διάδοχος δεν μπορεί να βρεθεί παρότι ένας ή περισσότεροι κανόνες πράξης εφαρμόζονται κοντά στην κατάσταση. Δηλαδή καμιά αλυσίδα αιτιολογικών σχέσεων δεν καταφέρνει να μετασχηματίσει ένα προκαταρκτικό διάδοχο σε μια αποδεκτή κατάσταση. Αυτό υπαινίσσεται επιπλέον ενδεχόμενες προαπαιτήσεις για την εν λόγω πράξη -προαπαιτήσεις που προέρχονται από κατάσταση περιορισμών. Το κεφάλαιο που ακολουθεί θα αφοσιωθεί στο φαινόμενο αυτό. Στο ακόλουθο κομμάτι, θίγουμε πρώτα άλλο ένα κεντρικό θέμα, δηλαδή πως σχετίζονται οι αιτιολογικές σχέσεις και η βασική κατάσταση περιορισμού ειδικότερα αναζητούμε ένα τρόπο να αποσπάσουμε τις πρώτες από την τελευταία.

3.5 Πληροφορίες Επιρροής



Η προσέγγιση που σχετίζεται στην αιτιότητα στο πρόβλημα διακλάδωσης, βασίζεται, προφανώς στο βασικό σύνολο αιτιολογικών σχέσεων που είναι κατάλληλες για το πεδίο ορισμού που υπάρχει. Αυτό το σύνολο θα έπρεπε να είναι στεγανό και ισχυρό στο ότι κάθε στοιχείο αναπαριστά μια διαισθητικά εύλογη αιτιολογική σχέση και θα έπρεπε να είναι ολοκληρωμένο στην κάλυψη όλων των κατανοητών έμμεσων επιδράσεων που προέρχονται από τη δεδομένη κατάσταση περιορισμών. Οι ποικίλες αιτιολογικές σχέσεις που χρησιμοποιήσαμε στο παράδειγμα με το ρελέ, για παράδειγμα, συνιστούν μια κατάλληλη συλλογή για το πεδίο ορισμού. Προφανώς, υπάρχει μια στενή ανταπόκριση μεταξύ των εννέα σχέσεων και των τριών βασικών καταστάσεων περιορισμού. Για παράδειγμα, η αιτιολογική σχέση $up(s_3)$ προκαλεί ρελέ αν $\neg up(s_1)$ προέρχεται από την κατάσταση περιορισμού $\rho\varepsilon\lambda\acute{\varepsilon} \equiv \neg up(s_1) \wedge up(s_3)$ που συνεπάγεται τη συνέπεια $\neg up(s_1) \wedge up(s_3) \supset \rho\varepsilon\lambda\acute{\varepsilon}$. Γενικά, έχουμε ότι για κάθε ε προκαλεί ρ αν Φ από τις εννιά σχέσεις, την ανταποκρινόμενο τύπος εύρους $\Phi \wedge \varepsilon \supset \rho$ μπορεί να συμπεράνουμε αφαιρετικά από μια από τις καταστάσεις περιορισμού.

Αυτή η παρατήρηση προτείνει ότι οι αιτιολογικές σχέσεις ίσως να μπορούν να εξαχθούν αυτόματα από ένα σύνολο περιορισμών. Από την άλλη πλευρά, το μεγαλύτερο μέρος της συζήτησης μας πριν την εισαγωγή των αιτιολογικών σχέσεων, επικεντρώθηκε στο πρόβλημα ότι οι περιορισμοί των καταστάσεων περιέχουν ανεπαρκείς πληροφορίες για να αποφασιστεί ποια είναι τα έμμεσα αποτελέσματα που μπορεί πιθανόν να συμβούν στην πραγματικότητα. Για να επαναδιατυπωθεί το πρόβλημα, παρατηρήστε ότι το παράδειγμα περιορισμού $\rho\varepsilon\lambda\acute{\varepsilon} \equiv \neg up(s_1) \wedge up(s_3)$ συνεπάγεται επίσης συμπέρασμα $\neg \rho\varepsilon\lambda\acute{\varepsilon} \wedge up(s_3) \supset up(s_1)$. Η ανταποκρινόμενη αιτιολογική σχέση $up(s_3)$ προκαλεί $up(s_1)$ αν $\neg \rho\varepsilon\lambda\acute{\varepsilon}$, ωστόσο, δεν ισχύει. Υπάρχει ένα κενό πληροφόρησης μεταξύ των απόλυτων καταστάσεων περιορισμού και την έγκυρη αιτιολογική σχέση που καθορίζουν. Στο παρόν κομμάτι, ασχολούμαστε με τη συμπλήρωση του κενού χωρίς την αναγκαιότητα του σχεδιασμού με το χέρι του συνόλου των αιτιολογικών σχέσεων. Δηλαδή, αναζητούμε μια γενική μέθοδο που επιτρέπει μια πιο συμπαγή παροχή της απαιτούμενης πληροφορίας.

Στο προηγούμενο κομμάτι συζητήσαμε την ποικιλία της εφαρμογής της αντιμετώπισης του προβλήματος διακλάδωσης με την κατηγοριοποίηση ευρών είτε ως κύρια είτε ως δευτερεύοντα. Η ανάλυση μας έδειξε ότι ακόμα και σε απλά πεδία ορισμού μπορεί να είναι αδύνατο να χαρακτηριστεί καθολικά ένα εύρος, είτε σαν ένα που αλλάζει ανεξάρτητα από άλλα ή σαν ένα που γενικά χειραγωγείται από άλλα. Αποδείχτηκε ότι είναι μια τοπική ιδιότητα είτε αναμένεται να αλλάξει είτε όχι ένα εύρος σαν έμμεση επίπτωση. Στο παράδειγμα μας το κύκλωμα περιελάμβανε το ρελέ, για παράδειγμα, ο δεύτερος διακόπτης αναμένεται να είναι ανεξάρτητος του διακόπτη s_1 αλλά μπορεί βεβαίως να επηρεαστεί από το ρελέ. Με άλλα λόγια το εύρος $up(s_1)$ δεν έχει άμεση επιρροή στο εύρος $up(s_2)$ αντίθετα με το εύρος ρελέ. Η γνώση του πεδίου ορισμού δηλώνει αν ένα συγκεκριμένο εύρος μπορεί η όχι να επηρεάσει άμεσα ένα άλλο συγκεκριμένο εύρος, πρέπει επομένως να βοηθήσει να ξεχωρίσει τη σωστή αιτιολογική σχέση. Συνήθως, αυτή η επονομαζόμενη πληροφορία επιρροής ορίζεται σαν μια δυαδική σχέση στο σύνολο των ευρών.

<u>Ορισμός 3.5.1:</u> *Έστω ε και F ότι είναι σύνολα οντοτήτων και ονόματα ευρών αντίστοιχα. Μια μη αντανακλαστική δυαδική σχέση I στο σύνολο των ευρών ονομάζεται πληροφορία επιρροής.*

Αν $(f_1, f_2) \in I$ τότε αυτό σκοπεύει να δηλώσει ότι μια αλλαγή στο εύρος αληθινής αξίας του $f_1's$ επηρεάζει δυναμικά την αληθινή αξία του f_2. Για ευκολία ένα ζευγάρι στο I μπορεί να περιέχει μεταβλητές επομένως αναπαριστά όλα τα βασικά παραδείγματα.

Παράδειγμα 3.5.1: *Θεωρείστε τις οντότητες $\varepsilon = \{s_1, s_2, s_3\}$ μαζί με τα εύρη $F = \{up^1, light^0, relay^0\}$. Οι δυο διακόπτες s_1 και s_2 μπορούν να επηρεάσουν το φως αλλά όχι αντίστροφα ούτε εμπλέκονται αμοιβαία. Παρόμοια s_1 και s_3 ίσως επηρεάσουν το ρελέ που με τη σειρά του πιθανώς επηρεάσει τη θέση του s_2.*
Επομένως η σωστή πληροφορία επιρροής I είναι:

$$\{(up(s_1), light), (up(s_2), light), (up(s_1), relay), (up(s_3).relay), (relay, up(s_2))\}$$

Σχέση 3.5.1

Παρατηρήστε πως η διπλή φύση του $up(s_2)$ αντανακλάται στην πληροφορία επιρροής: το εύρος συμβαίνει και σαν πρώτο (ενεργό) στοιχείο στο ζευγάρι $(up(s_2), light)$ και σαν δεύτερο (παθητικό) στοιχείο στο ζευγάρι $(relay, up(s_2))$. Για αυτό και ήταν αδύνατο να κατηγοριοποιήσει κανείς καθολικά το εύρος σαν κύριο ή δευτερεύον.

Οι δυο διακόπτες που είναι συνδεδεμένοι με το ελατήριο δείχνουν ότι η πληροφορία επιρροής ίσως επιφέρει κύκλους και είναι ακόμα και συμμετρική.

Παράδειγμα 3.5.2: *Έστω $\varepsilon = \{s_1, s_2\}$ και $F = \{up^1\}$. Οι δυο διακόπτες είναι αμοιβαία ανεξάρτητοι, η σωστή πληροφορία επιρροής I είναι η ακόλουθη:*

$$\{(up(s_1),up(s_2)),(up(s_2),up(s_1))\}$$

Δεδομένου της σωστής πληροφορίας της πιθανής επιρροής, οι αιτιολογικές σχέσεις είναι εξαγώγιμες από την κατάσταση περιορισμών ως ακολούθως. Για να γίνει πιο εύκολα ξεκάθαρο, ας συγκεντρωθούμε πρώτα στο ποσοτικοποιητή, ελεύθερο από φόρμουλες προτασιακού εύρους. Η γενική ιδέα είναι να εξερευνηθούν όλες οι πιθανές διακλαδώσεις και να αποκλειστούν αυτές που δεν σέβονται την έννοια της επιρροής. Με τέτοιο σκοπό θεωρούμε όλες τις πιθανές παραβιάσεις του περιορισμού της κατάστασης και διατυπώνουμε κατάλληλες αιτιολογικές σχέσεις που βοηθούν να «διορθωθεί» αυτό. Ας γίνουμε πιο ακριβείς. Ας υποθέσουμε ότι το C είναι μια κατάσταση περιορισμού. Πρώτα κατασκευάζουμε τον φυσιολογικό τύπο ελάχιστης συνδετικής (CNF για συντομία) του τύπου. Προφανώς το C παραβιάζεται αν και μόνο αν κάποιες ενώσεις $\ell_1 \vee \ldots \vee \ell_m$ του CNF παραβιαστούν. Αυτό με τη σειρά του σημαίνει ότι ισχύει $\neg\ell_1 \wedge \ldots \wedge \neg\ell_m$. Αφού η αρχική κατάσταση υποθετικά έχει ικανοποιήσει τον περιορισμό C ο λόγος $\neg\ell_1 \wedge \ldots \wedge \neg\ell_m$ να είναι αληθής πρέπει να είναι η εμφάνιση κάποιας επίδρασης (άμεσης ή έμμεσης) $\neg\ell_j \in \{\neg\ell_1,\ldots,\neg\ell_m\}$. Αυτή η παραβίαση του C μπορεί να «διορθωθεί» με την αλλαγή κάποιου άλλου λεκτικού $\neg\ell_k$ της συλλογής στο ℓ_k μέσω μιας αιτιολογικής σχέσης –αλλά όχι στην περίπτωση εύρους $\| \ell_j \|$ πιθανώς επηρεάζει το εύρος $\| \ell_k \|$ σύμφωνα με το I. Αυτός ο τρόπος παραγωγής αιτιολογικών σχέσεων τυποποιείται στον αλγόριθμο.

Παράδειγμα 3.5.3: *Θεωρείστε τις οντότητες* $\varepsilon = \{s_1, s_2, s_3\}$ *μαζί με τα εύρη* $F = \{up^1, light^0, relay^0\}$ *και την πληροφορία επιρροής* I *=(2.9) Επιπλέον έστω ότι* C *είναι η οικεία κατάσταση περιορισμών:*

$$light \equiv up(s_1) \wedge up(s_2)$$
$$relay \equiv \neg up(s_1) \wedge up(s_3)$$
$$relay \supset \neg up(s_2)$$

Ο αλγόριθμος μας εφαρμόζεται στα στοιχεία του C σε σύνδεση με I αποτυπώνεται ως ακολούθως:

το ελάχιστο CNF του $light \equiv up(s_1) \wedge up(s_2)$ είναι

$(\neg up(s_1) \vee \neg up(s_2) \vee light \wedge (up(s_1) \vee \neg light) \wedge (up(s_2) \vee \neg light)$

Όσον αφορά το $C_1 = \neg up(s_1) \vee \neg up(s_2) \vee light$ παίρνουμε τα εξής:

- ✓ Στην περίπτωση $j = 1, k = 2$ έχουμε $(up(s_1), up(s_2)) \notin I$
- ✓ Στην περίπτωση $j = 1, k = 3$ έχουμε $up(s_1), light) \in I$ που παράγει

  $up(s_1)$ προκαλεί φως αν $up(s_2)$
- ✓ Στην περίπτωση $j = 2, k = 1$ έχουμε $(up(s_2), up(s_1)) \notin I$
- ✓ Στην περίπτωση $j = 2, k = 3$ έχουμε $up(s_2), light) \in I$ που παράγει

  $up(s_2)$ προκαλεί φως αν $up(s_1)$
- ✓ Στην περίπτωση $j = 3, k = 1$ έχουμε $(light, up(s_1)) \notin I$
- ✓ Στην περίπτωση $j = 3, k = 2$ έχουμε $(light, up(s_2)) \notin I$

Όσον αφορά τη σύνδεση $C_2 = up(s_1) \vee \neg light$ λαμβάνουμε τα ακόλουθα:

- ✓ Στην περίπτωση $j = 1, k = 2$ έχουμε $(up(s_1), light) \in I$ που παράγει $\neg up(s_1)$ προκαλεί $\neg light$ αν $\top$
- ✓ Στην περίπτωση $j = 2, k = 1$ έχουμε $(light, up(s_1)) \notin I$

Όσον αφορά τη σύνδεση $C_3 = up(s_2) \vee \neg light$ λαμβάνουμε τα εξής:

- ✓ Στην περίπτωση $j = 1, k = 2$ έχουμε $up(s_2), light) \in I$ που παράγει

$\neg up(s_2)$ Προκαλεί $\neg$ φως αν $\top$

- ✓ Στην περίπτωση $j = 2, k = 1$ έχουμε $(light, up(s_2)) \notin I$

Το ελάχιστο CNF του ρελέ $relay \equiv \neg up(s_1) \wedge up(s_3)$ είναι $(up(s_1) \vee \neg up(s_3) \vee relay) \wedge (\neg up(s_1) \vee \neg relay) \wedge (up(s_3) \vee \neg relay)$

Όσον αφορά τη σύνδεση $C_1 = up(s_1) \vee \neg up(s_3) \vee relay$ λαμβάνουμε τα εξής:

- ✓ στην περίπτωση $j = 1, k = 2$ έχουμε $(up(s_1), up(s_3)) \notin I$
- ✓ στην περίπτωση $j = 1, k = 3$ έχουμε $(up(s_1).relay) \in I$ που παράγει $\neg up(s_1)$ προκαλεί ρελέ αν $up(s_3)$
- ✓ στην περίπτωση $j = 2, k = 1$ έχουμε $(up(s_3), up(s_1)) \notin I$

- ✓ στην περίπτωση $j=2, k=3$ έχουμε $(up(s_3).relay) \in I$ που παράγει $up(s_3)$ προκαλεί ρελέ αν $\neg up(s_1)$
- ✓ στην περίπτωση $j=3, k=1$ έχουμε $(relay, up(s_1)) \notin I$
- ✓ στην περίπτωση $j=3, k=2$ έχουμε $(relay, up(s_3)) \notin I$

Όσον αφορά τη σύνδεση $C_2 = \neg up(s_1) \vee \neg relay$ λαμβάνουμε τα ακόλουθα:

- ✓ στην περίπτωση $j=1, k=2$ έχουμε $(up(s_1), relay) \in I$ που παράγει

$up(s_1)$ προκαλεί $\neg relay$ αν T

- ✓ στην περίπτωση $j=2, k=1$ έχουμε $(relay, up(s_1)) \notin I$

Όσον αφορά τη σύνδεση $C_3 = up(s_3) \vee \neg relay$ λαμβάνουμε τα εξής:

- ✓ στην περίπτωση $j=1, k=2$ έχουμε $(up(s_3), relay) \in I$ που παράγει

$\neg up(s_3)$ προκαλεί $\neg relay$ αν T

- ✓ στην περίπτωση $j=2, k=1$ έχουμε $(relay, up(s_3)) \notin I$

το ελάχιστο CNF του $relay \supset \neg up(s_2)$ είναι

$\neg relay \vee \neg up(s_2)$

Όσον αφορά τη μόνη σύνδεση $C_1 = \neg relay \vee \neg up(s_2)$ λαμβάνουμε τα εξής:

- ✓ στην περίπτωση $j=1, k=2$ έχουμε $(relay, up(s_2)) \in I$ που παράγει ρελέ προκαλεί $\neg up(s_2)$ αν T
- ✓ στην περίπτωση $j=2, k=1$ έχουμε $(up(s_2), relay,) \notin I$

Συνολικά, το αποτέλεσμα είναι ακριβώς οι εννιά σχέσεις που πήραμε στο προηγούμενο τμήμα με τη διαισθητική ανάλυση των αιτιολογικών σχέσεων.

Σαν μια μικρή άσκηση, ο αναγνώστης μπορεί να επαληθεύσει ότι ο αλγόριθμος που εφαρμόστηκε στα πεδία ορισμού στους διακόπτες και στο ελατήριο (Παράδειγμα 3.4.1.1**)**, παράγει επίσης και το σωστό αποτέλεσμα: την εισαγωγή της πληροφορίας που αποτελείται από τον περιορισμό της κατάστασης $up(s_1) \equiv up(s_2)$ και τη πληροφορία επιρροής $I = \{(up(s_1), up(s_2)), (up(s_2), up(s_1))\}$ ως αποτέλεσμα των τεσσάρων αναμενόμενων αιτιολογικών σχέσεων (Σχέση 3.4.1.3).

Οι αιτιολογικές σχέσεις ε *προκαλεί* ρ *αν* Φ που παράχθηκαν κατά την ανάλυσή μας, έχουν ένα περιορισμένο συντακτικό. Δηλαδή, το πλαίσιο Φ είναι μια σύνδεση των λεκτικών ευρών αντί για ένα αυθαίρετο περίπλοκο τύπο εύρους. Αυτό δεν σημαίνει, ωστόσο, ότι κάποια αιτιολογική πληροφορία που αναπαρίσταται διαφορετικά, δεν μπορεί να αποκτηθεί μέσω της αυτόματης παραγωγής. Αυτό γίνεται γιατί οποιαδήποτε αιτιολογική σχέση μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα λειτουργικά ισοδύναμο σύνολο αιτιολογικών σχέσεων που υπακούνε στον περιορισμό. Αν υποθέσουμε $\Phi_1 \vee \ldots \vee \Phi_n$ είναι ένας διαζευκτικός φυσιολογικός τύπος (DNF για συντομία) κάποιας φόρμουλας ψ τότε μια αιτιολογική σχέση ε *προκαλεί* ρ *αν* ψ και η συλλογή ε *προκαλεί* ρ *αν* Φ_1, ε *προκαλεί* ρ *αν* Φ_n είναι εναλλακτικοί. Από την άλλη πλευρά, το να εκμεταλλευτεί κανείς την συνολική εκφραστικότητα σε ορισμένες περιπτώσεις, οδηγεί σε σημαντικά πιο συμπαγείς αναπαραστάσεις. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη θεώρηση όλων των αυτόματων αποσπασμένων αιτιολογικών σχέσεων για ένα συγκεκριμένο ε και ρ π.χ. ε *προκαλεί* ρ *αν* Φ_1, $\ldots,\varepsilon$ *προκαλεί* ρ *αν* Φ_n και φτιάχνοντας το τύπο ψ σαν συμπαγή ισοδύναμο του $\Phi_1 \vee \ldots \vee \Phi_n$. Τότε το ε *προκαλεί* ρ *αν* ψ αντικαθιστά τις προαναφερθείσες n σχέσεις. Αυτή η πρώτη μετασχηματιστική κατάσταση περιορίζεται σε ένα φυσιολογικό τύπο, τότε η εξάγονται οι αιτιολογικές σχέσεις και τελικά ο ξανά μετασχηματισμός του αποτελέσματος σε μη-φυσιολογική μορφή, ίσως φυσικά απαιτεί εκτεταμένο υπολογισμό. Σε κάποιες καταστάσεις μπορεί να είναι γρηγορότερο το να χρησιμοποιηθούν πιο πολύπλοκα μέσα ώστε να εξαχθούν ευθέως αιτιολογικές σχέσεις από τις καταστάσεις περιορισμού π.χ. με την αποφυγή της παράκαμψης της κατασκευής φυσιολογικών τύπων. Από την άλλη πλευρά, η παραγωγή των αιτιολογικών σχέσεων είναι ένα βήμα προεργασίας που εκτελείται μόνο μια φορά για ένα σταθερό σύνολο περιορισμούς καταστάσεων. Αυτή η υπολογιστική προσπάθεια είναι επομένως μικρότερης σημασίας.

Μιλώντας για πολυπλοκότητα, ένα σχετικά σημαντικό θέμα αφορά στον αριθμό των αιτιολογικών σχέσεων που παρήχθησαν από ένα σύνολο περιορισμού κατάστασης. Αυτός ο αριθμός είναι στη χειρότερη περίπτωση εκθετικός σε ότι αφορά το μέγεθος της εισαγωγής πληροφορίας. Ο λόγος είναι ότι υπάρχουν φόρμουλες που επιτρέπουν μόνο CNF εκθετικά αυξημένου μήκους. Επιπλέον, μέχρι δευτέρου βαθμού πολλές σχέσεις υπάρχουν για μια μόνο σύνδεση, δηλαδή, αν όλα τα αναμεμειγμένα εύρη έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν το ένα το άλλο. Παρόλη την αρνητική επίδραση, ευτυχώς υπάρχει ένα αποφασιστικό χαρακτηριστικό εξαιτίας του οποίου, ειδικά σε μεγάλα πεδία ορισμού, ο αριθμός των σχέσεων είναι μικρός συγκρινόμενος με τη χειρότερη περίπτωση: οι περιορισμοί των καταστάσεων δεν παρεμβαίνουν όταν καθορίζουν αιτιολογικές σχέσεις. Γενικά, τα μεγάλα πεδία ορισμού τείνουν να είναι τοπικά δομημένα έτσι ώστε κάθε περιορισμός κατάστασης να σχετίζεται μόνο με ένα μικρό κλάσμα του ολόκληρου συνόλου των ευρών. Πιο συγκεκριμένα, έστω k ότι είναι το μέγιστο μέγεθος περιορισμού της κατάστασης και n ο ολικός αριθμός. Τότε ο αριθμός των απαιτούμενων αιτιολογικών σχέσεων είναι του μεγέθους $O(2^k \cdot n)$. Δεδομένου ότι το k παραμένει σταθερό με αυξανόμενο μέγεθος πεδίου ορισμού, ο αριθμός των αιτιολογικών σχέσεων επομένως είναι γραμμικός με τον αριθμό των περιορισμών των καταστάσεων. Π.χ. στο παράδειγμα μας που περιλαμβάνει n υπο-κυκλώματα καθένας από τους n περιορισμούς κατάστασης συσχετίζει μόνο τρία εύρη. Συνεπώς, όπως έχουμε δει δίνουν αφορμή για ένα γραμμικό αριθμό αιτιολογικών σχέσεων ($4 \cdot n$ για να είμαστε ακριβείς). Παρεμπιπτόντως το γεγονός ότι η περιορισμοί κατάστασης δεν παρεμβαίνουν στον καθορισμό αιτιολογικών σχέσεων λύνει το δεύτερο πρόβλημα που αναφέρθηκε στην εισαγωγή στο πρόβλημα διακλάδωσης. Καμία υπάρχουσα αιτιολογική σχέση δεν απαιτεί τροποποίηση ή χρειάζεται να μετακινηθεί, αν προστεθεί ο περιορισμός κατάστασης. Εισάγοντας ένα νέο ζευγάρι διακόπτη-λυχνίας $up(s_{n+1}), light_{n+1}$ στο παράδειγμα που μόλις αναφέρθηκε, για παράδειγμα, προκαλείται η πρόσθεση τεσσάρων νέων αιτιολογικών σχέσεων αλλά δεν απαιτούνται περαιτέρω αλλαγές.

Μέχρι τώρα περιοριστήκαμε στην εξαγωγή των αιτιολογικών σχέσεων από τους περιορισμούς της κατάστασης χωρίς ποσοτικοποίηση. Όσον αφορά τη γενική υπόθεση, παρατηρήστε πρώτα ότι αφού υποθέτουμε την περατότητα των συνόλων των οντοτήτων ε, είναι πάντα πιθανόν να ξαναγραφτεί κάποια κατάσταση περιορισμού έτσι ώστε να γίνει χωρίς ποσοτικοποίηση. Δηλαδή, κάθε υπο-φόρμουλα $\forall x.F$ αντικαθίσταται από $\wedge_{e \in \varepsilon} F\{x \mapsto e\}$ και κάθε υπο-φόρμουλα $\exists x.F$ αντικαθίσταται από $\vee_{e \in \varepsilon} F\{x \mapsto e\}$. Όσο παράδοξο και αν είναι, αυτό είναι αναπόφευκτο όταν αντιμετωπίζεις απεριόριστες καταστάσεις περιορισμού και πληροφορία επιρροής. Για να δούμε γιατί, θεωρήστε κάποιο αυθαίρετο τύπο όπως $\forall x \exists y \forall z. f(x,y,z)$ ως κατάσταση περιορισμού. Το ποιες αιτιολογικές σχέσεις καθορίζονται από τους περιορισμούς αυτούς εξαρτάται από το πως αλληλεπιδρούν τα διάφορα πιθανά παραδείγματα $f(e_1,e_2,e_3)$. Κάθε ένα από τα παραδείγματα, ίσως συμπεριφερθεί διαφορετικά από αυτή την άποψη. Επομένως, δεν υπάρχει καλύτερος τρόπος από τη στήριξη μιας κατάστασης περιορισμού και το να προχωρήσει κανείς όπως παραπάνω. Από την άλλη πλευρά, είναι πιθανόν να εκμεταλλευτούμε την εκφραστικότητα των αιτιολογικών σχέσεων που έχουν μεταβλητές, εάν ένας περιορισμός μίας κατάστασης και η πληροφορία επιρροής υπακούει καλώς ορισμένους περιορισμούς. Στο ακόλουθο τμήμα, συζητάμε δυο τέτοιες τάξεις που θεωρούμε γενικής σημασίας έτσι ώστε πολλά κερδίζονται από την ειδική μεταχείρισή τους.

Πρώτα, θεωρούμε περιορισμούς καταστάσεων του τύπου $\forall x_1 \ldots \forall x_{n.}\ F$ (ή $\forall \bar{x}.F$ για συντομία) με την υποφόρμουλα F που είναι χωρίς ποσοτικοποίηση. Ας υποθέσουμε περαιτέρω ότι για κάθε ατομική έκφραση εύρους $f\left[\bar{x}\right]$ που συμβαίνει στο F η βασική πληροφορία επιρροής δεν διαφέρει αναφορικά με διαφορετικά παραδείγματα $f\left[\bar{e}\right]$. Τότε οι αιτιολογικές σχέσεις καθορίζονται από αυτό τον περιορισμό και η πληροφορία επιρροής μπορεί να αποκτηθεί με την εφαρμογή της διαδικασίας μας στην υπο-φόρμουλα F με όλα τα συμβάντα των μεταβλητών που θεωρούνται ως (ξεχωριστές) οντότητες. Ως απλό παράδειγμα, θεωρήστε τον περιορισμό της κατάστασης $\forall x[down(x) \equiv \neg up(x)]$ και πληροφορία επιρροής $I = \{(up(x), down(x)), (down(x), up(x))\}$. Τέσσερις αιτιολογικές σχέσεις εξάγονται από την αντίστοιχο περιορισμό χωρίς ποσοτικοποίηση, $down(x) \equiv \neg up(x)$ δηλαδή:

$down(x)$ προκαλεί $\neg up(x)$ αν T

$\neg down(x)$ προκαλεί $up(x)$ αν T

$up(x)$ προκαλεί $\neg down(x)$ αν T

$\neg up(x)$ προκαλεί $down(x)$ αν T

Δηλώνοντας ότι κάθε οντότητα γίνεται *up* (ή όχι) επίσης δεν γίνεται *down* (ή όχι αντίστοιχα) και αντίστροφα.

Δεύτερον, και πιο πολύπλοκα, αναλύσαμε τους περιορισμούς της κατάστασης στους οποίους κάθε εμφάνιση ποσοτικοποίησης είναι του τύπου

$\forall \bar{x}.\ell[\bar{x}]$ ή του τύπου $\exists \bar{x}.\ell[\bar{x}]$ όπου $\ell[\bar{x}]$ είναι μια (πιθανώς ακυρωμένη) έκφραση εύρους με ελεύθερες μεταβλητές $\bar{x}$. Επιπλέον, υποθέτουμε ότι, για όποια $\ell[\bar{x}]$, η βασική πληροφορία επιρροής δεν διαφέρει αναφορικά σε διαφορετικά παραδείγματα $\| \ell[\bar{e}] \|$. Όταν υπολογίζουμε το ελάχιστο CNF του περιορισμού της κατάστασης που περιορίζεται με αυτό τον τρόπο, δημιουργούνται οι υπο - φόρμουλες $\forall \bar{x}.\ell[\bar{x}]$ και $\exists \bar{x}.\ell[\bar{x}]$ σαν να ήταν συνηθισμένα λεκτικά εύρη. Αν επιπλέον όποιο $\neg\forall \bar{x}.\ell[\bar{x}]$ αντικαθίσταται από $\exists \bar{x}.\neg\ell[\bar{x}]$ και όποιο $\neg\exists \bar{x}.\ell[\bar{x}]$από $\forall \bar{x}.\neg\ell[\bar{x}]$, τότε κάθε ένωση καταλήγει CNF είναι μία διάζευξη αποτελούμενη από βασικά λεκτικά και εκφράσεις του τύπου $\forall \bar{x}.\ell[\bar{x}]$ και $\exists \bar{x}.\ell[\bar{x}]$. Όταν παράγουμε αιτιολογικές σχέσεις, οι υπο-φόρμουλες με ποσοτικοποίηση αντιμετωπίζονται ως ακολούθως: η αιτία για την οποία έγινε ψευδείς ο τύπος $\forall \bar{x}.\ell[\bar{x}]$ πρέπει να είναι η εμφάνιση κάθε επίδρασης $\neg\ell[\bar{e}]$. Επομένως, το ίδιο το $\neg\ell[\bar{x}]$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν το επιτρέπει η επιρροή, ως επίδραση πρόκλησης σε μια αιτιολογική σχέση. Η αιτία για μια φόρμουλα $\exists \bar{x}.\ell[\bar{x}]$ να είναι ψευδής πρέπει να είναι η εμφάνιση οποιαδήποτε επίδρασης $\neg\ell[\bar{e}]$ έτσι ώστε $\forall \bar{x}.\neg\ell[\bar{x}]$ παραμένει. Επομένως, $\neg\ell[\bar{x}]$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν κινητική επίδραση σε μια αιτιολογική σχέση της οποίας το πλαίσιο περιλαμβάνει $\forall \bar{x}.\neg\ell[\bar{x}]$. Η διόρθωση της παραβίασης του περιορισμού της κατάστασης με την ικανοποιητική φόρμουλα $\forall \bar{x}.\ell[\bar{x}]$ επιτυγχάνεται με την ικανοποίηση όλων των περιστατικών του $\ell[\bar{x}]$. Επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν έμμεση επίπτωση σε μια αιτιολογική σχέση. Διορθώνοντας τη παραβίαση της κατάστασης περιορισμού με την ικανοποίηση μιας φόρμουλας $\exists \bar{x}.\ell[\bar{x}]$ επιτυγχάνεται με την ικανοποίηση ακόμα ενός περιστατικού του $\ell[\bar{x}]$. Επομένως το $\ell[\bar{x}]$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν έμμεση επίπτωση σε μια αιτιολογική σχέση της οποίας το πλαίσιο περιλαμβάνει $\forall \bar{x}.\neg\ell[\bar{x}]$.

Παράδειγμα 3.5.4: *Θεωρήστε τον περιορισμό της κατάστασης $C = light \equiv \forall x.up(x)$ που εκφράζει τη σειριακή σύνδεση όλων των εμπλεκόμενων διακοπτών και της λυχνίας φωτός.*

Έστω $I=\{(up(x),light)\}$ *τότε ο εκτεταμένος αλγόριθμος εντοπίζεται ως ακολούθως:*
Το ελάχιστο CNF του C είναι:

$$(\exists x.\neg up(x)\vee light)\wedge(\forall y.up(y)\vee\neg light)$$

- Αναφορικά με τη σύνδεση $C_1=\exists x.\neg up(x)\vee light$ λαμβάνουμε τα ακόλουθα:
  - στην περίπτωση $j=1,k=2$ έχουμε $(up(x),light)\in I$ που παράγει $up(x)$ προκαλεί φως αν $\forall x.up(x)$
  - στην περίπτωση $j=2,k=1$ έχουμε $(light,up(x))\notin I$
- Αναφορικά με τη σύνδεση $C_2=\forall_y.up(y)\vee\neg light$ λαμβάνουμε τα εξής:
  - στην περίπτωση $j=1,k=2$ έχουμε $(up(y),light)\in I$ που παράγει $\neg up(y)$ προκαλεί $\neg light$ αν T
  - στην περίπτωση $j=2,k=1$ έχουμε $(light,up(y))\notin I$

Επομένως, κλείνοντας οποιονδήποτε διακόπτη προκαλείται φως αν όλοι οι άλλοι διακόπτες είναι κλειστοί. Και αντίθετα, ανοίγοντας οποιονδήποτε διακόπτη σβήνει το φως ανεξάρτητα από άλλους διακόπτες όπως θα περίμενε κάποιος.

Με την έκταση του βασικού αλγόριθμου μας καταλήγουμε στη συζήτηση, στο πως οι αιτιολογικές σχέσεις μπορούν να παραχθούν αυτόματα όποτε να παρέχεται η κατάλληλη πληροφορία επιρροής. Δεν σημαίνει ωστόσο ότι το τελευταίο είναι πάντα πιθανό με τη βασική μας έννοια της πληροφορίας επιρροής. Περισσότερο πολύπλοκα μέσα για να εξειδικεύσουν πιθανή επιρροή μπορεί να απαιτούνται σε κάποια πεδία ορισμού. π.χ. ένα εύρος που έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει άλλο ένα εύρος μπορεί να εξαρτάται από το αν το πρώτο συμβαίνει καταφατικά ή αρνητικά. Για να φανεί αυτό, η έννοια της πληροφορίας επιρροής πρέπει να επεκταθεί ώστε να συσχετίσει τα λεκτικά εύρη και όχι απλά εύρη. Περισσότερη γενίκευση ίσως επιτρέπει για περιορισμό πιθανής επιρροής σε καταστάσεις εκφρασμένες από αυθαίρετες φόρμουλες εύρους. Το ποια είναι η πολυπλοκότητα που απαιτείται εξαρτάται από το εν λόγω πεδίο ορισμού. Όσο πιο απλή είναι η έννοια της πιθανής επιρροής – δεδομένου ότι επαρκεί – τόσο περισσότερα είναι τα οφέλη από την αυτόματη εξαγωγή των αιτιολογικών σχέσεων, συγκρινόμενα με αυτά που σχεδιάζονται με το χέρι.

4. Μη ελαχιστοποιημένες διάδοχες καταστάσεις

Οι προσπάθειες να επιλυθεί το πρόβλημα διακλάδωσης που συζητήσαμε πριν τις αιτιολογικές σχέσεις, βασίστηκαν στην ιδέα της ελαχιστοποίησης αλλαγής στο μεγαλύτερο λογικό βαθμό. Η εφαρμογή των αιτιολογικών σχέσεων δεν εκτιμά – τουλάχιστον a priori - μια παρόμοια έννοια. Αφού η αρχή της ελαχιστοποίησης της αλλαγής θεωρείται ευρέως σημαντική για το πρόβλημα διακλάδωσης στη βιβλιογραφία, το παρόν κομμάτι αφιερώνεται στην ανάλυση του αν και πως συνδέονται αυτή η αρχή και η διαδοχική εφαρμογή των αιτιολογικών σχέσεων. Θα αποδειχτεί ότι οι καταστάσεις αιτιολογικής διαδοχής καλύπτουν όλες τις καταστάσεις με ελάχιστη απόσταση σε κάποιους προκαταρκτικούς διαδόχους στην ικανοποίηση της κατάστασης περιορισμών ενώ σέβονται την έννοια του τυχαίου. Θα δείξουμε ακόμα ότι το αντίστροφο δεν ισχύει. Δηλαδή, απαιτώντας την απλότητα αποδεικνύεται αποτυχία στην ερμηνεία των πιθανών καταστάσεων αιτιολογικής διαδοχής σε κάποια πεδία ορισμού. Αυτό το αποτέλεσμα συναγωνίζεται την κοινή πεποίθηση στην αναγκαιότητα της ελαχιστοποίησης αλλαγής όταν έχουμε να κάνουμε με το πρόβλημα διακλάδωσης.

Για μια γενική λύση στο πρόβλημα διακλάδωσης όπως έχουμε δει μέχρι τώρα, οι απλές καταστάσεις περιορισμών περιέχουν ανεπαρκή πληροφόρηση. Μια κατάλληλη στρατηγική απλότητας άρα απαιτεί επιπλέον γνώση του πεδίου ορισμού. Ο σκοπός της γνώσης είναι να βοηθήσει στο διαχωρισμό των προκυπτόντων συνεπειών οι οποίες αντιστοιχούν στις πραγματικές έμμεσες επιπτώσεις, από αυτές που είναι απλά λογικές συνέπειες. Για παράδειγμα, $up(s_1) \wedge up(s_2) \supset light$ προέρχεται από τον περιορισμό της κατάστασης $light \equiv up(s_1) \wedge up(s_2)$ δείχνει μια αιτιολογικά σωστή συνέπεια, αν και το $up(s_1) \wedge \neg light \supset \neg up(s_2)$ που προέρχεται από τον ίδιο περιορισμό δεν το κάνει. Αν και είναι λογικά ισοδύναμο, οι δυο συνέπειες πρέπει να διακριθούν όταν ελαχιστοποιείται η αλλαγή όταν υπολογίζουμε τις έμμεσες επιπτώσεις. Οι αιτιολογικές σχέσεις υπηρετούν αυτό το σκοπό αν θεωρηθούν σαν άμεσες επιπτώσεις. Αντίθετα με τις κλασσικές υλιστικές επιπτώσεις, αυτές οι άμεσες συνέπειες δεν πρέπει να εφαρμόζονται σε αντίθετη κατεύθυνση. Δηλαδή, ενώ οι δυο φόρμουλες εύρους $F \wedge \ell_1 \supset \ell_2$ και $F \wedge \neg \ell_2 \supset \neg \ell_1$ είναι εναλλακτικές, η σημασιολογία των ανταποκρινόμενων σχέσεων ℓ_1 *προκαλεί* ℓ_2 *αν* F και $\neg \ell_2$ *προκαλεί* $\neg \ell_1$ *αν* F θα διαφέρουν επίσης στη λογική τους ανάγνωση. Αυτή η ανάγνωση των αιτιολογικών σχέσεων σαν άμεσες συνέπειες θα είναι η βάση για ένα τυπικό ορισμό της ελαχιστοποίησης αλλαγής όσον αφορά την αιτιολογική γνώση. Αυτό, αρχικά απαιτεί μια έννοια του πως εφαρμόζονται οι αιτιολογικές σχέσεις σαν κανόνες συμπεράσματος. Παρόμοια με τη λειτουργική ανάγνωση των αιτιολογικών σχέσεων, αυτό απαιτεί τη διάκριση μεταξύ του πλαισίου και του συνόλου των πραγματικά πραγματοποιημένων επιδράσεων. Για συμπερασματικούς σκοπούς, το πρώτο δίνεται σαν σύνολο αυθαίρετου τύπου εύρους Ψ ενώ το τελευταίο είναι όπως πριν, ένα σύνολο λεκτικών ευρών Θ. Στον ορισμό που ακολουθεί, αν F είναι μια φόρμουλα εύρους τότε λέμε ότι, ένα σύνολο φόρμουλας ευρών Ψ συνεπάγεται F αν το F είναι αληθές σε όλες τις καταστάσεις που ικανοποιούν το Ψ. Με το $Th(\psi)$ συμβολίζουμε το σύνολο όλων των τύπων που προέρχονται από το Ψ (δηλαδή, τη θεωρία του Ψ). Οι συνέπειες που απορρέουν από ένα ζευγάρι πλαισίου-επίδρασης με δεδομένες τις βασικές αιτιολογικές σχέσεις, ορίζεται τότε ως ακολούθως.

<u>Ορισμός 4.1:</u> *Έστω ε και F ότι είναι σύνολα οντοτήτων και ονόματα ευρών αντίστοιχα και R ένα σύνολο αιτιολογικών σχέσεων. Αν Ψ είναι σύνολο τύπων ευρών και Θ σύνολο λεκτικών ευρών τότε η θεωρία που προκαλείται από το (Ψ, Θ) σχετικό με το R, γράφεται $Th_R(\Psi,\Theta)$ και είναι το μικρότερο ζευγάρι ($\hat{\psi},\hat{\Theta}$) έτσι ώστε:*

- $\psi \subseteq \hat{\psi}$ και $\Theta \subseteq \hat{\Theta}$;
- $\hat{\psi} = Th(\hat{\psi})$; και
- Για κάθε περιστατικό ε *προκαλεί* ρ *αν* $\Phi \in R$ όπως $\Phi \in \hat{\psi}$ και $\varepsilon \in \hat{\Theta}$ έχουμε $\rho \in \hat{\psi}$ και $\rho \in \hat{\Theta}$.

Αν $Th_R(\Psi,\Theta) = (\hat{\psi},\hat{\Theta})$ και $F \in \hat{\psi}$ τότε αυτό δηλώνεται από $(\psi,\Theta) \parallel\!\!-_R F$

Είναι εύκολο να δούμε ότι $\parallel\!\!-_R$ είναι μονοτονικό, δηλαδή, $\Psi_1 \subseteq \Psi_2$ και $\Theta_1 \subseteq \Theta_2$ συνεπάγεται $\{F : (\psi_1,\Theta_1) \parallel\!\!-_R F\} \subseteq \{F : (\psi_2,\Theta_2) \parallel\!\!-_R F\}$.

Παράδειγμα 4.1: *Έστω* $\varepsilon = \{s_1, s_2\}$ *και* $F = \{up^1, light^0\}$ *και έστω* R *αποτελείται από τις αιτιολογικές σχέσεις που αντικατοπτρίζουν τις αιτιολογικές ανεξαρτησίες μεταξύ των δυο διακοπτών και τη λυχνία λάμπας*

$up(s_1)$ *προκαλεί φως αν* $up(s_2)$ $\neg up(s_1)$ *προκαλεί* $\neg light$ αν T

$up(s_2)$ *προκαλεί φως αν* $up(s_1)$ $\neg up(s_2)$ *προκαλεί* $\neg light$ *αν* T

Σχέση 4.1

Τώρα, θεωρήστε το σύνολο $\psi_1 = \{up(s_1) \wedge up(s_2)\}$ μαζί με $\Theta = \{up(s_1)\}$. Τότε, $Th_R(\psi_1, \Theta) = (Th(\{up(s_1) \wedge up(s_2), light\}), \{up(s_1), light\})$; γι' αυτό το λόγο, $(\psi_1, \Theta) \| -_R light$. Σε αντίθεση υποθέστε $\psi_2 = \{up(s_1) \wedge \neg light\}$ και όπως προηγούμενα $\Theta = \{up(s_1)\}$ τότε $Th_R(\psi_2, \Theta) = (Th(\{up(s_1) \wedge \neg light\}), \{up(s_1)\})$ αφού καμία αιτιολογική σχέση δεν εφαρμόζεται. Έτσι, $(\psi_2, \Theta) \not\| -_R \neg up(s_2)$.

Η έννοια της εκτέλεσης του συμπεράσματος στη βάση των αιτιολογικών σχέσεων μπορεί να εκμεταλλευτεί την κατασκευή του σταθερού χαρακτηρισμού των διαδοχικών καταστάσεων που εξηγεί τις έμμεσες επιπτώσεις ενώ τηρείται η αιτιολογική πληροφορία. Μιλώντας ανεπίσημα, ας υποθέσουμε ότι μια πράξη με άμεση επίδραση E εκτελείται στην κατάσταση S. Τότε μια κατάσταση θεωρείται διάδοχος αν και μόνο αν τα ακόλουθα ισχύουν. Το σύνολο T περιλαμβάνει το E, T μαζί με το E και τις βασικές αιτιολογικές σχέσεις δεν συνεπάγονται ασυνέπεια και κάθε εύρος αλλάζει από το S στο T είναι περιορισμένο σε κάποια αιτιολογική σχέση. Η τελευταία συνθήκη αντικατοπτρίζει την ιδέα της ελαχιστοποίησης αλλαγής.

<u>Ορισμός 4.2:</u> *Έστω* (E, F, A, L) *ότι είναι ένα βασικό πεδίο ορισμού και* R *ένα σύνολο αιτιολογικών σχέσεων. Αν* S *είναι μια κατάσταση και* a *μια πράξη τότε η κατάσταση* T *είναι μια αιτιολογική διάδοχος ελαχιστοποίησης αλλαγής του* S *αν και μόνο αν ισχύουν τα ακόλουθα: το σύνολο* L *να περιέχει ένα περιστατικό εφαρμόσιμου νόμου πράξης* a *μετασχηματίζει* C *σε* E *έτσι ώστε:*

$$T = \{\ell : ((S \cap T) \cup E, E) \| -_R \ell\}$$

Σχέση 4.2

Δηλαδή το T είναι καθορισμένο σημείο της λειτουργίας του $\lambda T.\{\ell : ((S \cap T) \cup E, E) \| -_R \ell\}$ δεδομένων των S και E.

Βιβλιογραφία

[1] M. Ginsberg, D. Smith, Reasoning about action I: a possible worlds approach, Artificial Intelligence 35 (1988) 165–195.

[2] A.C. Kakas, R.S. Miller, F. Toni, E-RES: reasoning about actions, events and observations, in: Proceedings of LPNMR2001, Springer-Verlag, Berlin, 2001, pp. 254–266.

[3] Kakas, R. Miller, A Simple Declarative Language for Describing Narratives with Actions, The Journal of Logic Programming 31 (1–3) (1997) 157–200 (special issue on reasoning about action and change).

[4] R.A. Kowalski, Database updates in the event calculus, Journal of Logic Programming (1992).

[5] V. Lifshitz, Towards a metatheory of action, in: J.F. Allen, R. Fikes, E. Sandewall, (Eds.), Proceedings of the International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, Cambridge, MA, 1991, pp. 376–386.

[6] V. Lifschitz, Towards a metatheory of action, in: Proceedings of KR_91, Cambridge, MA, 1991, pp. 376–386.

[7] N. McCain, H. Turner, A causal theory of ramifications and qualifications, in: Proceedings of IJCAI-95, Montreal, Canada, August 1995, pp. 1978–1984.

[8] J. McCarthy, P.J. Hayes, Some philosophical problem from the standpoint of artificial intelligence, in: B. Meltzer, D. Mitchie (Eds.), Machine Intelligence, vol. 4, American Elsevier, 1969, pp. 463–502.

[9] R. Miller, M. Shanahan, The event calculus in classical logic—alternative axiomatisations, Linking Electronic Articles in Computer and Information Science 4 (16) (1999).

[10] N. Papadakis, D. Plexousakis, Action theories in temporal databases, in: Proceedings of the 8th Panhellenic Conference on Informatics, Cyprus, November 2001, pp. 254–264.

[11] N. Papadakis, D. Plexousakis, The ramification and qualification problems in temporal databases, in: Proceedings of the 2nd Hellenic Conference on AI, Lecture Notes on Artificial Intelligent vol. 2308, 10–11 April 2002, Thessaloniki, Greece, pp. 18–30.

[12] N. Papadakis, D. Plexousakis, Action with duration and constraints: the ramification problem in temporal databases, in: 14th IEEE ICTAI, 2002 , Washington, DC.

[13] N. Papadakis, D. Plexousakis, Action with duration and constraints: the ramification problem in temporal databases, International Journal of Artificial Intelligent Tools (IJTAI) (special issue on selected papers of ICTAI 2002), in press.

[14] D. Plexousakis, J. Mylopoulos, Accomodating integrity constraints during database design, in: Proceedings of EDBT 1996, Avignon, France, 1996, pp. 497–513.

[15] J. Pinto, R. Reiter, Temporal reasoning in logic programming: a case for the situation calculus, in: Proceedings of 10th International Conference on Logic Programming, Budapest, Hungary, June 21–24, 1993.

[16] M. Thielscher, Ramification and causality, Artificial Intelligence 89 (1–2) (1997) 317–364.

[17] M. Thielscher, Challenges for action theories, 2000