

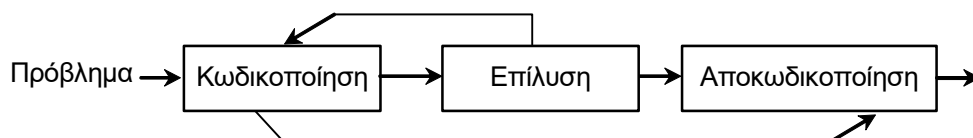
2, τα οποία είναι αναμενόμενο να μην είναι αμοιβαία αποκλειόμενα μεταξύ τους (ειδάλλως θα συνέβαινε το ίδιο και με τις ενέργειες που επιλέχθηκαν στο επίπεδο 3).

Τα γεγονότα $on(a,table)$ και $clear(b)$ επιτυγχάνονται μόνο από ενέργειες $noop$, οι οποίες μάλιστα δεν είναι αμοιβαία αποκλειόμενες μεταξύ τους, ενώ τα γεγονότα $clear(b)$ και $on(b,table)$ επιτυγχάνονται από την ενέργεια $move-B-from-A-to-table$, η οποία δεν είναι αμοιβαία αποκλειόμενη με τις ενέργειες $noop$. Πλέον όμως η αναζήτηση έχει φθάσει στο επίπεδο 0, άρα το πρόβλημα λύθηκε και οι ενέργειες που εμφανίστηκαν στη λύση του (των ενεργειών $noop$ εξαιρουμένων) είναι η $move-B-from-A-to-table$ (πρώτο επίπεδο ενεργειών) και $move-A-from-table-to-B$ (δεύτερο επίπεδο ενεργειών).

Κλείνοντας αυτή την ενότητα πρέπει να σημειωθεί ότι ο σχεδιαστής GRAPHPLAN βρίσκει βέλτιστα πλάνα, όσον αφορά τον αριθμό των βημάτων. Με τον όρο "βήμα" χαρακτηρίζονται τα επίπεδα των ενεργειών του γράφου σχεδιασμού, κάθε ένα από τα οποία μπορεί να περιέχει περισσότερες της μίας ενέργειες στο τελικό πλάνο-λύση του προβλήματος. Έτσι θεωρείται ότι ο GRAPHPLAN βρίσκει βέλτιστα παράλληλα πλάνα, δεν εγγυάται ωστόσο ότι θα βρει βέλτιστα γραμμικοποιημένα πλάνα, δηλαδή πλάνα με τον ελάχιστο αριθμό ενεργειών.

17.2 Ο Σχεδιασμός σαν Πρόβλημα Ικανοποίησης Προτάσεων

Τα προβλήματα σχεδιασμού μπορούν να αντιμετωπισθούν σαν *προβλήματα ικανοποίησης προτάσεων* και με τη χρήση τεχνικών κυρίως στοχαστικής αλλά και συστηματικής αναζήτησης για την αντιμετώπισή τους. Η αρχή έγινε με το σύστημα σχεδιασμού SATPLAN, στο οποίο η κωδικοποίηση του προβλήματος σχεδιασμού σε πρόβλημα ικανοποίησης προτάσεων γινόταν μη-αυτόματα, ενώ άλλα συστήματα, όπως το BLACKBOX αλλά και το MEDIC, αυτοματοποίησαν το μετασχηματισμό των προβλημάτων. Τα συστήματα αυτής της κατηγορίας χαρακτηρίζονται ως *σχεδιαστές ικανοποίησης προτάσεων (SAT-based systems)*. Η γενική αρχιτεκτονική της λειτουργίας τους φαίνεται στο Σχήμα 17.4.



Σχήμα 17.4: Γενική αρχιτεκτονική λειτουργίας των σχεδιαστών ικανοποίησης προτάσεων.

Η λειτουργία ενός συστήματος SAT βασίζεται σε τρία στάδια, τα δύο πρώτα εκ των οποίων μπορεί να επαναληφθούν πολλές φορές. Στο στάδιο της *κωδικοποίησης* γίνεται μια υπόθεση σχετικά με τον αριθμό των βημάτων του πλάνου-λύσης του προβλήματος σχεδιασμού και στη συνέχεια αυτό κωδικοποιείται σαν πρόβλημα ικανοποίησης προτάσεων σε μορφή *σύνδεξης διαζεύξεων (conjunctive normal form, CNF)*. Ανάλογα με τη συγκεκριμένη υλοποίηση, με τον όρο "βήμα" ενδέχεται να εννοούνται είτε μεμονωμένες ενέργειες, είτε χρονικές στιγμές, στις οποίες μπορεί να εκτελεστούν περισσότερες από μια ενέργειες παράλληλα.

Στο στάδιο της *επίλυσης* εφαρμόζονται στοχαστικές ή συστηματικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος. Εάν κάτι τέτοιο δεν καταστεί δυνατό, θεωρείται ότι το πρόβλημα δεν μπορεί να λυθεί στον επιλεγμένο αριθμό βημάτων, οπότε ο αριθμός αυτός αυξάνει κατά ένα θετικό ακέραιο αριθμό (συνήθως μονάδα) και εκτελούνται ξανά τα στάδια της κωδικοποίησης και της επίλυσης. Μόλις βρεθεί λύση, δηλαδή μια ανάθεση τιμών στις μεταβλητές του προβλήματος που να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς, η ανάθεση αυτή μαζί με τον πίνακα συμβόλων που προέκυψε από το στάδιο της κωδικοποίησης τροφοδοτούν το στάδιο της *αποκωδικοποίησης*, το οποίο μεταφράζει την ανάθεση τιμών σε ένα έγκυρο πλάνο-λύση του προβλήματος σχεδιασμού.

17.2.1 Κωδικοποίηση Προβλημάτων

Υπάρχουν διάφορες αναπαραστάσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για μετατροπή των προβλημάτων σχεδιασμού σε προβλήματα ικανοποίησης προτάσεων. Η επιλογή της αναπαράστασης είναι κρίσιμη, αφού επηρεάζει καθοριστικά την απόδοση της διαδικασίας επίλυσης. Ανεξάρτητα από τη συγκεκριμένη επιλογή, όλα τα γεγονότα και οι ενέργειες που εμφανίζονται στην κωδικοποίηση χαρακτηρίζονται από έναν ακέραιο αριθμό, ο οποίος δηλώνει τη χρονική στιγμή στην οποία αναφέρονται. Η χρονική στιγμή 0 αντιστοιχεί στα γεγονότα της αρχικής κατάστασης, άρτιες χρονικές στιγμές αναφέρονται γενικά σε γεγονότα ενώ περιττές χρονικές στιγμές αναφέρονται σε ενέργειες, κατά τρόπο παρόμοιο με αυτό της κωδικοποίησης του GRAPHPLAN.

Η πιο απλή κωδικοποίηση είναι η ακόλουθη:

- Η σύζευξη των γεγονότων της αρχικής κατάστασης πρέπει να αληθεύει. Στο πρόβλημα με τους δύο κύβους (Σχήμα 17.2) ορίζεται η ακόλουθη σύζευξη (οι δείκτες δηλώνουν τη χρονική στιγμή στην οποία αναφέρονται τα γεγονότα και οι ενέργειες):

$$on(b,a)_0 \wedge on(a,table)_0 \wedge clear(b)_0$$

- Η σύζευξη των γεγονότων των στόχων πρέπει επίσης να αληθεύει. Εάν υποθεθεί ότι στο πρόβλημα με τους 2 κύβους αναζητείται ένα πλάνο με $n=2$ βήματα, τότε το τελευταίο επίπεδο γεγονότων έχει αριθμό $2 \cdot n=4$, οπότε προκύπτει η ακόλουθη σύζευξη:

$$on(a,b)_4 \wedge on(b,table)_4 \wedge clear(a)_4$$

- Οι ενέργειες συνεπάγονται την ισχύ των προϋποθέσεων τους και των αποτελεσμάτων τους. Εάν μια ενέργεια εφαρμοστεί τη χρονική στιγμή t (όπου t περιττός αριθμός μεταξύ 1 και $2 \cdot n-1$), τότε η εκτέλεση της ενέργειας συνεπάγεται ότι οι προϋποθέσεις της ισχύουν τη χρονική στιγμή $t-1$, ενώ τα αποτελέσματά της και οι μη-διαγραφόμενες προϋποθέσεις της ισχύουν τη χρονική στιγμή $t+1$. Στο πρόβλημα με τους 2 κύβους, η υπόθεση ότι η ενέργεια *move-A-from-table-to-B* θα εκτελεστεί τη χρονική στιγμή 3 έχει σαν αποτέλεσμα ότι τα γεγονότα *on(a,table)*, *clear(a)* και *clear(b)* ισχύουν τη χρονική στιγμή 2, ενώ τα γεγονότα *on(a,b)*, *clear(a)*, $\neg on(a,table)$ και $\neg clear(b)$ ισχύουν τη χρονική στιγμή 4.

Η συνεπαγωγή μπορεί να γραφεί:

$$\begin{aligned} & \text{move-}A\text{-from-table-to-}B_3 \Rightarrow \\ & \text{on}(a,\text{table})_2 \wedge \text{clear}(a)_2 \wedge \text{clear}(b)_2 \wedge \\ & \text{on}(a,b)_4 \wedge \text{clear}(a)_4 \wedge \neg \text{on}(a,\text{table})_4 \wedge \neg \text{clear}(b)_4 \end{aligned}$$

ή ισοδύναμα σε μορφή σύζευξης διαζεύξεων:

$$\begin{aligned} & (\neg \text{move-}A\text{-from-table-to-}B_3 \vee \text{on}(a,\text{table})_2) \wedge \\ & (\neg \text{move-}A\text{-from-table-to-}B_3 \vee \text{clear}(a)_2) \wedge \\ & (\neg \text{move-}A\text{-from-table-to-}B_3 \vee \text{clear}(b)_2) \wedge \\ & (\neg \text{move-}A\text{-from-table-to-}B_3 \vee \text{on}(a,b)_4) \wedge \\ & (\neg \text{move-}A\text{-from-table-to-}B_3 \vee \text{clear}(a)_4) \wedge \\ & (\neg \text{move-}A\text{-from-table-to-}B_3 \vee \neg \text{on}(a,\text{table})_4) \wedge \\ & (\neg \text{move-}A\text{-from-table-to-}B_3 \vee \neg \text{clear}(b)_4) \end{aligned}$$

Προτάσεις σαν την παραπάνω πρέπει να γραφούν για όλες τις ενέργειες που θα μπορούσαν να εκτελεστούν σε κάθε χρονική στιγμή.

Οι προτάσεις αυτές δεν αρκούν από μόνες τους για την περιγραφή ενός προβλήματος σχεδιασμού σαν πρόβλημα ικανοποίησης προτάσεων. Χρειάζονται επιπλέον προτάσεις που να διασφαλίζουν την εκτέλεση μιας τουλάχιστον ενέργειας σε κάθε χρονική στιγμή, αλλά και τη μη ταυτόχρονη εκτέλεση ενεργειών που είναι ασύμβατες μεταξύ τους. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους, ο απλούστερος εκ των οποίων είναι οι σχέσεις αμοιβαίου αποκλεισμού ενός γράφου σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, βάσει του γράφου σχεδιασμού μπορεί να προστεθούν δύο ακόμη ομάδες προτάσεων:

- Ενέργειες ενός επιπέδου που είναι αμοιβαία αποκλειόμενες μεταξύ τους δεν μπορεί να εκτελεστούν ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, από το γράφο σχεδιασμού του προβλήματος με τους δύο κύβους (Σχήμα 17.3), προκύπτει μεταξύ άλλων και η ακόλουθη πρόταση:

$$\neg \text{move-}A\text{-from-table-to-}B_3 \vee \neg \text{move-}B\text{-from-table-to-}A_3$$

- Κάθε γεγονός ενός επιπέδου (εκτός του επιπέδου 0) συνεπάγεται τη διάζευξη όλων των ενεργειών του προηγούμενου επιπέδου που το επιτυγχάνουν (συμπεριλαμβανομένων των ενεργειών διατήρησης). Στο παράδειγμα με τους 2 κύβους, μπορεί να παραχθεί η ακόλουθη πρόταση:

$$\text{on}(b,a)_4 \Rightarrow \text{move-}B\text{-from-table-to-}A_3 \vee (\text{noop on}(b,a))_3$$

ή ισοδύναμα σε μορφή CNF:

$$\neg \text{on}(b,a)_4 \vee \text{move-}B\text{-from-table-to-}A_3 \vee (\text{noop on}(b,a))_3$$

Η αναπαράσταση αυτή χρησιμοποιείται στο σύστημα BLACKBOX, ωστόσο έχουν προταθεί και εναλλακτικές αναπαραστάσεις, με χρήση αξιωμάτων πλαισίου, για την εξασφάλιση της εκτέλεσης ενεργειών σε κάθε βήμα και της συμβατότητας αυτών.

17.2.2 Επίλυση των Προβλημάτων

Ύστερα από την αναπαράσταση ενός προβλήματος με προτάσεις, η επίλυσή του συνίσταται στην ανάθεση τιμών στις μεταβλητές του, έτσι ώστε όλες οι προτάσεις να αληθεύουν. Σαν μεταβλητές θεωρούνται όλοι οι όροι που αναφέρονται στο παραπάνω