

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Αναζήτηση λύσεων

Παρατηρήσατε ποτέ ένα καβούρι στην ακτή να περπατά προς τα πίσω αναζητώντας τον Ατλαντικό και να χάνεται; Έτσι λειτουργεί το μυαλό του ανθρώπου.

– H. L. Mencken (1880-1956)

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκε το θέμα του τρόπου με τον οποίο ένας πράκτορας αντιλαμβάνεται και ενεργεί, αλλά όχι το πώς οι στόχοι του επηρεάζουν τις ενέργειές του. Ένας πράκτορας θα μπορούσε να προγραμματιστεί ώστε να δρα στον κόσμο προκειμένου να επιτύχει έναν καθορισμένο στόχο ή σύνολο στόχων, αλλά τότε δεν θα προσαρμοζόταν στους μεταβαλλόμενους στόχους, με αποτέλεσμα να μην είναι ευφυής. Ένας ευφυής πράκτορας πρέπει να αναπτύξει μια συλλογιστική για τις ικανότητες και τους στόχους του για να προσδιορίσει τι πρέπει να κάνει. Αυτό το κεφάλαιο ανάγει το πρόβλημα ενός πράκτορα που αποφασίζει πώς να επιτύχει έναν στόχο ως ένα πρόβλημα αναζήτησης μιας διαδρομής σε έναν γράφο.

### 3.1 Επίλυση προβλήματος ως αναζήτηση

Στην απλούστερη περίπτωση ενός πράκτορα που αποφασίζει τι πρέπει να κάνει, ο πράκτορας διαθέτει ένα τέλειο μοντέλο του κόσμου, χωρίς αβεβαιότητα και με έναν στόχο που πρέπει να επιτευχθεί. Αυτό το υπόδειγμα είναι είτε μια επίπεδη (όχι ιεραρχική) αναπαράσταση είτε ένα μόνο επίπεδο μιας ιεραρχίας (βλ. Ενότητα 2.2).

Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αναχθεί στο μαθηματικό πρόβλημα της εύρεσης μιας διαδρομής από έναν αρχικό κόμβο σε έναν κόμβο στόχου σε έναν κατευθυνόμενο γράφο. Πολλά άλλα προβλήματα μπορούν επίσης να αντιστοιχηθούν σε αυτή τη θεωρία (αφαίρεση), που σημαίνει ότι αξίζει να εξεταστεί αυτό το επίπεδο αφαίρεσης. Μεγάλο μέρος του κεφαλαίου διερευνά διάφορους αλγορίθμους για την εύρεση τέτοιων διαδρομών.

**Παράδειγμα 3.1** Οι χάρτες των υπολογιστών παρέχουν τη δυνατότητα εύρεσης διαδρομής, δείχνοντάς σας πώς να πάτε (οδηγώντας, περπατώντας ή χρησιμοποιώντας τα μέσα μαζικής μεταφοράς) από μια τοποθεσία σε μια άλλη. Η εύρεση της βέλτιστης διαδρομής από μια τρέχουσα τοποθεσία σε έναν προορισμό είναι ένα πρόβλημα αναζήτησης. Η κατάσταση περιλαμβάνει τον τρόπο μεταφοράς (π.χ. με τα πόδια ή με λεωφορείο), την τοποθεσία του μετακινούμενου και την κατεύθυνση της κίνησης. Σε μια τυπική διαδρομή θα αναφέρονται οι δρόμοι (με σωστή κατεύθυνση στις οδούς μονής κατεύθυνσης) και οι διασταυρώσεις που θα διασχίσει ο μετακινούμενος.

Η βέλτιστη διαδρομή θα μπορούσε να σημαίνει

- τη συντομότερη διαδρομή (με τη μικρότερη απόσταση)
- την ταχύτερη διαδρομή

- τη διαδρομή που καταναλώνει τη λιγότερη ενέργεια
- τη διαδρομή του πιο χαμηλού κόστους, όπου για το κόστος λαμβάνονται υπόψη ο χρόνος, τα χρήματα (π.χ. καύσιμα και διόδια) και η ομορφιά της διαδρομής.

Η εύρεση της συντομότερης διαδρομής είναι συνήθως πιο εύκολο να εφαρμοστεί, επειδή οι χάρτες περιέχουν αποστάσεις και μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν αλλάζουν, αν αγνοήσουμε τις παρακάμψεις λόγω οδικών έργων ή ατυχημάτων. Η εκτίμηση του χρόνου ή της ενέργειας που καταναλώνεται είναι πιο δύσκολη. Ο σχεδιαστής διαδρομής θα πρέπει ενδεχομένως να λάβει υπόψη τον τυπικό όγκο κυκλοφορίας και τις τοπικές συνθήκες, όπως τις καιρικές συνθήκες ή τα ατυχήματα. Για την εκτίμηση του χρόνου, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης.

Αυτό το παράδειγμα εξετάζεται πιο αναλυτικά στην Ενότητα 3.9 για τα κοινωνικά ζητήματα.

Αυτή η έννοια της **αναζήτησης** ή **διερεύνησης** (search) είναι ένας υπολογισμός αποκλειστικά εντός του πράκτορα. Διαφέρει από την αναζήτηση στον πραγματικό κόσμο, όπου ένας πράκτορας ενδεχομένως να πρέπει να δράσει σε αυτόν – για παράδειγμα, ένα ρομπότ που ψάχνει κλειδιά, σηκώνει μαξιλάρια κ.ά. Διαφέρει επίσης από την αναζήτηση στον παγκόσμιο ιστό, η οποία περιλαμβάνει την αναζήτηση πληροφοριών με την ευρετηρίαση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων και την προσπάθεια εύρεσης της καλύτερης δυνατής απόκρισης σε κάθε ερώτημα αναζήτησης. Η αναζήτηση σε αυτό το κεφάλαιο σημαίνει την εύρεση μιας διαδρομής προς έναν κόμβο στόχου σε έναν γράφο.

Η αναζήτηση διέπει μεγάλο μέρος της τεχνητής νοημοσύνης. Όταν δίνεται ένα πρόβλημα σε έναν πράκτορα, συνήθως δίνεται μόνο μια περιγραφή που του επιτρέπει να αναγνωρίσει μια λύση και όχι ένας αλγόριθμος για να λύσει το πρόβλημα. Πρέπει να αναζητήσει μια λύση. Η ύπαρξη δυσεπίλυτων προβλημάτων, για παράδειγμα μη ντετερμινιστικών προβλημάτων απόφασης πολυωνυμικού χρόνου – NP-complete problems (περισσότερα παρακάτω σε αυτό το κεφάλαιο), με αποτελεσματικά μέσα για την αναγνώριση λύσεων, αλλά όχι αποδοτικών μεθόδων για την εύρεσή τους, υποδεικνύει ότι η αναζήτηση αποτελεί απαραίτητο μέρος της επίλυσης προβλημάτων.

Συχνά πιστεύουμε ότι οι άνθρωποι είναι σε θέση να χρησιμοποιούν τη διαίσθηση για να βρίσκουν λύσεις σε δύσκολα προβλήματα. Ωστόσο, οι άνθρωποι δεν μπορούν να βρουν βέλτιστες λύσεις σε υπολογιστικά δύσκολα προβλήματα και δεν συνηθίζουν να επιλύουν γενικά προβλήματα· αντίθετα, δίνουν λύσεις σε συγκεκριμένες περιπτώσεις προβλημάτων για τις οποίες μπορεί να γνωρίζουν πολύ περισσότερα από τον υποκείμενο χώρο αναζήτησης. Συχνά δεν βρίσκουν βέλτιστες λύσεις, αλλά **ικανοποιητικές** (satisficing) ή αρκετά καλές λύσεις. Τα προβλήματα με ελάχιστη δομή ή εκείνα στα οποία η δομή δεν μπορεί να συσχετιστεί με τον φυσικό κόσμο είναι πολύ δύσκολο να επιλυθούν από τον άνθρωπο. Η ύπαρξη κωδικών κρυπτογράφησης δημόσιου κλειδιού, όπου ο χώρος αναζήτησης είναι σαφής και η δοκιμασία για μια λύση δίνεται –την οποία ωστόσο οι άνθρωποι δεν έχουν καμία ελπίδα να λύσουν και οι υπολογιστές δεν μπορούν να λύσουν σε ένα ρεαλιστικό χρονικό πλαίσιο–, καταδεικνύει τη δυσκολία της αναζήτησης.

Η δυσκολία αναζήτησης και το γεγονός ότι οι άνθρωποι είναι σε θέση να επιλύουν αποτελεσματικά ορισμένα προβλήματα αναζήτησης καταδεικνύουν ότι οι πράκτορες υπολογιστών πρέπει να αξιοποιήσουν την υπάρχουσα γνώση για ειδικές περιπτώσεις που θα τους καθοδηγήσει σε μια λύση. Αυτή η πρόσθετη γνώση πέρα από τον χώρο αναζήτησης ονομάζεται **ευρετική γνώση** (heuristic knowledge). Αυτό το κεφάλαιο εξετάζει ένα είδος ευρετικής γνώσης με τη μορφή εκτίμησης του κόστους από έναν κόμβο έως έναν στόχο.

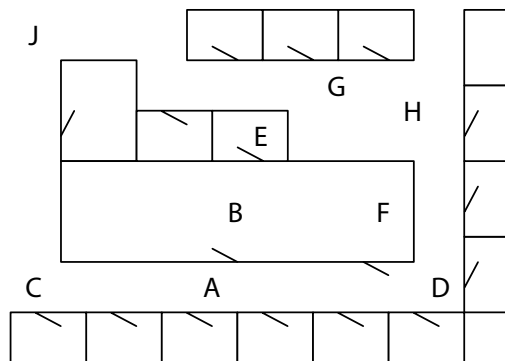
## 3.2 Χώροι καταστάσεων

Μια γενική διατύπωση της ευφυούς δράσης γίνεται χρησιμοποιώντας την έννοια του **χώρου καταστάσεων** (state space). Μια **κατάσταση** (state) περιέχει όλες τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για να προβλεφθούν τα αποτελέσματα μιας ενέργειας και για να εξακριβωθεί αν μια κατάσταση ικανοποιεί τον στόχο. Η αναζήτηση χώρου καταστάσεων θεωρεί ότι:

- Ο πράκτορας γνωρίζει άριστα τον χώρο καταστάσεων.
- Ανά πάσα στιγμή, γνωρίζει σε ποια κατάσταση βρίσκεται, που σημαίνει ότι ο κόσμος είναι πλήρως παρατηρήσιμος (Ενότητα 1.5.6).
- Ο πράκτορας διαθέτει ένα σύνολο ενεργειών με γνωστά ντετερμινιστικά αποτελέσματα (Ενότητα 1.5.6).
- Ο πράκτορας έχει έναν στόχο που πρέπει να επιτύχει και μπορεί να εξακριβώσει αν μια κατάσταση ικανοποιεί τον στόχο.

Μια **λύση** (solution) σε ένα πρόβλημα αναζήτησης είναι μια ακολουθία ενεργειών μέσω των οποίων ο πράκτορας μπορεί να φτάσει από την τρέχουσα κατάσταση του σε μια κατάσταση που ικανοποιεί τον στόχο.

**Παράδειγμα 3.2** Έστω το πρόβλημα πλοήγησης για ένα ρομπότ διανομέα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1, όπου υπάρχουν γραφεία γύρω από ένα κεντρικό εργαστήριο. Ο μοναδικός τρόπος για να περάσει ένα ρομπότ από μια πόρτα είναι να ανοίξει την πόρτα προς την κατεύθυνση που φαίνεται. Το ζητούμενο είναι να βρεθεί μια διαδρομή από μια τοποθεσία σε μια άλλη. Αν υποθέσουμε ότι ο πράκτορας μπορεί να χρησιμοποιήσει έναν ελεγκτή χαμηλότερου επιπέδου για να φτάσει από μια τοποθεσία σε μια γειτονική, οι ενέργειες για την αναζήτηση μετακινούνται μεταξύ γειτονικών τοποθεσιών. Αυτό μπορεί να απεικονιστεί ως ένα πρόβλημα αναζήτησης χώρου καταστάσεων, όπου οι καταστάσεις είναι τοποθεσίες. Μερικές από τις τοποθεσίες στο Σχήμα 3.1 ονομάζονται και χρησιμοποιούνται ως υποδείγματα.



**Σχήμα 3.1:** Ένα πρόβλημα πλοήγησης για ένα ρομπότ διανομέα με τις τοποθεσίες ενδιαφέροντος να επισημαίνονται

Έστω ένα παράδειγμα του προβλήματος όπου το ρομπότ ξεκινά από την τοποθεσία A και ο στόχος είναι να μεταβεί στην τοποθεσία G. Ως εκ τούτου, το G είναι η μοναδική κατάσταση που ικανοποιεί τον στόχο. Μια λύση είναι μια ακολουθία ενεργειών που μετακινεί το ρομπότ από το A στο G.

**Παράδειγμα 3.3** Έστω ένα βιντεοπαιχνίδι που παίζεται σε ένα πλέγμα, όπου ένας πράκτορας μπορεί να κινηθεί πάνω, κάτω, αριστερά ή δεξιά κατά ένα βήμα, εφόσον η κίνηση δεν εμποδίζεται από κάποιον τοίχο. Ο πράκτορας πρέπει να συλλέξει τέσσερα κέρματα,  $C_1, \dots, C_4$ , με κάθε κέρμα να βρίσκεται σε γνωστή θέση. Ο πράκτορας χρησιμοποιεί μία μονάδα καυσίμων σε κάθε βήμα και δεν μπορεί να κινηθεί αν δεν έχει καύσιμα. Μπορεί να γεμίσει (έως 20 μονάδες καυσίμων) στον σταθμό καυσίμων. Σε αυτή την περίπτωση, μια κατάσταση περιγράφεται από τη θέση του πράκτορα, την ποσότητα καυσίμων και, για κάθε κέρμα, από το αν έχει συλλεχθεί ή όχι. Η κατάσταση θα μπορούσε να αναπαρασταθεί από την πλειάδα

$$(x, y, fuel, c_1, c_2, c_3, c_4)$$

όπου  $(x, y)$  είναι η θέση του πράκτορα,  $fuel$  είναι η ποσότητα καυσίμου που έχει ο πράκτορας και  $c_i$  είναι αληθές όταν ο πράκτορας έχει μαζέψει το κέρμα  $C_i$ . Το αληθές συμβολίζεται ως  $t$  (*true*) και το ψευδές ως  $f$  (*false*). Ο στόχος θα μπορούσε να είναι ο πράκτορας να συλλέξει όλα τα κέρματα και να βρίσκεται στη θέση  $(1, 1)$ , η οποία είναι η κατάσταση

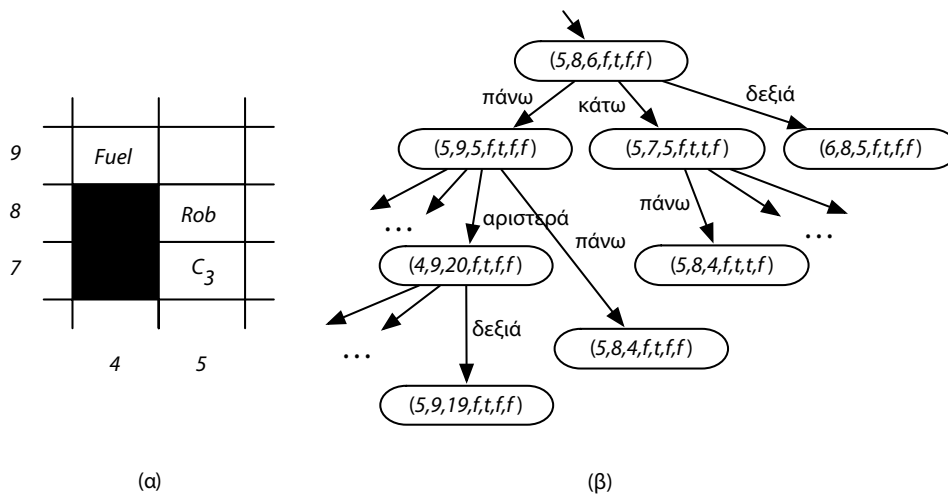
$$(1, 1, ?, t, t, t, t)$$

όπου  $?$  σημαίνει ότι δεν έχει σημασία ποια είναι η στάθμη των καυσίμων στο τέλος. Όλες οι καταστάσεις για τις οποίες ο πράκτορας βρίσκεται στο  $(1, 1)$  και όλα τα  $c_i$  είναι αληθή ισοδυναμούν με καταστάσεις στόχου.

Μέρος του περιβάλλοντος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2(α), όπου ο πράκτορας δεν μπορεί να κινηθεί σε ένα μαύρο τετράγωνο. Θα μπορούσε να γεμίσει καύσιμα στη θέση  $(4, 9)$  και να συλλέξει το κέρμα  $C_3$  στη θέση  $(5, 7)$ . Η κατάσταση όπου ο πράκτορας, Rob, βρίσκεται στη θέση  $(5, 8)$  με 6 μονάδες καυσίμων και έχει μαζέψει μόνο το κέρμα  $C_2$  είναι

$$(5, 8, 6, f, t, f, f).$$

Το Σχήμα 3.2(β) παρουσιάζει ένα μέρος του χώρου καταστάσεων για αυτό το πρόβλημα.



Σχήμα 3.2: Μέρος του βιντεοπαιχνιδιού και του χώρου καταστάσεων του Παραδείγματος 3.3

**Παράδειγμα 3.4** Το ρομπότ διανομέας ίσως πρέπει να παραδώσει κάποια πακέτα σε διάφορες τοποθεσίες, με το κάθε πακέτο να έχει τον δικό του προορισμό παράδοσης. Σε αυτή την περίπτωση, η κατάσταση μπορεί να αποτελείται από την τοποθεσία του ρομπότ, το ποια πακέτα μεταφέρει το ρομπότ και τις τοποθεσίες των άλλων πακέτων. Οι πιθανές ενέργειες μπορεί να είναι οι εξής: το ρομπότ κινείται, το ρομπότ παραλαμβάνει πακέτα που βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία με το ρομπότ ή το ρομπότ παραδίδει μερικά ή όλα τα πακέτα που μεταφέρει. Μια κατάσταση-στόχος μπορεί να είναι μια κατάσταση στην οποία κάποια συγκεκριμένα πακέτα βρίσκονται στον προορισμό παράδοσης. Μπορεί να υπάρχουν πολλές καταστάσεις-στόχοι επειδή ενδεχομένως να μην έχει σημασία πού βρίσκεται το ρομπότ ή πού βρίσκονται κάποια από τα άλλα πακέτα σε μια κατάσταση-στόχο.

Σε αυτή την αναπαράσταση παραλείπονται πολλές λεπτομέρειες, όπως για παράδειγμα το πώς το ρομπότ μεταφέρει τα πακέτα (κάτι που μπορεί να επηρεάζει το αν έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει άλλα πακέτα), η στάθμη της μπαταρίας του ρομπότ, αν τα πακέτα είναι εύθραυστα ή κατεστραμμένα και το χρώμα