



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών

Εαρινό Εξάμηνο 2023-2024

ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ

Περιληπτικές Σημειώσεις Μαθήματος

Ιωάννης Τσαντήλας
03120883

Contents

Κεφάλαιο 1: Ευρετική Αναζήτηση και Επίλυση Προβλημάτων.....	2
Αλγόριθμοι Τυφλής Αναζήτησης.....	2
Βασικοί Όροι.....	2
Αλγόριθμοι	2
BFS.....	2
DFS	2
Αλγόριθμος Διπλής Κατεύθυνσης.....	2
Αλγόριθμος επαναλαμβανόμενης εμβάθυνσης	2
Αλγόριθμοι εμπειριστατωμένης αναζήτησης (αναζήτησης μίας οποιασδήποτε λύσης).....	3
Βασικοί Όροι.....	3
Αλγόριθμοι	3
Hill Climbing	3
Best First.....	3
Αλγόριθμοι εμπειριστατωμένης αναζήτησης (αναζήτηση βέλτιστης λύσης).....	4
Αλγόριθμοι	4
Branch & Bound.....	4
A*	4
Ευρετικές Συναρτήσεις.....	4
Αποδεκτές (admissible) Ευρετικές.....	4
Συνεπείς (consistent) ή μονότονες (monotone) ευρετικές	4
Ακρίβεια (accuracy) ευρετικών.....	5
Θεώρημα.....	5
Αποτελεσματικός παράγοντας διακλάδωσης (effective branching factor) ευρετικής.....	5
Κεφάλαιο 2: Αλγόριθμοι Αναζήτησης για παίγνια.....	6
Αλγόριθμοι	6
Minimax	6
Alpha-Beta	6
Κεφάλαιο 4: Τεχνητή Νοημοσύνη και Λογική	8
Προτασιακή Λογική – Σύνταξη και Σημασιολογία	8
Αυτόματη Συλλογιστική στην Προτασιακή Λογική	8
Λογική Πρώτης Τάξης – Σύνταξη	9
Λογική Πρώτης Τάξης - Σημασιολογία.....	9

Κεφάλαιο 1: Ευρετική Αναζήτηση και Επίλυση Προβλημάτων

Αλγόριθμοι Τυφλής Αναζήτησης

Βασικοί Όροι

Μέτωπο αναζήτησης (search frontier): Το διατεταγμένο σύνολο (λίστα) των καταστάσεων που ο αλγόριθμος έχει ήδη επισκεφτεί, αλλά δεν έχουν ακόμη επεκταθεί.

Κλειστό σύνολο (closed set): Το σύνολο όλων των καταστάσεων που έχουν ήδη επεκταθεί από τον αλγόριθμο.

Κάθε επέκταση μιας κατάστασης συνοδεύεται από την εισαγωγή της κατάστασης γονέα στο κλειστό σύνολο και των καταστάσεων παιδιών στο μέτωπο αναζήτησης

Αλγόριθμοι

BFS

- Μέγιστος παράγοντας διακλάδωσης: b .
- Βάθος κοντινότερου στόχου: d .
- Χρονική Πολυπλοκότητα: $O(b^d)$.
- Χρονική Πολυπλοκότητα: $O(b \cdot d)$.

DFS

- Μέγιστος παράγοντας διακλάδωσης: b .
- Βάθος κοντινότερου στόχου: d .
- Βάθος πιο απομακρυσμένου φύλλου: m .
- Χρονική Πολυπλοκότητα: $O(b^m)$.
- Χρονική Πολυπλοκότητα: $O(b \cdot m)$.

Αλγόριθμος Διπλής Κατεύθυνσης

Ξεκινάμε από Start και Finish ταυτόχρονα μέχρι στο μέτωπο αναζήτησης να βρεθεί ο ίδιος κόμβος.

- Χρονική Πολυπλοκότητα: $O(b^{d/2})$.

Αλγόριθμος επαναλαμβανόμενης εμβάθυνσης

(Basically BFS) – Κάνουμε DFS για $depth = 1$. Εάν δεν φτάσουμε, κάνουμε DFS για $depth + 1$.

- Μέγιστος παράγοντας διακλάδωσης: b .
- Βάθος κοντινότερου στόχου: d .
- Χρονική Πολυπλοκότητα: $O(b^d)$.
- Χρονική Πολυπλοκότητα: $O(b \cdot d)$.

Αλγόριθμοι εμπεριστατωμένης αναζήτησης (αναζήτησης μίας οποιασδήποτε λύσης).

Βασικοί Όροι

- Euclidean Distance (eD): $\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$
- Manhattan Distance (mD): $|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$

Αλγόριθμοι

Hill Climbing

- Όρισε τον τρέχοντα κόμβο ως τη ρίζα του δένδρου
- Όσο ο τρέχων κόμβος δεν είναι κόμβος στόχος:
 - Βρες τα παιδιά του τρέχοντος κόμβου, και στη συνέχεια βρες αυτό με την ελάχιστη υπολογιζόμενη υπόλοιπη απόσταση από το στόχο.
 - Εάν ο τρέχων κόμβος δεν έχει παιδιά ή το παιδί που βρέθηκε πριν έχει μεγαλύτερη τιμή ευρετικής συνάρτησης από τον τρέχων κόμβο αγνόησε τον. Διαφορετικά, όρισε τον κόμβο που βρέθηκε πριν ως τρέχων κόμβο.
- Εάν βρήκαμε κόμβο στόχο τότε ανακοινώνουμε επιτυχία αλλιώς ανακοινώνουμε αποτυχία.

Best First

Εύρεση Στόχου

- Κατασκεύασε το μέτωπο αναζήτησης που περιέχει τη ρίζα του δένδρου (αρχική κατάσταση).
- Μέχρι που το μέτωπο αναζήτησης να αδειάσει ή να βρεθεί ένας στόχος, εξέτασε εάν ο πρώτος κόμβος στη λίστα είναι κόμβος στόχος.
 - Εάν ο πρώτος κόμβος είναι κόμβος στόχος τότε τέλος.
 - Διαφορετικά, βρες τα παιδιά του, πρόσθεσε τα στο μέτωπο αναζήτησης, και ταξινόμησε το μέτωπο αναζήτησης σε αύξουσα σειρά ευρετικής.
 - Εάν ο πρώτος κόμβος δεν έχει παιδιά απλά αφαίρεσέ τον από το μέτωπο αναζήτησης.
- Εάν βρήκαμε ένα κόμβο στόχο τότε ανακοινώνουμε επιτυχία αλλιώς ανακοινώνουμε αποτυχία.

Εύρεση Μονοπατιού (αν βρέθηκε ο Στόχος)

- Κατασκεύασε το μέτωπο αναζήτησης από μονοπάτια (που αρχικά είναι κενό)
- Μέχρι που το μέτωπο αναζήτησης να είναι άδειο ή το πρώτο μονοπάτι να έχει ουρά (τελευταίο στοιχείο) ένα στόχο:
 - Βγάλε το πρώτο μονοπάτι από το μέτωπο αναζήτησης.
 - Φτιάξε μονοπάτια που μπορούν να φτιαχτούν από το μονοπάτι που βγάλαμε επεκτείνοντας το κατά ένα βήμα.
 - Βάλε τα νέα μονοπάτια στο μέτωπο αναζήτησης.
 - Ταξινόμησε σε αύξουσα σειρά ευρετικής όλα τα μονοπάτια με βάση την ευρετική τιμή της ουράς (τελευταίο στοιχείο μονοπατιού – αν είναι ο στόχος, τότε θα 'χει μηδέν).
- Εάν βρήκαμε ένα μονοπάτι που οδηγεί σε κόμβο στόχο τότε ανακοινώνουμε επιτυχία αλλιώς ανακοινώνουμε αποτυχία.

Αλγόριθμοι εμπεριστατωμένης αναζήτησης (αναζήτηση βέλτιστης λύσης)

Αλγόριθμοι

Branch & Bound

- Κατασκεύασε μια λίστα από μονοπάτια (που αρχικά είναι κενή).
- Μέχρι που η λίστα να είναι άδεια ή το πρώτο μονοπάτι της λίστας να οδηγεί σε στόχο και όλα τα άλλα μονοπάτια που δεν έχουν ακόμη οδηγήσει σε στόχο έχουν μεγαλύτερο κόστος:
 - Εάν το πρώτο μονοπάτι οδηγεί σε στόχο, κράτησέ το σαν πιθανή λύση. Εάν είναι καλύτερο από κάποια προηγούμενη λύση, κράτησέ το σαν την καλύτερη πιθανή λύση.
 - Εάν το πρώτο μονοπάτι δεν οδηγεί σε στόχο, ή υπάρχουν άλλα μονοπάτια που δεν έχουν ακόμη οδηγήσει σε στόχο και έχουν μικρότερο κόστος από το μονοπάτι που ήδη βρήκαμε:
 - Βγάλε το πρώτο μονοπάτι από τη λίστα.
 - Φτιάξε μονοπάτια που μπορούν να φτιαχτούν από το μονοπάτι που βγάλαμε επεκτείνοντας το κατά ένα βήμα (branch).
 - Βάλε τα νέα μονοπάτια στη λίστα.
 - Ταξινόμησε σε αύξουσα σειρά όλα τα μονοπάτια στη λίστα σύμφωνα με το κόστος του κάθε μονοπατιού (από την αρχική κατάσταση στο τελευταίο κόμβο του μονοπατιού).
 - Κλάδεψε τα μονοπάτια που έχουν κόστος μεγαλύτερο από ένα όριο που διασφαλισμένα δεν μπορεί να οδηγήσει σε βέλτιστη λύση (bound) (π.χ. το κόστος της καλύτερης λύσης που έχουμε βρει μέχρι τότε).
 - Εάν βρήκαμε ένα μονοπάτι που οδηγεί σε κόμβο στόχο τότε ανακοινώνουμε μερική επιτυχία αλλιώς ανακοινώνουμε αποτυχία.
- Εάν βρήκαμε ένα μονοπάτι που οδηγεί σε κόμβο στόχο τότε ανακοινώνουμε επιτυχία αλλιώς ανακοινώνουμε αποτυχία.

A*

- Ακολουθούμε τη λογική του Branch & Bound. Επεκτείνουμε το μονοπάτι με τον καλύτερο από όλους τους κόμβους που βρίσκονται στο μέτωπο αναζήτησης του δένδρου (λογική Best First).
- Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τη σύνθετη ευρετική συνάρτηση: $F(k) = g(k) + h(k)$
 - $g(k)$ η πραγματική απόσταση της k από την αρχική κατάσταση,
 - $h(k)$ μία εκτίμηση της απόστασης της k από το στόχο (heuristic).

Ευρετικές Συναρτήσεις

Ο A* βρίσκει τη βέλτιστη λύση εάν η ευρετική που χρησιμοποιούμε είναι αποδεκτή ή/και συνεπής.

Αποδεκτές (admissible) Ευρετικές

Έστω $h^*(k)$ το κόστος του βέλτιστου μονοπατιού από την k στο στόχο G . Μία ευρετική $h(k)$ λέγεται αποδεκτή όταν: $0 \leq h(k) \leq h^*(k)$. Η Ευκλείδεια απόσταση είναι η βέλτιστη ευρετική όταν δεν έχω εμπόδια. Η απόσταση Manhattan είναι η βέλτιστη ευρετική όταν έχω εμπόδια και μπορώ να κινηθώ μόνο οριζοντίως ή καθέτως).

Συνεπείς (consistent) ή μονότονες (monotone) ευρετικές

Έστω $h(k)$ μία ευρετική. Οι συνεπείς ευρετικές γίνονται πιο ακριβείς όσο πλησιάζουμε το στόχο. Έστω k ένας κόμβος και k' ένας επόμενός του. Η $h(k)$ λέγεται συνεπής ή μονότονη όταν: $h(k) \leq c(k, k') + h(k')$ όπου $c(k, k')$ το κόστος μετάβασης από την k στην k' . Ισχύει ότι οι συνεπείς ευρετικές είναι αποδεκτές.

Ακρίβεια (accuracy) ευρετικών

Έστω h_1, h_2 δύο συνεπείς ευρετικές τέτοιες ώστε για κάθε k : $h_1(k) \leq h_2(k)$. Τότε η $h_2(k)$ θα λέγεται πιο accurate από την $h_1(k)$.

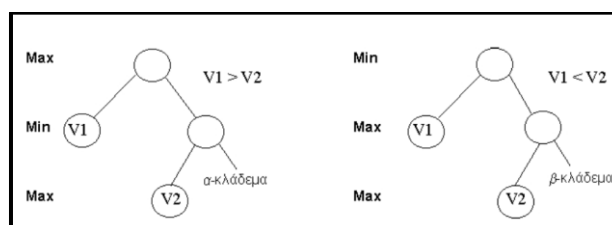
Θεώρημα

Έστω h_1, h_2 δύο συνεπείς ευρετικές με h_2 πιο ακριβή από την h_1 . Αν υπάρχει λύση, όλοι οι κόμβοι που επεκτείνονται από τον A_2^* επεκτείνονται και από τον A_1^* (εκτός ίσως από ορισμένους για τους οποίους $f_1(k) = f_2(k)$).

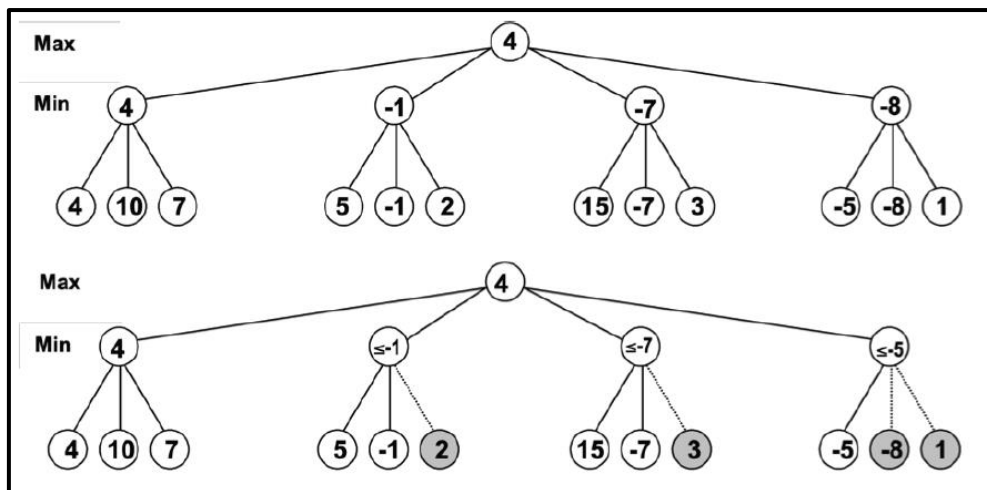
Αποτελεσματικός παράγοντας διακλάδωσης (effective branching factor) ευρετικής

Είναι ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας της ευρετικής. Έστω n το πλήθος των κόμβων που επεκτείνονται και d το βάθος του στόχου. Ο αποτελεσματικός παράγοντας διακλάδωσης b^* ορίζεται από τη σχέση:

$$n = 1 + b^* + (b^*)^2 + \dots + (b^*)^d.$$



Παράδειγμα (γιατί είναι οι μόνες 2 διαφάνειες που 'χουν δώσει):



Αξιολογούνται οι πρώτοι αριστεροί κόμβοι (4,10,7) και δίνουν την τιμή 4 στον κόμβο πατέρα. Η αξιολόγηση προχωρά στο δεύτερο κλαδί και βρίσκει 5 και -1 οπότε και σταματά αφού η τιμή του είναι μικρότερη από τη μεγαλύτερη τιμή του ανωτέρου επιπέδου (δηλ. το 4).

Κεφάλαιο 4: Τεχνητή Νοημοσύνη και Λογική

Προτασιακή Λογική – Σύνταξη και Σημασιολογία

Σύνθετη πρόταση ή απλά πρόταση είναι μία δήλωση p που σχηματίζεται ως εξής:

$$p = a | \neg p_1 | p_1 \wedge p_2 | p_1 \vee p_2 | p_1 \rightarrow p_2$$

Όπου:

- a μία ατομική πρόταση (παίρνει απλά True/False)
- p_1 και p_2 σύνθετες προτάσεις (παράσταση ατομικών προτάσεων συνδεδεμένες με λογικούς συνδέσμους (\neg : not, \wedge : and, \vee : or, \rightarrow : therefore, \leftrightarrow : equivalent)).

Ισχύουν:

$$a \rightarrow b \equiv \neg a \vee b$$

$$a \leftrightarrow b \equiv (a \wedge b) \vee (\neg a \wedge \neg b)$$

$$\neg(a \wedge b) \equiv (\neg a \vee \neg b)$$

$$\neg(a \vee b) \equiv (\neg a \wedge \neg b)$$

$$\neg \neg a \equiv a$$

Ένα πεπερασμένο σύνολο προτάσεων ονομάζεται βάση γνώσης ή απλά γνώση.

Αποτίμηση μίας πρότασης είναι να δοκιμάσουμε όλους τους συνδυασμούς True/False των ατομικών προτάσεων που την αποτελούν και να την υπολογίσουμε (Πίνακας Αληθείας) και γράφουμε $val(p) = T/F$.

Τα παρακάτω ισχύουν και για γνώση K :

- Ονομάζουμε ερμηνεία I μίας πρότασης p μία απεικόνιση $I: sig(p) \rightarrow \{T, F\}$.
- Μία ερμηνεία I ικανοποιεί μία πρόταση p , όταν την ερμηνεία αυτή $val(q_1) = T$. Τότε η I είναι μοντέλο της p .
- Μία πρόταση p ονομάζεται ταυτολογία αν την ικανοποιεί κάθε ερμηνεία της.
- Μία πρόταση p ονομάζεται συνεπής αν υπάρχει τουλάχιστον μία ερμηνεία που την ικανοποιεί, αλλιώς ονομάζεται αντίφαση.
- Μία πρόταση p συνεπάγεται μία πρόταση q αν όλες οι ερμηνείες της γνώσης που περιέχει τις 2 προτάσεις και ικανοποιούν την p ικανοποιούν την q .
- Δύο προτάσεις p, q είναι ισοδύναμες αν η μία ικανοποιεί την άλλη.

Αυτόματη Συλλογιστική στην Προτασιακή Λογική

Θα λέμε ότι μία πρόταση p είναι σε Conjunctive Normal Form (CNF) όταν είναι στη μορφή:

$$\neg(a \wedge b) \equiv (\neg a \vee \neg b)$$

$$p: p_1 \wedge p_2 \wedge \dots \wedge p_n$$

Όπου:

$$p_i: q_1 \wedge q_2 \wedge \dots \wedge q_n$$

$$q_i: a_i | \neg a_i$$

Ασυνέπεια: Έστω $K = [p_1, p_2], [\neg p_1, p_2], [\neg p_2]$. Αφού ισχύουν και τα δύο: $[p_1, p_2], [\neg p_1, p_2]$, μπορούμε ισοδύναμα να προσθέσουμε στην γνώση το $[p_2]$. Έτσι, η K γίνεται $K = [p_1, p_2], [\neg p_1, p_2], [\neg p_2], [p_2]$. Πλέον όμως η K περιέχει αντίφαση. Η K είναι **ασυνεπής**.

Αναλυθέν: Έστω $p: p' \cup a$ και $q: q' \cup \neg a$. Από τα p, q συμπεραίνουμε λογικά πως $p' \cup q'$, δηλαδή είναι αναλυθέν των p, q και γράφουμε $p, q \vdash p' \cup q'$.

Κανόνες Ανάλυσης: Έστω γνώση K και πρόταση r . Θα λέμε ότι η r είναι αναλυθέν της K , αν υπάρχουν δύο διαζευκτικά της K από τα οποία παράγεται η r . Θα λέμε ότι η r παράγεται αναλυτικά από την K και θα γράφουμε $K \vdash r$, αν υπάρχει μία ακολουθία προτάσεων p_1, p_2, \dots, p_n , με αναλυθέντα 2 προηγούμενων προτασιακών της ακολουθίας.

Αλγόριθμος Ανάλυσης: (δες σειρά ασκήσεων – οι διαφάνειες είναι γππ).

Λογική Πρώτης Τάξης – Σύνταξη

Σταθερά (constant) είναι ένα μη λογικό σύμβολο (συμβολοσειρά) που χρησιμοποιείται ως προσδιοριστικό (όνομα) ενός συγκεκριμένου αντικειμένου.

Μεταβλητή (variable) είναι ένα μη λογικό σύμβολο (συμβολοσειρά) που χρησιμοποιείται για την αναφορά σε κάποιο αντικείμενο του κόσμου.

Όρος (term) τάξης n είναι μία έκφραση της μορφής $f(t_1, t_2, \dots, t_n)$, με t όροι και f συνάρτηση.

Ατομική φόρμουλα/έκφραση (atomic formula/expression) τάξης n είναι μία δήλωση της μορφής $p(t_1, t_2, \dots, t_n)$, με t όροι και p κατηγορημα, ή της μορφής $t_1 \approx t_2$.

Άτομα είναι επέκταση των ατομικών προτάσεων της *προτασιακής* λογικής (T/F) μόνο που εδώ είναι Α/Ψ για συγκεκριμένα αντικείμενα του κόσμου. Το άτομο $p(t_1, t_2, \dots, t_n)$ αναπαριστά μία σχέση των t . Το άτομο $t_1 \approx t_2$ δηλώνει ότι οι όροι προσδιορίζουν το ίδιο αντικείμενο.

Ισχύουν οι ίδιοι λογικοί σύνδεσμοι, και υπάρχουν και άλλοι δύο: \forall, \exists . Με $\text{var}(p)$ συμβολίζουμε το σύνολο των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στη διατύπωση της φόρμουλας p .

Βάση γνώσης ή απλά γνώση είναι ένα σύνολο από εκφράσεις/αξιώματα.

Υπογραφή γνώσης είναι το σύνολο των σταθερών, συναρτήσεων και κατηγορημάτων και γράφουμε $\text{sig}(K)$.

Λογική Πρώτης Τάξης- Σημασιολογία

Ερμηνεία (interpretation) της γνώσης K είναι ένα ζεύγος $\langle \Delta^I, I \rangle$, όπου Δ^I ένα μη κενό (πιθανώς άπειρο) σύνολο αντικειμένων που ονομάζεται πεδίο και I μία απεικόνιση που ονομάζεται αντιστοίχιση ερμηνείας (interpretation mapping) και ερμηνεύει και τα μη λογικά σύμβολα της K με δομές στοιχείων του Δ^I ως εξής:

- Οι σταθερές ερμηνεύονται ως αντικείμενα του Δ^I , δηλαδή αν c είναι μία σταθερά της γνώσης K , τότε $c^I \in \Delta^I$.
- Οι συναρτήσεις τάξης n ερμηνεύονται ως (ολικές) συναρτήσεις από το καρτεσιανό $(\Delta^I)^n$ στο Δ^I : $f^I \in \Delta^I \times \dots \times \Delta^I \rightarrow \Delta^I$
- Τα κατηγορήματα τάξης n ερμηνεύονται ως υποσύνολα του καρτεσιανού $(\Delta^I)^n$: $p^I \subseteq \Delta^I \times \dots \times \Delta^I$.

Ανάθεση μεταβλητών (variable assignment) $\mu(t)$ του όρου t είναι μία απεικόνιση των μεταβλητών του t σε στοιχεία του Δ^I , με $\text{var}(t)$ το σύνολο των μεταβλητών του όρου t : $\mu(t): \text{var}(t) \rightarrow \Delta^I$.

Σημασία (denotation) $\sigma_\mu(t)$ του όρου t για την ανάθεση μεταβλητών $\mu(t)$ είναι ένα αντικείμενο Δ^I που προσδιορίζεται αναδρομικά ως εξής:

- Αν ο όρος t είναι απλά μία μεταβλητή x , τότε $\sigma_\mu(t) = \mu(t)$
- Αν ο όρος t είναι της μορφής $f(t_1, t_2, \dots, t_n)$ τότε $\sigma_\mu(t) = f^I(\sigma_\mu(t_1), \sigma_\mu(t_2), \dots, \sigma_\mu(t_n))$

=== ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ 39 ===

