

# Αναζήτηση σε Γράφους

Μανόλης Κουμπάρκης

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

1

1

## Πρόλογος

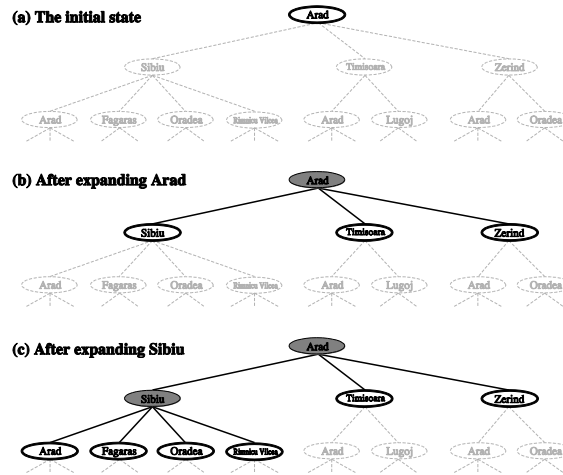
- Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση προβλημάτων αναζήτησης είναι αυτά στα οποία ο χώρος καταστάσεων είναι **γράφος**.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

2

2

# Παράδειγμα



ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

3

3

## Επαναλαμβανόμενες Καταστάσεις

- Βλέπουμε ότι η κατάσταση  $In(Arad)$  είναι **επαναλαμβανόμενη** και παράγεται από ένα μονοπάτι που περιέχει **κύκλο**.
- Άρα το δένδρο αναζήτησης για το πρόβλημα μας είναι **άπειρο** αν και ο χώρος καταστάσεων έχει μόνο **20 καταστάσεις!**
- Ευτυχώς **δεν χρειάζεται** οι αλγόριθμοι αναζήτησης να εξετάζουν επαναλαμβανόμενες καταστάσεις.
- Ένα μονοπάτι που περιέχει κύκλο έχει πάντα μεγαλύτερο κόστος από το ίδιο μονοπάτι αν αφαιρέσουμε τον κύκλο (με την υπόθεση ότι το κόστος βήματος είναι μη αρνητικό).

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

4

4

## Πλεονάζοντα Μονοπάτια

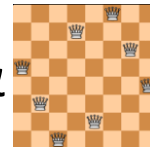
- Τα μονοπάτια που έχουν κύκλο είναι μια ειδική περίπτωση της πιο γενικής έννοιας των **πλεοναζόντων μονοπατιών**.
- Έχουμε πλεονάζοντα μονοπάτια όταν υπάρχουν περισσότεροι από ένας τρόποι για να πάμε από μια κατάσταση σε μια άλλη.
- **Παράδειγμα:** Τα μονοπάτια Arad-Sibiu (140 χιλιόμετρα) και Arad-Zerind-Oradea-Sibiu (297 χιλιόμετρα). Προφανώς το 2<sup>ο</sup> μονοπάτι είναι πλεονάζον.
- Αν θέλουμε να φτάσουμε σε μια κατάσταση στόχου, δεν υπάρχει λόγος να λαμβάνουμε υπόψη μας πλεονάζοντα μονοπάτια.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

5

5

## Πλεονάζοντα Μονοπάτια



- Μερικές φορές μπορούμε να ορίσουμε ένα πρόβλημα αναζήτησης με τέτοιο τρόπο ώστε να μην δημιουργούνται πλεονάζοντα μονοπάτια.
- **Παράδειγμα:** το πρόβλημα των 8 βασιλισσών.
- Αν ορίσουμε το πρόβλημα ώστε μια βασίλισσα να καταλαμβάνει οποιοδήποτε τετραγωνάκι, τότε έχουμε πλεονάζοντα μονοπάτια.
- Αν ορίσουμε το πρόβλημα ώστε μια βασίλισσα καταλαμβάνει ένα τετραγωνάκι στην αριστερότερη ελεύθερη στήλη, τότε δεν έχουμε πλεονάζοντα μονοπάτια.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

6

6

## Πλεονάζοντα Μονοπάτια

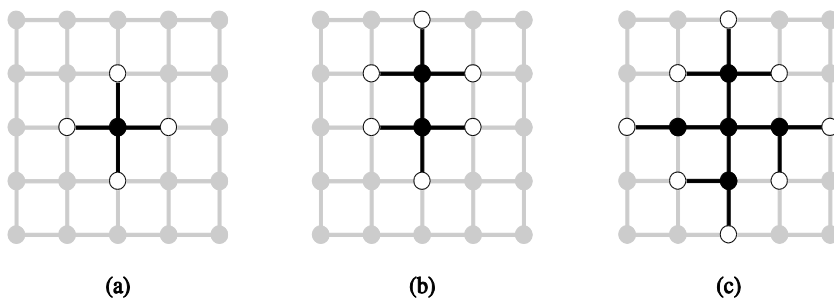
- Υπάρχουν περιπτώσεις που η ύπαρξη πλεοναζόντων μονοπατιών δεν μπορεί να αποφευχθεί.
- **Παράδειγμα:** όλα τα προβλήματα για τα οποία οι ενέργειες είναι αντιστρέψιμες (π.χ., προβλήματα εύρεσης διαδρομής ή προβλήματα ολισθαινόντων πλακιδίων).

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

7

7

## Παράδειγμα



- Η εύρεση διαδρομής σε **ορθογώνια πλέγματα** όπως το παραπάνω είναι σημαντική σε παιχνίδια υπολογιστή π.χ., Pacman.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

8

8

## Παράδειγμα

- Σε ένα τέτοιο πλέγμα κάθε κατάσταση έχει 4 διάδοχες καταστάσεις, οπότε ένα δένδρο αναζήτησης με βάθος  $d$  που περιέχει επαναλαμβανόμενες καταστάσεις έχει  $4^d$  φύλλα.
- Όμως υπάρχουν μόνο περίπου  $2d^2$  διαφορετικές καταστάσεις σε απόσταση  $d$  βημάτων από οποιαδήποτε κατάσταση (άσκηση!).
- Για  $d = 20$ , αυτό σημαίνει **ένα τρισεκατομμύριο** κόμβους αλλά μόνο **800** διαφορετικές καταστάσεις.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

9

9

## Το Εξερευνημένο Σύνολο

- Για να αποφύγουμε τη δημιουργία πλεοναζόντων μονοπατιών, χρησιμοποιούμε μια δομή δεδομένων που λέγεται **εξερευνημένο σύνολο (explored set)** ή **κλειστή λίστα (closed list)**.
- Η δομή αυτή «θυμάται» την κατάσταση κάθε εξερευνημένου κόμβου.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

10

10

## Ο Αλγόριθμος GRAPH-SEARCH

**function** GRAPH-SEARCH(*problem*) **returns** a solution or failure

initialize the frontier using the initial state of *problem*.

**initialize the explored set to be empty**

**loop do**

**if** the frontier is empty **then return** failure

    choose a leaf node and remove it from the frontier

**if** the node contains a goal state **then return** the corresponding solution

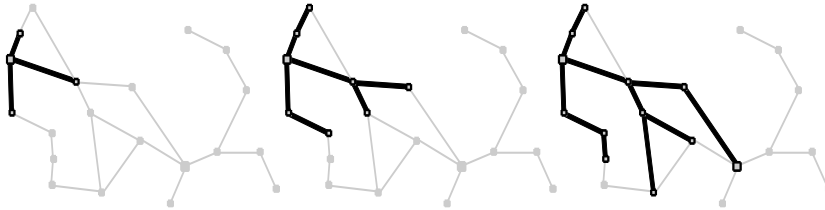
**add the state of the node to the explored set**

    expand the chosen node, adding the resulting nodes to the frontier **only if their state is not in the frontier or the explored set**

## Ο Αλγόριθμος GRAPH-SEARCH

- Το δένδρο αναζήτησης που κατασκευάζεται από τον αλγόριθμο GRAPH-SEARCH έχει **το πολύ ένα** αντίγραφο κάθε κατάστασης.
- Άρα μπορούμε να το απεικονίσουμε να δημιουργείται **πάνω στον γράφο του χώρου καταστάσεων** όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα.

## Παράδειγμα



ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

13

13

## Ο Αλγόριθμος GRAPH-SEARCH

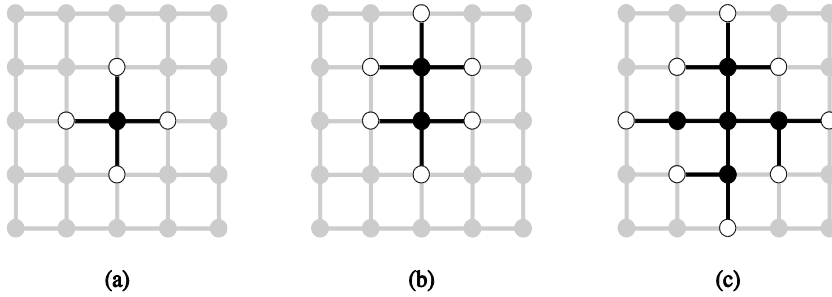
- Ο αλγόριθμος GRAPH-SEARCH έχει επίσης την παρακάτω ιδιότητα:
  - Το σύνολο **διαχωρίζει τον γράφο του χώρου καταστάσεων** σε μια εξερευνημένη περιοχή και σε μια ανεξερευνητή περιοχή.
  - Κάθε μονοπάτι από την αρχική κατάσταση σε μια ανεξερευνητή κατάσταση **περνάει υποχρεωτικά** από ένα κόμβο του συνόρου.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

14

14

## Παράδειγμα



ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

15

15

## Υλοποίηση του GRAPH-SEARCH

- Για κάθε **κόμβο**  $n$  του δένδρου αναζήτησης, θα έχουμε μια δομή που περιέχει τα ακόλουθα πεδία:
  - $n$ .STATE: η κατάσταση του κόμβου.
  - $n$ .PARENT: ο κόμβος του δένδρου αναζήτησης που παρήγαγε τον  $n$ .
  - $n$ .ACTION: η ενέργεια που εφαρμόστηκε στον πατέρα του κόμβου για να δημιουργηθεί ο  $n$ .
  - $n$ .PATH-COST: το κόστος του μονοπατιού από την αρχική κατάσταση μέχρι τον  $n$ . Το μονοπάτι ορίζεται από τους δείκτες στον πατέρα κάθε κόμβου.

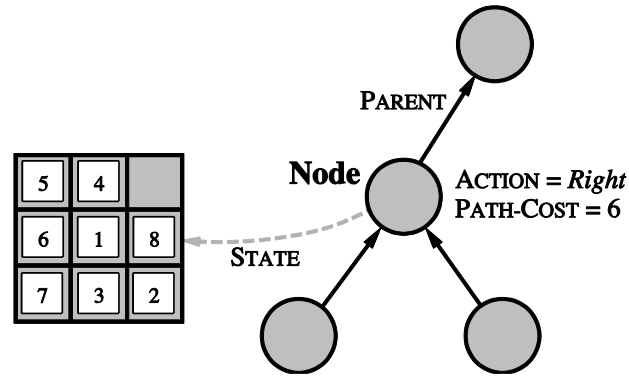
ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

16

16



## Η Δομή Δεδομένων για Ένα Κόμβο



ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

17

17

## Σχόλια

- Παρατηρήστε ότι οι δείκτες PARENT σχηματίζουν τη **δομή του δένδρου**.
- Οι ίδιοι δείκτες μας επιτρέπουν να **κατασκευάσουμε τη λύση** όταν βρούμε ένα κόμβο στόχου.
- Χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση SOLUTION η οποία επιστρέφει μια ακολουθία ενεργειών ακολουθώντας δείκτες PARENT πίσω στην ρίζα.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

18

18

## Υλοποίηση του GRAPH-SEARCH

- Η παρακάτω συνάρτηση παίρνει ένα κόμβο-πατέρα και μια ενέργεια και δημιουργεί τον αντίστοιχο κόμβο-παιδί:

**function** CHILD-NODE(*problem, parent, action*) **returns** a node

**return** a node with

STATE = *problem.RESULT*(parent.STATE, *action*)

PARENT = *parent*

ACTION = *action*

PATH-COST = *parent.PATH-COST* +  
*problem.STEP-COST*(parent.STATE, *action*)

## Η Δομή Δεδομένων για την Ουρά

- Όπως και στην περίπτωση του TREE-SEARCH, θα έχουμε μια **ουρά (queue)** η οποία υλοποιεί το σύνορο.
- Οι λειτουργίες της ουράς είναι οι παρακάτω:
  - EMPTY?(*queue*): ελέγχει αν η ουρά *queue* είναι άδεια.
  - POP(*queue*): αφαιρεί το πρώτο στοιχείο από την ουρά *queue* και το επιστρέφει.
  - INSERT(*element, queue*): εισάγει το στοιχείο *element* στην ουρά *queue* και επιστρέφει την ουρά που προκύπτει.

## Τύποι Ουράς

- Ουρά **FIFO** (first-in first-out). Εξάγει το στοιχείο της ουράς που εισήχθηκε πρώτο (**ουρά αναμονής**).
- Ουρά **LIFO** (last-in first-out). Εξάγει το στοιχείο της ουράς που εισήχθηκε τελευταίο. Λέγεται επίσης **στοίβα (stack)**.
- **Ουρά προτεραιότητας (priority queue)**. Εξάγει το στοιχείο της ουράς που έχει τη **μεγαλύτερη προτεραιότητα** με βάση μια συνάρτηση διάταξης των στοιχείων.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

21

21

## Ερώτηση

- Πως υλοποιούμε μια **ουρά αναμονής, μια στοίβα** ή μια **ουρά προτεραιότητας** σε Python;

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

22

22

## Απάντηση

- Εύκολα! (Εργασία 0 και συνέχεια).

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

23

23

## Ερώτηση

- Πως υλοποιούμε το εξερευνημένο σύνολο στην Python;

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

24

24

## Απάντηση

- Το εξερευνημένο σύνολο μπορεί να υλοποιηθεί με τη δομή **σύνολο (set)** της Python.
- Τα σύνολα υλοποιούνται εσωτερικά με **πίνακες κατακερματισμού (hash tables)** οπότε το να βρούμε αν μια κατάσταση είναι στοιχείο ενός συνόλου γίνεται πολύ αποδοτικά (χρονική πολυπλοκότητα  $O(1)$ ).

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

25

25

## Αλγόριθμοι

- Ας δούμε τώρα πως μπορούμε να υλοποιήσουμε τους παρακάτω αλγόριθμους στην περίπτωση που ο χώρος καταστάσεων είναι γράφος:
  - Αναζήτηση πρώτα κατά πλάτος (breadth-first search)
  - Αναζήτηση ομοιόμορφου κόστους (uniform cost search)
  - Αναζήτηση πρώτα κατά βάθος (depth-first search)
- Οι υπόλοιποι αλγόριθμοι που μελετήσαμε για την περίπτωση της αναζήτησης σε δένδρο υλοποιούνται με παρόμοιο τρόπο.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

26

26

## Αναζήτηση Πρώτα κατά Πλάτος

**function** BREADTH-FIRST-SEARCH(*problem*) **returns** a solution or failure

*node* ← a node with STATE=*problem*.INITIAL-STATE, PATH-COST=0  
**if** *problem*.GOAL-TEST(*node*.STATE) **then return** SOLUTION(*node*)



*frontier* ← a FIFO queue with *node* as the only element  
*explored* ← an empty set

**loop do**

**if** EMPTY?(*frontier*) **then return** failure

*node* ← POP(*frontier*)

add *node*.STATE to *explored*

**for each** *action* in *problem*.ACTIONS(*node*.STATE) **do**

*child* ← CHILD-NODE(*problem*, *node*, *action*)

**if** *child*.STATE is not in *explored* or *frontier* **then**

**if** *problem*.GOAL-TEST(*child*.STATE) **then return** SOLUTION(*child*)

*frontier* ← INSERT(*child*, *frontier*)



ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

27

27

## Αναζήτηση Πρώτα κατά Πλάτος

- Ο προηγούμενος αλγόριθμος διαφέρει από τους γενικούς αλγόριθμους TREE-SEARCH και GRAPH-SEARCH επειδή ελέγχει αν ένας κόμβος είναι κόμβος στόχου **όταν ο κόμβος παράγεται** και όχι όταν ο κόμβος αφαιρείται από το σύνορο.
- Όπως και ο GRAPH-SEARCH, ο αλγόριθμος απορρίπτει κάθε μονοπάτι που οδηγεί σε μία κατάσταση που είναι ήδη στο εξερευνημένο σύνολο ή στο σύνορο.
- Κάθε τέτοιο μονοπάτι έχει κόστος τουλάχιστον όσο κάποιο μονοπάτι που έχουμε βρει ήδη, άρα μπορούμε να το απορρίψουμε.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

28

28

## Ερώτηση

- Ποια είναι η **χρονική πολυπλοκότητα** του αλγόριθμου BREADTH-FIRST-SEARCH τώρα;

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

29

29

## Χρονική Πολυπλοκότητα

- Υποθέστε ότι κάνουμε αναζήτηση σε ένα ομοιόμορφο δένδρο όπου κάθε κατάσταση έχει  **$b$  διάδοχες καταστάσεις** ( $b$  είναι ο παράγοντας διακλάδωσης).
- Η ρίζα του δένδρου παράγει  $b$  κόμβους στο πρώτο επίπεδο, καθένας από τους οποίους παράγει  $b$  κόμβους στο δεύτερο επίπεδο. Άρα στο δεύτερο επίπεδο έχουμε συνολικά  $b^2$  κόμβους.
- Με όμοιο τρόπο βλέπουμε ότι στο 3<sup>ο</sup> επίπεδο έχουμε συνολικά  $b^3$  κόμβους κ.ο.κ.
- Τώρα υποθέστε ότι η λύση βρίσκεται σε **βάθος  $d$** . Στην χειρότερη περίπτωση, **ο τελευταίος κόμβος** που παράγεται θα είναι σε αυτό το επίπεδο.
- Άρα ο **συνολικός αριθμός κόμβων** που παράγεται στη χειρότερη περίπτωση είναι
 
$$1 + b + b^2 + b^3 + \dots + b^d = O(b^d)$$
- Άρα η πολυπλοκότητα χρόνου στην χειρότερη περίπτωση είναι  **$O(b^d)$** .

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

30

30

## Χρονική Πολυπλοκότητα

- Έχουμε δει ήδη ότι, αν ο αλγόριθμος ελέγχει ότι ένας κόμβος είναι κόμβος στόχου όταν ο κόμβος αυτός βγαίνει από το σύνορο και όχι όταν δημιουργείται, τότε η πολυπλοκότητα χρόνου είναι  $O(b^{d+1})$ .
- Άρα ο προηγούμενος αλγόριθμος είναι πιο αποδοτικός.

## Χωρική Πολυπλοκότητα

- Με όμοιο τρόπο μπορούμε να δούμε ότι το εξερευνημένο σύνολο και το σύνορο θα έχουν  $O(b^d)$  κόμβους.
- Άρα η πολυπλοκότητα χώρου είναι επίσης  $O(b^d)$ .



## Χρονική και Χωρική Πολυπλοκότητα

- Η επόμενη διαφάνεια μας δείχνει τις απαιτήσεις του BFS σε χρόνο και χώρο.
- Υποθέτουμε ότι  $b = 10$ , ότι μπορούμε να επεξεργαζόμαστε  $10^6$  κόμβους το δευτερόλεπτο και ότι κάθε κόμβος χρειάζεται 1KB μνήμη.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

33

33

## Μετρήσεις

Depth	Nodes	Time	Memory
2	110	.11 milliseconds	107 kilobytes
4	11,110	11 milliseconds	10.6 megabytes
6	$10^6$	1.1 seconds	1 gigabyte
8	$10^8$	2 minutes	103 gigabytes
10	$10^{10}$	3 hours	10 terabytes
12	$10^{12}$	13 days	1 petabyte
14	$10^{14}$	3.5 years	99 petabytes
16	$10^{16}$	350 years	10 exabytes

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

34

34

## Άλλες Ιδιότητες

- Ο αλγόριθμος αναζήτησης πρώτα κατά πλάτος στην περίπτωση που ο χώρος αναζήτησης είναι γράφος, έχει τις ίδιες καλές ιδιότητες που είδαμε στην περίπτωση του Tree-Search:
  - Είναι **πλήρης** (με την υπόθεση ότι ο παράγοντας διακλάδωσης  $b$  είναι πεπερασμένος).
  - Είναι **βέλτιστος** (με την υπόθεση ότι όλες οι ενέργειες έχουν το ίδιο μη αρνητικό κόστος).

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

35

35

## Αναζήτηση Ομοιόμορφου Κόστους

- Όταν όλα τα κόστη βήματος είναι σταθερά, ο αλγόριθμος αναζήτησης πρώτα κατά πλάτος είναι **βέλτιστος** και βρίσκει την **πιο αβαθή λύση**.
- Μπορούμε εύκολα να επεκτείνουμε αυτό τον αλγόριθμο στην περίπτωση που έχουμε οποιαδήποτε συνάρτηση κόστους βήματος.
- Αντί να επεκτείνει τον πιο αβαθή κόμβο, ο αλγόριθμος **αναζήτησης ομοιόμορφου κόστους** επεκτείνει τον κόμβο  $n$  με το **μικρότερο κόστος μονοπατιού**  $g(n)$ .
- Στην περίπτωση αυτή το σύνολο υλοποιείται σαν μια **ουρά προτεραιότητας** με συνάρτηση  $g$ .

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

36

36

## Αναζήτηση Ομοιόμορφου Κόστους

**function** UNIFORM-COST-SEARCH(*problem*) **returns** a solution or failure

*node* ← a node with STATE=*problem*.INITIAL-STATE, PATH-COST=0

*frontier* ← a priority queue ordered by PATH-COST, with *node* as the only element

*explored* ← an empty set

**loop do**

**if** EMPTY?(*frontier*) **then return** failure

*node* ← POP(*frontier*)

**if** *problem*.GOAL-TEST(*node*.STATE) **then return** SOLUTION(*node*)

  add *node*.STATE to *explored*

**for each** *action* in *problem*.ACTIONS(*node*.STATE) **do**

*child* ← CHILD-NODE(*problem*, *node*, *action*)

**if** *child*.STATE is not in *explored* or *frontier* **then**

*frontier* ← INSERT(*child*, *frontier*)

**else if** *child*.STATE is in *frontier* with higher PATH-COST **then**

      replace that *frontier* node with *child*

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

37

37

## Αναζήτηση Ομοιόμορφου Κόστους

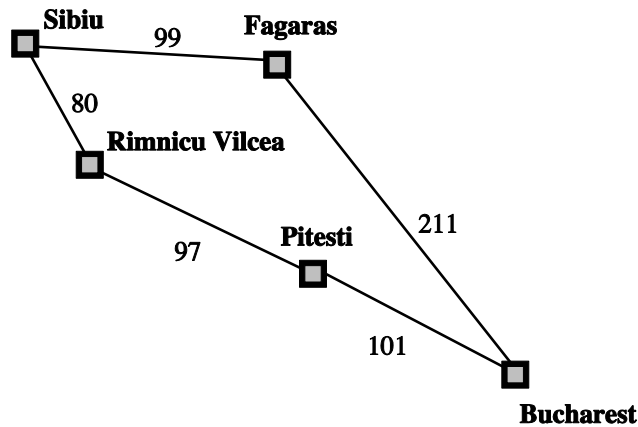
- Παρατηρήστε τις **διαφορές** με τον αλγόριθμο αναζήτησης πρώτα κατά πλάτος:
  - Χρησιμοποιείται ουρά προτεραιότητας με συνάρτηση  $g$  αντί για ουρά αναμονής.
  - Ο έλεγχος στόχου εφαρμόζεται όταν ένας κόμβος επιλέγεται από το σύνορο για να επεκταθεί και όχι όταν δημιουργείται (όπως και στον γενικό αλγόριθμο GRAPH-SEARCH).
  - Ελέγχουμε αν έχουμε βρει ένα καλύτερο μονοπάτι προς ένα κόμβο που ήδη βρίσκεται στο σύνορο.
- Όλες αυτές οι διαφορές είναι απαραίτητες όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

38

38

## Παράδειγμα



ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

39

39

## Συζήτηση

- Αν ο έλεγχος στόχου ήταν όπως στον αλγόριθμο αναζήτησης πρώτα κατά πλάτος, θα είχαμε επιλέξει ένα μονοπάτι με **μη βέλτιστο κόστος**: το μονοπάτι Sibiu-Fagaras-Bucharest με κόστος 310 αντί του βέλτιστου Sibiu-Rimnicu Vilcea-Pitesti-Bucharest με κόστος 278.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

40

40

## Ιδιότητες

- Ο αλγόριθμος αναζήτησης ομοιόμορφου κόστους που παρουσιάσαμε έχει τις ίδιες ιδιότητες με την περίπτωση του TREE-SEARCH (πληρότητα, βέλτιστη συμπεριφορά, υπολογιστική πολυπλοκότητα χώρου και χρόνου).

## Ερώτηση

- Πως υλοποιούμε αποδοτικά τη δομή για το **σύνορο** σε Python για την περίπτωση της αναζήτησης ομοιόμορφου κόστους;

## Υλοποίηση

- Η δομή δεδομένων για το σύνορο πρέπει να υποστηρίζει αποδοτικά τις λειτουργίες της **ουράς προτεραιότητας** και την **λειτουργία του ελέγχου αν ένα στοιχείο ανήκει στο σύνορο**.
- Μια τέτοια δομή είναι η υλοποίηση της ουράς προτεραιότητας με **σωρό (heap)**. Για την δομή αυτή έχουμε τις εξής πολυπλοκότητες ( $n$  είναι ο αριθμός των στοιχείων της ουράς):
  - Εισαγωγή στοιχείου:  $O(\log n)$
  - Εξαγωγή στοιχείου με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα:  $O(\log n)$
  - Έλεγχος αν ένα στοιχείο ανήκει στην ουρά:  $O(n)$ . Αυτή η πολυπλοκότητα μπορεί να γίνει  $O(1)$  αν κρατάμε παράλληλα ένα **πίνακα κατακερματισμού** που χρησιμοποιείται μόνο για αυτό τον έλεγχο. Έτσι όμως ξοδεύουμε διπλό χώρο.

## Υλοποίηση σε Python

- Δοκιμάστε το!

## Αναζήτηση Πρώτα Κατά Βάθος

- Ο αλγόριθμος αναζήτησης πρώτα κατά βάθος μπορεί να υλοποιηθεί όπως ο γενικός αλγόριθμος GRAPH-SEARCH χρησιμοποιώντας μια **στοίβα** για την υλοποίηση του συνόρου.
- Μπορεί επίσης να υλοποιηθεί και **αναδρομικά** με μία συνάρτηση που καλεί τον εαυτό της σε κάθε ένα από τα παιδιά της.

## Πληρότητα

- Όταν ο αλγόριθμος αναζήτησης πρώτα κατά βάθος υλοποιείται ώστε να ελέγχουμε ότι κάθε νέα κατάσταση δεν περιέχεται στο εξερευνημένο σύνολο, τότε, για **πεπερασμένους χώρους καταστάσεων**, είναι **πλήρης** σε αντίθεση με την υλοποίηση με TREE-SEARCH.
- Για **άπειρους χώρους καταστάσεων** και οι δύο εκδόσεις είναι **μη πλήρεις** (όταν συναντήσουν ένα άπειρο μονοπάτι που δεν περιέχει κατάσταση στόχου).

## Παράδειγμα

- Το παρακάτω πρόβλημα αναζήτησης έχει άπειρο χώρο καταστάσεων:
  - **Καταστάσεις:** Θετικοί και αρνητικοί ακέραιοι.
  - **Αρχική κατάσταση:** Ο αριθμός 0.
  - **Ενέργειες:** Προσθέστε 1 ή αφαιρέστε 1 από τον ακέραιο στο οποίο βρισκόμαστε.
  - **Κατάσταση στόχου:** Ένας δοσμένος ακέραιος.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

47

47

## Παράδειγμα

- Ο ακέραιος 5 προκύπτει ως εξής:
 
$$((((0 + 1) + 1) + 1) + 1) + 1)$$
- **Άπειρο μονοπάτι** προκύπτει αν για την παραπάνω κατάσταση στόχου επιλέγουμε να χρησιμοποιούμε πάντα πρώτη την πράξη της αφαίρεσης.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

48

48



## Παράδειγμα



- Το παρακάτω πρόβλημα αναζήτησης που προτάθηκε από τον Knuth έχει άπειρο χώρο καταστάσεων:
  - **Καταστάσεις:** Θετικοί ακέραιοι.
  - **Αρχική κατάσταση:** Ο αριθμός 4.
  - **Ενέργειες:** Εφαρμόστε τις πράξεις παραγοντικό (για ακεραίους μόνο), τετραγωνική ρίζα ή κατώφλι.
  - **Κατάσταση στόχου:** Ένας δοσμένος ακέραιος.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

49

49

## Παράδειγμα

- Μπορούμε να φτάσουμε στην κατάσταση στόχου 5 ως εξής:

$$\left[ \sqrt{\sqrt{\sqrt{\sqrt{\sqrt{(4!)!}}}}} \right] = 5$$

- **Άπειρο μονοπάτι** προκύπτει αν για την παραπάνω κατάσταση στόχου επιλέγουμε να χρησιμοποιούμε πάντα πρώτη την πράξη του παραγοντικού.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

50

50

## Άπειροι Χώροι Καταστάσεων

- Άπειροι χώροι καταστάσεων συναντιούνται συχνά σε προβλήματα που αφορούν μαθηματικές εκφράσεις, αποδείξεις, κυκλώματα, προγράμματα και άλλα αντικείμενα που ορίζονται αναδρομικά.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

51

51

## Βέλτιστη Συμπεριφορά

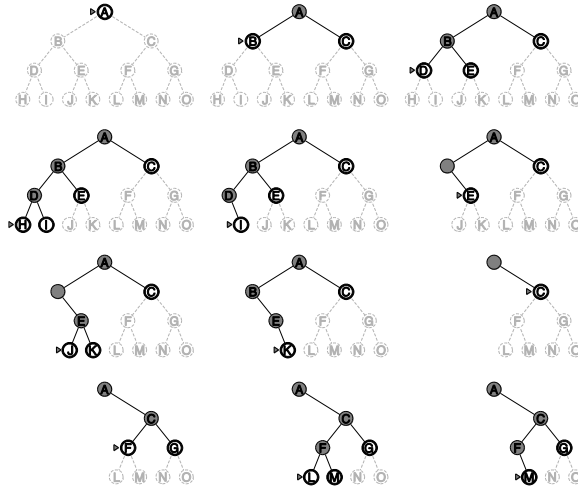
- Και στις δύο περιπτώσεις (πεπερασμένος ή άπειρος χώρος καταστάσεων), η αναζήτηση πρώτα κατά βάθος **δεν είναι βέλτιστη**.
- **Παράδειγμα:** στην επόμενη διαφάνεια αν οι καταστάσεις J και C είναι καταστάσεις στόχου. Ο αλγόριθμος θα επιστρέψει το μονοπάτι προς τη μη βέλτιστη κατάσταση J.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

52

52

## Παράδειγμα



ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

53

53

## Πολυπλοκότητα

- Η **χρονική πολυπλοκότητα** του αλγόριθμου αναζήτησης πρώτα κατά βάθος στην περίπτωση της αναζήτησης σε γράφο είναι  $O(b^m)$  όπως αποδείξαμε για την περίπτωση του TREE-SEARCH όπου  $m$  είναι το βάθος οποιουδήποτε κόμβου.
- Το  $m$  μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερο του  $d$  που είναι το βάθος της πιο ρηχής λύσης.
- Η χρήση του εξερευνημένου συνόλου όμως **αλλάζει την γραμμική πολυπλοκότητα χώρου** του αλγόριθμου που τώρα γίνεται **ίδια με αυτή της αναζήτησης πρώτα κατά πλάτος**.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

54

54

## Χωρική Πολυπλοκότητα

- Με τις ίδιες υποθέσεις που κάναμε νωρίτερα για τον BFS, ο DFS σε δένδρα χρειάζεται χώρο **156KB αντί για 10 exabytes** στο βάθος  $d = 16$ .

## Αναζήτηση με Υπαναχώρηση

- Μια παραλλαγή της αναζήτησης πρώτα κατά βάθος είναι η **αναζήτηση με υπαναχώρηση (backtracking search)**.
- Ο αλγόριθμος αυτός δημιουργεί μόνο ένα παιδί ενός κόμβου κάθε φορά αντί για όλα τα παιδιά. Κάθε κόμβος όμως πρέπει να θυμάται ποιο παιδί να δημιουργήσει την επόμενη φορά.
- Έτσι η πολυπλοκότητα χώρου γίνεται  $O(m)$  αντί για  $O(bm)$ .
- Θα μελετήσουμε λεπτομερώς παραλλαγές αυτού του αλγόριθμου στην ενότητα «Προβλήματα Ικανοποίησης Περιορισμών».

## Ο DFS Είναι Δημοφιλής

- Η καλή πολυπλοκότητα χώρου της αναζήτησης πρώτα κατά βάθος στην περίπτωση του TREE-SEARCH είναι υπεύθυνη για τη **χρήση της σε πολλές περιοχές της Τεχνητής Νοημοσύνης** π.χ., προβλήματα ικανοποίησης περιορισμών, λογικός προγραμματισμός, ικανοποιησιμότητα στη προτασιακή λογική κλπ.

ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

57

57

## Υλοποίηση

- Οι αλγόριθμοι που παρουσιάσαμε σε αυτές τις διαφάνειες είναι κάποιοι από αυτούς που θα υλοποιήσετε στο Pacman project P1.

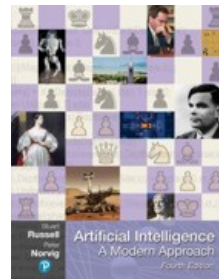
ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

58

58

# Μελέτη

- Βιβλίο ΑΙΜΑ, 4<sup>η</sup> έκδοση (μπορείτε να το πάρετε από τον Εύδοξο).
  - Κεφάλαιο 3 (3.1-3.4)



ΥΣ02 Τεχνητή Νοημοσύνη

59

59