

ΕΝΟΤΗΤΑ 5

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΞΙΚΩΝ ΜΕ

ΙΣΟΖΥΓΙΣΜΕΝΑ ΔΕΝΔΡΑ

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

1

Ισοζυγισμένα Δένδρα

Χρονική Πολυπλοκότητα αναζήτησης σε δομές που έχουν ήδη διδάχθει:

☐ Στατική Μη-Ταξινομημένη Λίστα $\rightarrow O(n)$, όπου n το πλήθος των κόμβων

☐ Στατική Ταξινομημένη Λίστα $\rightarrow O(n)$

☐ Δυναμική μη-ταξινομημένη λίστα $\rightarrow O(n)$

☐ Δυναμική ταξινομημένη λίστα $\rightarrow O(n)$

☐ Μη-ταξινομημένα Δένδρα $\rightarrow O(n)$, όπου n το πλήθος των κόμβων

☐ Ταξινομημένα Δένδρα $\rightarrow O(h)$, όπου h το ύψος του δένδρου

Τι τιμές μπορεί να πάρει το h ;

Αναζητούνται δομές δεδομένων για την υλοποίηση δυναμικών λεξικών που να παρουσιάζουν καλύτερη χρονική πολυπλοκότητα από αυτή που παρέχουν οι παραπάνω δομές (π.χ., όλες οι λειτουργίες να έχουν χρονική πολυπλοκότητα $O(\log n)$).

Γραμμική
πολυπλοκότητα

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

2

Δένδρα AVL

Ένα ταξινομημένο δυαδικό δένδρο T ονομάζεται **AVL** (ή **ισοζυγισμένο κατ' ύψος**) αν και μόνο αν τα ύψη των δύο υποδένδρων κάθε κόμβου v διαφέρουν το πολύ κατά ένα.

Για κάθε κόμβο v ενός δυαδικού δένδρου T , ορίζουμε το **αριστερό ύψος του v** ($\text{LeftHeight}(v)$) ως εξής:

$$\text{LeftHeight}(v) = \begin{cases} 0 & \text{αν } v \rightarrow LC == \text{NULL} \\ 1 + \text{Height}(v \rightarrow LC) & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Ομοίως, ορίζουμε το **δεξιό ύψος του v** ($\text{RightHeight}(v)$) ως εξής:

$$\text{RightHeight}(v) = \begin{cases} 0 & \text{αν } v \rightarrow RC == \text{NULL} \\ 1 + \text{Height}(v \rightarrow RC) & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Το $\text{LeftHeight}(T)$ ($\text{RightHeight}(T)$) του δένδρου ισούται με το $\text{LeftHeight}(R)$ ($\text{RightHeight}(R)$), αντίστοιχα, όπου R είναι ο κόμβος ρίζα του T .

Δένδρα AVL

Το **balance (ισοζύγιο)** του κόμβου v ορίζεται ως εξής:
 $\text{balance}(v) = \text{RightHeight}(v) - \text{LeftHeight}(v)$.

Σε ένα δένδρο AVL (Adel'son, Vel'skii & Landis), κάθε κόμβος πρέπει να έχει balance 0, +1 ή -1.

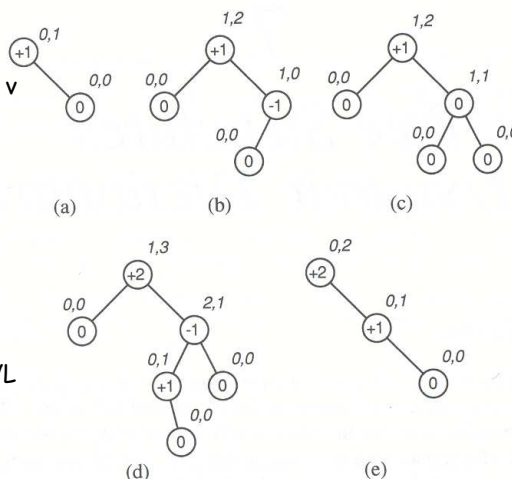
Πρόταση 1

Κάθε υποδένδρο ενός δένδρου AVL είναι επίσης δένδρο AVL.

Θεώρημα

Το ύψος h ενός δένδρου AVL με n στοιχεία είναι $O(\log n)$.

Μπορούμε να συμπεράνουμε κάτι για την πολυπλοκότητα της $\text{AVLTreeLookUp}()$?



Τα δένδρα (a), (b) και (c) είναι δένδρα AVL, ενώ τα (d) και (e) δεν είναι.

Δένδρα AVL - Απόδειξη Θεωρήματος

- Αναζητούμε ένα πάνω φράγμα στο μήκος h του μακρύτερου μονοπατιού οποιουδήποτε δένδρου AVL με n κόμβους.
- Έστω ένας οποιουδήποτε ακέραιος h . Θα εστιάσουμε στο ερώτημα «Ποιος είναι ο μικρότερος ακέραιος n τ.ω. να υπάρχει ένα δένδρο AVL ύψους h με n κόμβους;»
- W_h : σύνολο όλων των δένδρων AVL ύψους h με ελάχιστο πλήθος κόμβων.
- w_h : πλήθος κόμβων σε οποιοδήποτε από αυτά τα δένδρα.
- Προφανώς $w_0 = 1$ και $w_1 = 2$.
- Έστω ότι T είναι οποιοδήποτε δένδρο AVL στο W_h και έστω T_L και T_R το αριστερό και το δεξιό υποδένδρο του T , αντίστοιχα.
- Αφού το T έχει ύψος h , είτε το T_L ή το T_R έχει ύψος $h-1$ (ας υποθέσουμε χωρίς βλάβη της γενικότητας ότι το T_R έχει ύψος $h-1$).
- Το T_R είναι δένδρο AVL ύψους $h-1$ και μάλιστα θα πρέπει να έχει το μικρότερο πλήθος κόμβων μεταξύ των δένδρων AVL ύψους $h-1$ (αφού στην αντίθετη περίπτωση, θα μπορούσε να αντικατασταθεί από κάποιο δένδρο AVL ύψους $h-1$ με λιγότερους κόμβους και να οδηγηθούμε έτσι σε ένα δένδρο AVL ύψους h με λιγότερους κόμβους από ότι το T , το οποίο αντιτίθεται στον ορισμό του T).

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

5

Δένδρα AVL - Απόδειξη Θεωρήματος

- Άρα, $T_R \in W_{h-1}$.
- Αφού το T είναι δένδρο AVL, το T_L έχει ύψος είτε $h-1$ ή $h-2$. Εφόσον το T είναι δένδρο με ελάχιστο πλήθος κόμβων μεταξύ εκείνων με ύψος h , θα πρέπει να ισχύει $T_L \in W_{h-2}$.
- Επομένως:
$$w_h = 1 + w_{h-2} + w_{h-1}$$
- Μπορεί να αποδειχθεί (επαγωγικά) ότι $w_h = F_{h+3} - 1$, όπου F_i είναι ο i -οστός όρος της ακολουθίας Fibonacci, για τον οποίο ισχύει ότι $F_i > \phi^i / \sqrt{5} - 1$, όπου $\phi = (1 + \sqrt{5}) / 2$.
- Επομένως, $n \geq w_h > \phi^{h+3} / \sqrt{5} - 2$.
- Από την παραπάνω ανίσωση προκύπτει ότι $h = O(\log n)$.

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

6

Δένδρα AVL - Εισαγωγή

Πως μπορούμε να υλοποιήσουμε την `Insert()`? Που διαφέρει από την `Insert()` σε δυαδικό δένδρο αναζήτησης?

1η Προσπάθεια Σχεδίασης Αλγορίθμου Εισαγωγής

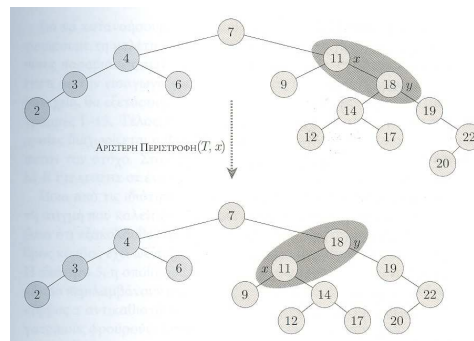
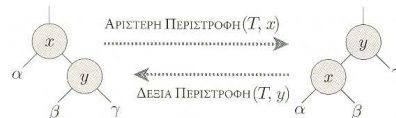
- ❑ Ακολουθώντας το γνωστό αλγόριθμο εισαγωγής σε ταξινομημένο δένδρο (δένδρο δυαδικής αναζήτησης), βρίσκουμε το μονοπάτι από τη ρίζα προς τον κατάλληλο κόμβο (έστω v) στον οποίο θα γίνει η εισαγωγή.
- ❑ Υπολογίζουμε τα νέα *balances* για κάθε κόμβο του μονοπατιού αυτού.
- ❑ Αν το *balance* όλων των κόμβων του μονοπατιού εξακολουθεί να είναι 0, +1 ή -1, η διαδικασία εισαγωγής τερματίζει.
- ❑ Αν, ωστόσο, το *balance* κάποιου κόμβου αλλάζει σε +2 ή σε -2, θα πρέπει να ακολουθηθεί διαδικασία προσαρμογής του *balance* στο κατάλληλο εύρος.
 - Η διαδικασία αυτή θα έχει ως αποτέλεσμα το δένδρο να εξακολουθεί να είναι ταξινομημένο δυαδικό δένδρο με τους ίδιους κόμβους και κλειδιά, αλλά με όλους τους κόμβους να έχουν *balance* 0, 1, ή -1.

Δένδρα AVL - Περιστροφές

Μια **περιστροφή** είναι μια τοπική λειτουργία σε ένα ταξινομημένο δένδρο η οποία διατηρεί την ιδιότητα της ταξινόμησης.

Αριστερή Περιστροφή γύρω από έναν κόμβο x (ο οποίος έχει δεξιό θυγατρικό κόμβο $y \neq \text{null}$)

- ❑ Η αριστερή περιστροφή στρέφει τους x και y κατά αντίστροφη φορά αυτής των δεικτών του ρολογιού.
- ❑ Καθιστά τον y νέα ρίζα του υποδένδρου, μετατρέποντας τον x σε αριστερό παιδί του y και το αριστερό υποδένδρο του y σε δεξιό υποδένδρο του x .

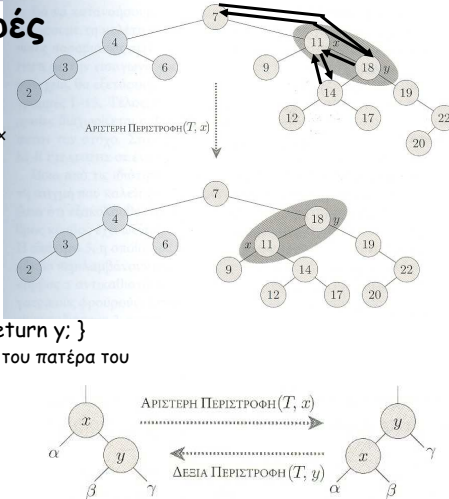


Δένδρα AVL - Περιστροφές

```

Procedure LeftRotate(pointer R, pointer x) {
    y = x->RC;           // ορισμός του y
    // μετατροπή αριστερού υποδένδρου γ σε δεξιό υποδένδρο x
    x->RC = y->LC;
    if (y->LC != NULL) y->LC->p = x;

    /* νέος πατρικός κόμβος του γ γίνεται ο πρώην
    πατρικός κόμβος του x και αν δεν υπάρχει
    τέτοιος κόμβος, νέα ρίζα του δένδρου γίνεται το γ */
    y->p = x->p;
    if (x->p == NULL) { x->LC = x; x->p = y; return y; }
    if (x == x->p->LC) // αν ο x είναι αριστερό παιδί του πατέρα του
        x->p->LC = y;
    else x->p->RC = y;
    y->LC = x; // αριστερό παιδί του γ γίνεται το x
    x->p = y; // πατέρας του x γίνεται το γ
}
    
```



Μια δεξιά περιστροφή γίνεται με συμμετρικό τρόπο και ο κώδικας της είναι απολύτως συμμετρικός με τον παραπάνω.

Χρονική Πολυπλοκότητα μιας περιστροφής: $O(1)$

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

9

Δένδρα AVL - Εισαγωγή

Ο πρώτος κόμβος στο μονοπάτι από τον κόμβο v (που εισήχθη στο δένδρο) προς τη ρίζα, του οποίου το balance ήταν $+1$ ή -1 (πριν την εισαγωγή) ονομάζεται **κρίσιμος κόμβος**.

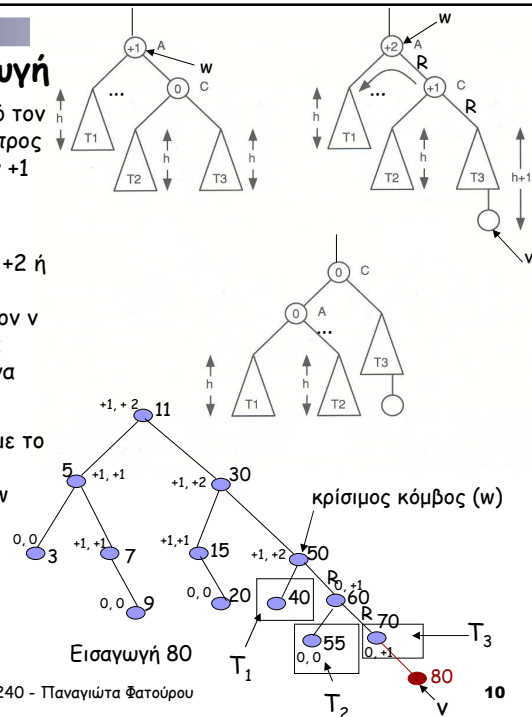
Αν ο κόμβος αυτός αποκτά balance $+2$ ή -2 μετά την εισαγωγή, τότε είναι ο πρώτος κόμβος στο μονοπάτι από τον v στη ρίζα για τον οποίο θα πρέπει να γίνουν κατάλληλες ενέργειες ώστε να διορθωθεί το balance του.

Διακρίνουμε περιπτώσεις ανάλογα με το είδος των δύο πρώτων ακμών του μονοπατιού από τον κρίσιμο κόμβο w προς τον εισαχθέντα κόμβο v .

Περίπτωση RR (Right-Right)

Και οι δύο ακμές οδηγούν δεξιά.

Εκτελούμε μια αριστερή περιστροφή γύρω από τον κρίσιμο κόμβο.

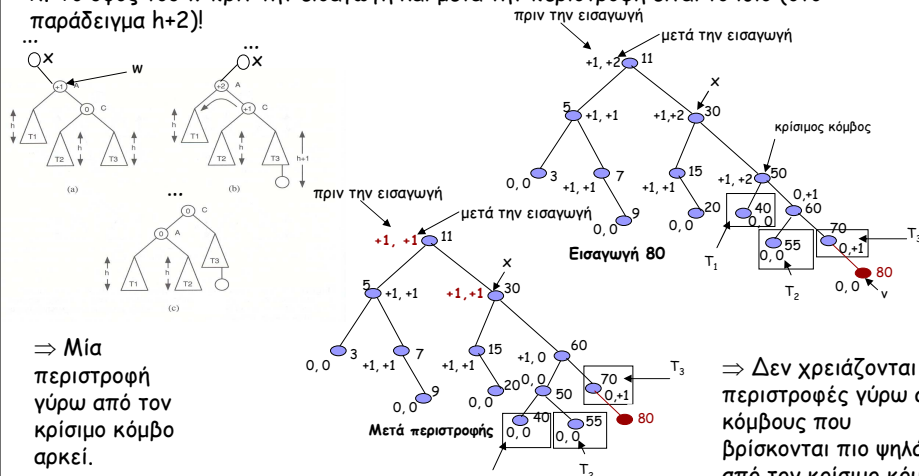


HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

10

Δένδρα AVL - Εισαγωγή - Περίπτωση RR

Παρατήρηση: Έστω x ο πατρικός κόμβος του w και έστω ότι ο w είναι δεξιό παιδί του x . Το ύψος του w πριν την εισαγωγή και μετά την περιστροφή είναι το ίδιο (στο παράδειγμα $h+2$)!



⇒ Μία περιστροφή γύρω από τον κρίσιμο κόμβο αρκεί.

► Όλοι οι κόμβοι στο μονοπάτι από τον κρίσιμο κόμβο προς τη ρίζα έχουν το ίδιο balance μετά την περιστροφή με αυτό που είχαν πριν την εισαγωγή του v στο δένδρο. HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

⇒ Δεν χρειάζονται περιστροφές γύρω από κόμβους που βρίσκονται πιο ψηλά από τον κρίσιμο κόμβο στο μονοπάτι από τον v προς τη ρίζα.

11

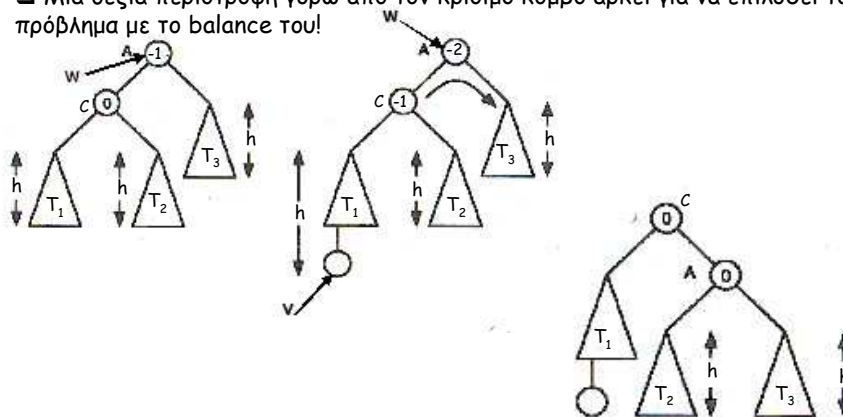
Δένδρα AVL - Εισαγωγή - Περίπτωση LL

Περίπτωση LL

Και οι δύο ακμές οδηγούν αριστερά.

□ Είναι συμμετρική της περίπτωσης RR!

□ Μία δεξιά περιστροφή γύρω από τον κρίσιμο κόμβο αρκεί για να επιλυθεί το πρόβλημα με το balance του!



HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

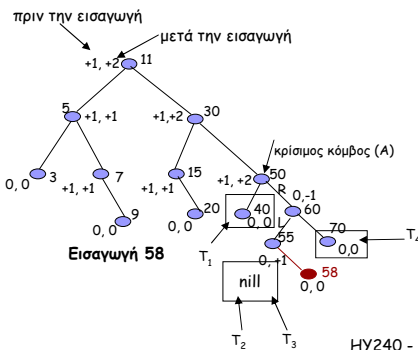
12

Δένδρα AVL - Εισαγωγή - Περίπτωση RL

Περίπτωση RL

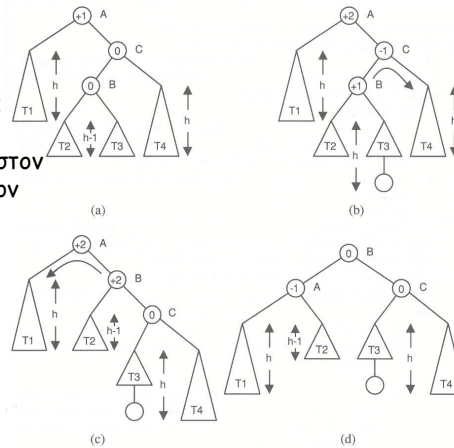
Η πρώτη ακμή οδηγεί δεξιά και η δεύτερη αριστερά.

□ Απαιτούνται δύο περιστροφές, μια δεξιά περιστροφή γύρω από τον επόμενο του κρίσιμου κόμβου στο μονοπάτι που οδηγεί στον ν και μια αριστερή περιστροφή γύρω από τον κρίσιμο κόμβο.

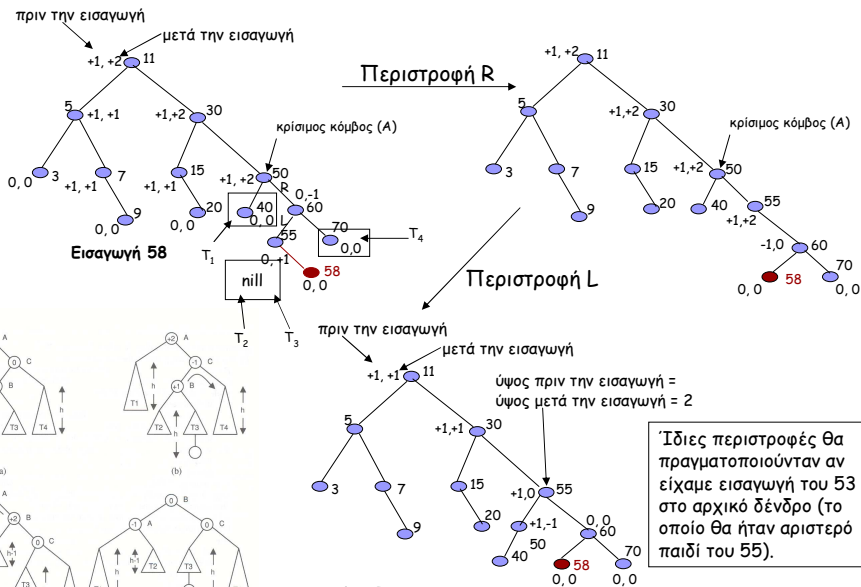


HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

13



Δένδρα AVL - Εισαγωγή - Περίπτωση RL



HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

14

Δένδρα AVL - Εισαγωγή - Περίπτωση LR

Περίπτωση LR

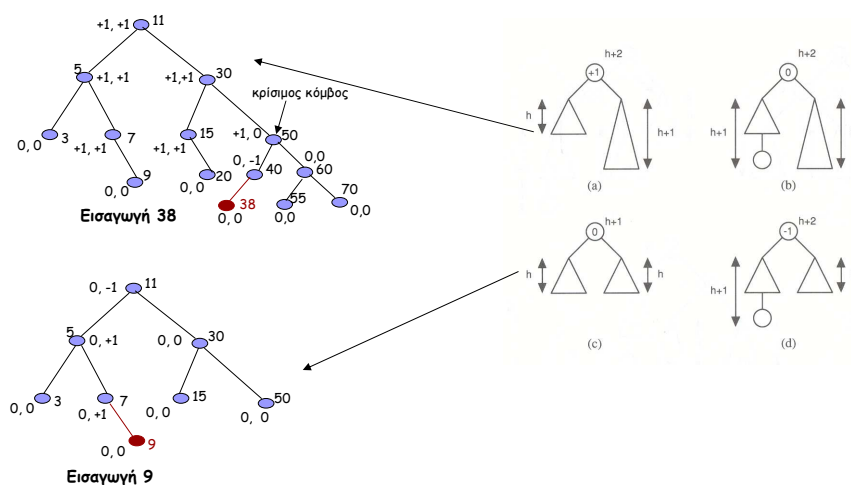
Η πρώτη ακμή οδηγεί αριστερά και η δεύτερη δεξιά.

- ☐ Είναι συμμετρική της περιπτώσεως RL.
- ☐ Απαιτούνται δύο περιστροφές, μια αριστερή περιστροφή γύρω από τον επόμενο του κρίσιμου κόμβου στο μονοπάτι που οδηγεί στον n και μια δεξιά περιστροφή γύρω από τον κρίσιμο κόμβο.

Άσκηση για το σπίτι

Φτιάξτε τα αντίστοιχα συμμετρικά σχήματα εκείνων που παρουσιάστηκαν στις δύο τελευταίες διαφάνειες και μελετήστε τις ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιηθούν στην περίπτωση LR.

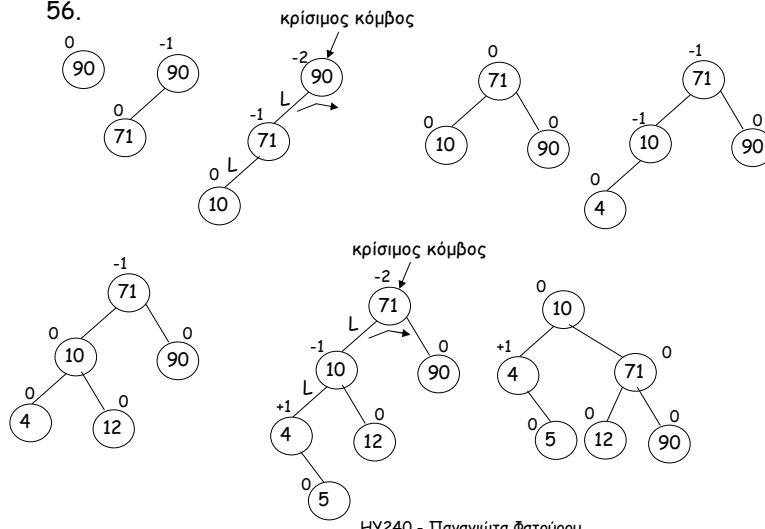
Δένδρα AVL - Εισαγωγή - Περιπτώσεις που δεν απαιτούν περιστροφές



Εισαγωγές κόμβων σε AVL δένδρο

Παράδειγμα

Διαδοχικές εισαγωγές των κλειδιών με τιμές 90, 71, 10, 4, 12, 5, 19, 52 και 56.



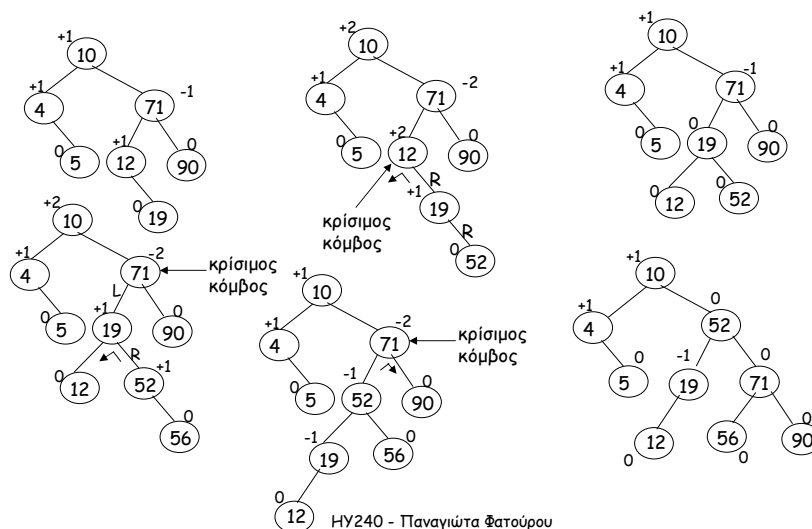
ΗΥ240 - Παναγιώτα Φατούρου

17

Εισαγωγές κόμβων σε AVL δένδρο

Παράδειγμα

Διαδοχικές εισαγωγές των κλειδιών με τιμές 90, 71, 10, 4, 12, 5, 19, 52 και 56.



ΗΥ240 - Παναγιώτα Φατούρου

18

Δένδρα AVL - Εισαγωγή - Παρατηρήσεις

- Κάθε κόμβος στο μονοπάτι από τον εισαχθέντα κόμβο v μέχρι τον κρίσιμο κόμβο w είχε $balance$ 0 πριν την εισαγωγή. Άρα, θα έχει $balance$ +1 ή -1 μετά την εισαγωγή.

Τι καθορίζει το αν κάποιος τέτοιος κόμβος θα έχει $balance$ +1 ή -1;

Το αν η πρώτη ακμή στο μονοπάτι από τον κόμβο αυτό προς τον εισαχθέντα κόμβο οδηγεί αριστερά ή δεξιά.

- Το $balance$ του κρίσιμου κόμβου w γίνεται είτε 0 ή +2 (ή -2, αντίστοιχα) μετά την τοποθέτηση του νέου κόμβου στην κατάλληλη θέση στο δένδρο.

Γιατί; Πότε το $balance$ γίνεται 0 και πότε +2 (ή -2);

Αν το $balance$ ήταν +1 (-1) και η πρώτη ακμή στο μονοπάτι από τον w στον v οδηγεί δεξιά (αριστερά, αντίστοιχα), ο w θα έχει $balance$ +2 (-2, αντίστοιχα) μετά την τοποθέτηση του v , ενώ αν το μονοπάτι οδηγεί αριστερά (δεξιά, αντίστοιχα), τότε ο w θα έχει $balance$ 0 μετά την τοποθέτηση του v .

Παρατήρηση

Οι περιστροφές γίνονται γύρω από το πολύ δύο κόμβους στο δένδρο ανάλογα με την περίπτωση που πρέπει να εφαρμοστεί (μία περιστροφή γύρω από τον κρίσιμο κόμβο για τις περιπτώσεις LL, RR και δύο περιστροφές, η πρώτη γύρω από τον επόμενο του κρίσιμου κόμβου στο μονοπάτι που ακολουθήθηκε κατά την τοποθέτηση του εισαχθέντα κόμβου και η δεύτερη γύρω από τον κρίσιμο κόμβο, για τις περιπτώσεις RL, LR).

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

19

Δένδρα AVL - Εισαγωγή - Παρατηρήσεις

Καθώς η αναζήτηση του πατρικού κόμβου του v εξελίσσεται, αρκεί να αποθηκεύεται ο τελευταίος κόμβος με $balance$ +1 ή -1 στο μονοπάτι που ακολουθείται.

Μετά την τοποθέτηση του v στο δένδρο (και πριν τις περιστροφές), ξεκινώντας από τον κρίσιμο κόμβο w μπορεί να ακολουθηθεί και πάλι το ίδιο μονοπάτι προς τον εισερχόμενο κόμβο ώστε να διορθωθούν τα $balances$.

Τέλος, αν χρειάζεται πραγματοποιούνται περιστροφές.

Γιατί μπορούμε να βρούμε και πάλι αυτό το μονοπάτι?

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία αναζήτησης (ξεκινώντας από τον w), δηλαδή αν το κλειδί του προς εισαγωγή κόμβου είναι μικρότερο από εκείνο του τρέχοντος ο επόμενος κόμβος στο μονοπάτι είναι στα αριστερά του τρέχοντος, ενώ διαφορετικά στα δεξιά.

Πώς διορθώνουμε τα $balances$?

Έστω ένας οποιοσδήποτε κόμβος x στο μονοπάτι από τον w στον v . Ο κόμβος αυτός είχε $balance$ 0. Αν η πρώτη ακμή στο μονοπάτι από τον x στον v οδηγεί αριστερά του x , τότε το $balance$ του x γίνεται -1, διαφορετικά η νέα τιμή του $balance$ θα είναι +1.

Ποια είναι η πολυπλοκότητα της $AVLInsert()$?

$O(\text{ύψος δένδρου})$. Θεώρημα $\Rightarrow$ ύψος δένδρου AVL = $O(\log n)$

$\Rightarrow$ Χρονική Πολυπλοκότητα = $O(\log n)$

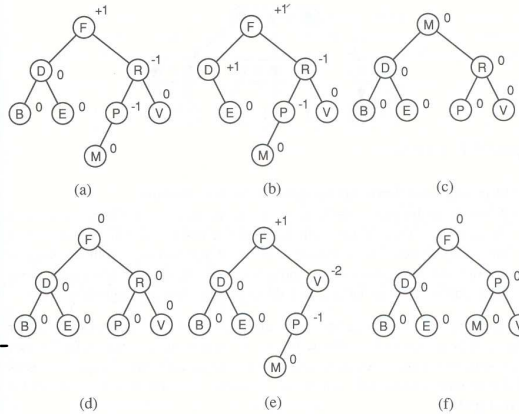
HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

20

Δένδρα AVL - Διαγραφή

Αρχικά ακολουθούμε το γνωστό αλγόριθμο διαγραφής σε δυαδικό δένδρο:

- 1) Διαγραφή του ίδιου του κόμβου v αν είναι φύλλο.
- 2) Αντικατάστασή του από το παιδί του αν έχει μόνο ένα παιδί.
- 3) Αντικατάστασή του από τον επόμενό του στην ενδοδιατεταγμένη διάταξη αν έχει δύο παιδιά.



(a) Αρχικό δένδρο, (b) Διαγραφή του B, (c) Διαγραφή του F, (d) Διαγραφή του M, (e) Διαγραφή του R

Balance

Αν 1) ή 2), το balance του γονικού κόμβου w του v αλλάζει.

Αν 3), το balance του γονικού κόμβου w του επόμενου του v στην ενδοδιατεταγμένη διάσχιση αλλάζει.

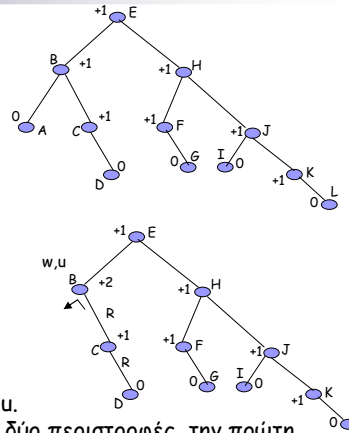
HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

21

Δένδρα AVL - Διαγραφή

Αλγόριθμος

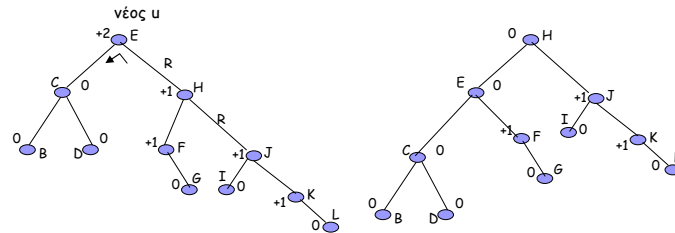
1. Εξετάζουμε όλο το μονοπάτι (ας το συμβολίσουμε με P1) από τον w ως τη ρίζα και για κάθε κόμβο του μονοπατιού αυτού που έχει balance $+2$ ή -2 μετά τη διαγραφή, ίσως χρειαστεί να γίνουν περιστροφές ως ακολούθως.
2. Έστω u ο πρώτος τέτοιος κόμβος στο P1.
3. Καθορίζουμε το μονοπάτι P2 με το μεγαλύτερο μήκος από τον u προς οποιοδήποτε φύλλο του υποδένδρου του και εξετάζουμε τις δύο πρώτες ακμές σε αυτό το μονοπάτι.
 - Αν αυτές είναι τύπου LL (ή RR) πραγματοποιούμε μια περιστροφή R (ή L, αντίστοιχα) γύρω από τον u .
 - Αν αυτές είναι τύπου RL (ή LR) πραγματοποιούμε δύο περιστροφές, την πρώτη τύπου R (L, αντίστοιχα) γύρω από τον επόμενο του u στο μονοπάτι P2 και τη δεύτερη τύπου L (R, αντίστοιχα) γύρω από τον u .
4. Επαναπροσδιορίζουμε τα balances των κόμβων στο μονοπάτι P1 και αν εξακολουθούν να υπάρχουν κόμβοι με μη-επιτρεπτό balance σε αυτό:
 - Θέτουμε u = πρώτος κόμβος στο μονοπάτι από τον u στη ρίζα με μη επιτρεπτό balance;
 - Πηγαίνουμε στο Βήμα 3;



HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

22

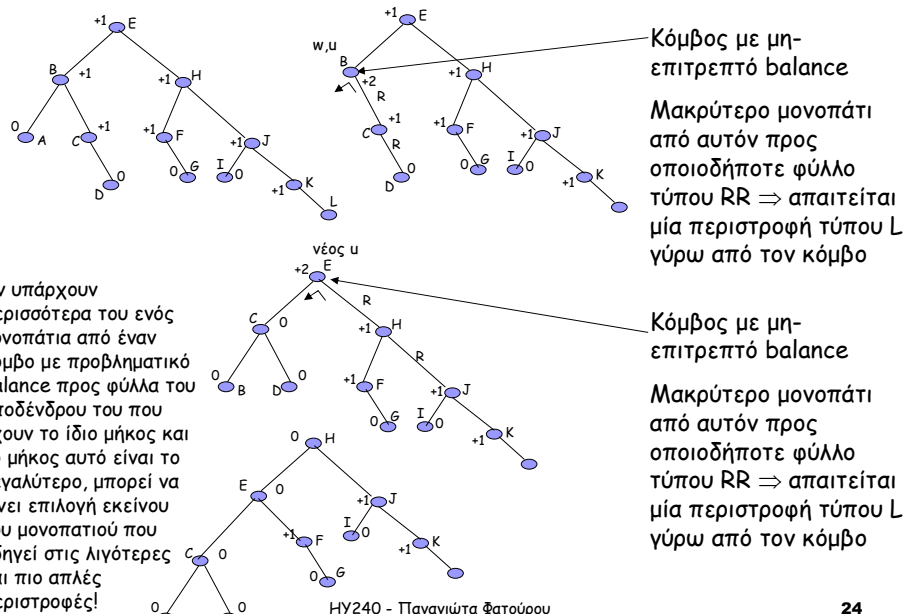
Δένδρα AVL - Διαγραφή



HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

23

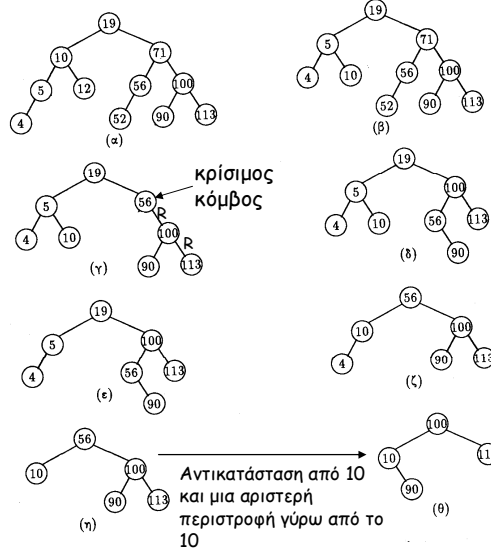
Παράδειγμα Διαγραφής που Οδηγεί σε Πολλαπλές Περιστροφές



HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

24

Δένδρα AVL - Διαγραφή



Παράδειγμα

Διαδοχική διαγραφή των κλειδιών 12, 71, 52, 10, 19, 4, και 56.

Τι είναι η πολυπλοκότητα της AVLDelete()? Ο ύψος δένδρου για τους ακόλουθους λόγους:

- Για τη διαγραφή του κόμβου το κόστος είναι $O(\text{ύψος δένδρου})$ (αφού το δένδρο είναι ταξινομημένο).
- Για κάθε κόμβο u στο P1, θα γίνει εύρεση των δύο πρώτων ακμών του μονοπατιού που καθορίζει το ύψος του u (αυτό γίνεται βάσει του balance του u και του balance του επομένου του u στο μονοπάτι αυτό).
- Θα γίνουν $O(\text{ύψος δένδρου})$ περιστροφές και κάθε μια κοστίζει $O(1)$.
- Τα balances αλλάζουν μόνο για τους κόμβους του P1 και τους κόμβους που «εμπλέκονται» στις περιστροφές.

Θεώρημα $\Rightarrow$

ύψος δένδρου AVL = $O(\log n) \Rightarrow$
Χρονική Πολυπλοκότητα = $O(\log n)$

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

25

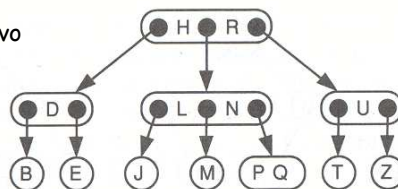
2-3 Δένδρα

Ιδέα: Το δένδρο είναι τέλεια εξισορροπημένο (όλα τα φύλλα έχουν το ίδιο βάθος) αλλά δεν είναι δυαδικό.

- Σε ένα **2-3 δένδρο** ένας κόμβος που δεν είναι φύλλο έχει δύο παιδιά και σε αυτόν αποθηκεύεται ένα στοιχείο του συνόλου (ένας τέτοιος κόμβος λέγεται 2-κόμβος), ή έχει τρία παιδιά και σε αυτόν αποθηκεύονται δύο στοιχεία του συνόλου (τότε ο κόμβος λέγεται 3-κόμβος).
- Κάθε φύλλο που αποθηκεύει ένα στοιχείο του συνόλου είναι 2-κόμβος, ενώ κάθε φύλλο που αποθηκεύει δύο στοιχεία του συνόλου είναι 3-κόμβος.
- Με κατάλληλη διευθέτηση κόμβων και των δύο ειδών, μπορούμε να φτιάξουμε δένδρο στο οποίο όλα τα φύλλα έχουν το ίδιο βάθος και το οποίο αποθηκεύει οποιοδήποτε επιθυμητό πλήθος κλειδιών.

Ιδιότητες 2-3 Δένδρων

1. Όλα τα φύλλα έχουν το ίδιο βάθος και αποθηκεύουν 1 ή 2 στοιχεία.
2. Κάθε εσωτερικός κόμβος:
 - είτε αποθηκεύει ένα στοιχείο και έχει δύο παιδιά,
 - ή αποθηκεύει δύο στοιχεία και έχει τρία παιδιά.
3. Το δένδρο είναι ταξινομημένο.



HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

26

2-3 Δένδρα

Ένα 2-3 δένδρο είναι **ταξινομημένο** αν για κάθε κόμβο v ισχύουν τα εξής:

- Αν ο v είναι 2-κόμβος, τα κλειδιά όλων των στοιχείων που βρίσκονται στο αριστερό υποδένδρο του v είναι μικρότερα από το κλειδί του v , ενώ εκείνα των στοιχείων που βρίσκονται στο δεξί υποδένδρο του v είναι μεγαλύτερα από εκείνα του v .
- Αν ο v είναι 3-κόμβος, το κλειδί (έστω K_1) του πρώτου στοιχείου του v είναι μικρότερο από το κλειδί (έστω K_2) του δεύτερου στοιχείου του v . Επίσης, τα κλειδιά όλων των στοιχείων στο πρώτο υποδένδρο του v είναι μικρότερα από K_1 , τα κλειδιά όλων των στοιχείων στο δεύτερο υποδένδρο του v είναι μεταξύ του K_1 και του K_2 , ενώ τα κλειδιά του τρίτου υποδένδρου του v είναι μεγαλύτερα από K_2 .

Μεταξύ όλων των 2-3 δένδρων ύψους h , ποιο είναι εκείνο με τους λιγότερους κόμβους; Εκείνο του οποίου όλοι οι εσωτερικοί κόμβοι είναι 2-κόμβοι.

Ποιο είναι το ύψος αυτού του δένδρου? $\log_2 n$

Μεταξύ όλων των 2-3 δένδρων ύψους h , ποιο είναι εκείνο με τους περισσότερους κόμβους; Εκείνο του οποίου όλοι οι εσωτερικοί κόμβοι είναι 3-κόμβοι.

Ποιο είναι το ύψος αυτού του δένδρου? $\log_3 n$

Το ύψος ενός 2-3 δένδρου με n κόμβους είναι $\Theta(\log n)$.

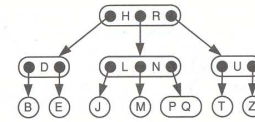
Πώς θα υλοποιήσουμε την `LookUp()` σε ένα 2-3 δένδρο? Το δένδρο είναι ταξινομημένο.

Πολυπλοκότητα

`LookUp`;

$O(\log n)$

27

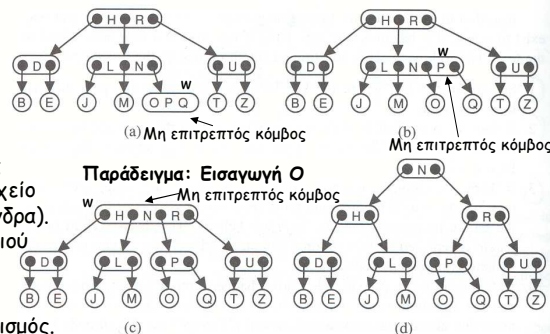


2-3 Δένδρα Εισαγωγή

- Εύρεση του φύλλου w στο οποίο θα έπρεπε σύμφωνα με την ιδιότητα της ταξινόμησης να εισαχθεί το νέο στοιχείο (όπως στα ταξινομημένα δυαδικά δένδρα).
- Διατήρηση των κόμβων του μονοπατιού που ακολουθήθηκε σε στοίβα.
- Αν το w είναι 2-κόμβος, προσθήκη του νέου στοιχείου στο w και τερματισμός.
- Αν το w είναι 3-κόμβος, μετατρέπεται σε κόμβο που πρέπει να αποθηκεύσει 3 στοιχεία (σε αύξουσα διάταξη) το οποίο είναι μη επιτρεπτό. Τότε, αντικαθιστούμε το w με δύο 2-κόμβους, έναν που αποθηκεύει το πρώτο και έναν που αποθηκεύει το τρίτο στοιχείο του w και το μεσαίο στοιχείο του w μεταφέρεται στον πατρικό του κόμβο. Αν δεν υπάρχει πατρικός κόμβος πηγαίνουμε στο βήμα 6.
- Αν ο πατρικός κόμβος είναι 2-κόμβος, μετατρέπεται σε 3-κόμβο και ο αλγόριθμος τερματίζει. Διαφορετικά, θέτουμε $w = \langle \text{πατρικός κόμβος του } w \rangle$ και επιστρέφουμε στο βήμα 3 για να αντικαταστήσουμε τον πατρικό κόμβο του w με τον ίδιο τρόπο.
- Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να βρούμε χώρο για το κλειδί σε κάποιο κόμβο στο μονοπάτι προς τη ρίζα ή να φτάσουμε στη ρίζα. Αν συμβεί το δεύτερο, η ρίζα χωρίζεται σε 2 κόμβους και ένας νέος κόμβος που αποτελεί τον πατρικό κόμβο αυτών των δύο κόμβων αποθηκεύει το μεσαίο στοιχείο που θα έπρεπε να αποθηκευθεί στη ρίζα. Έτσι, το ύψος του δένδρου αυξάνεται κατά 1.

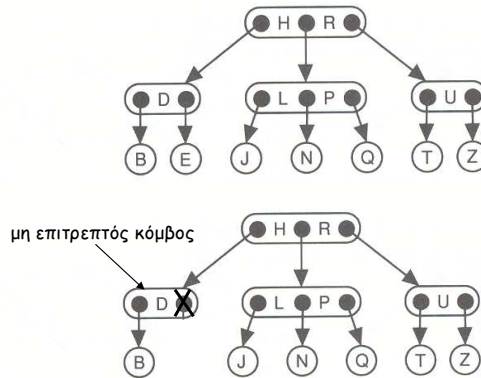
HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

28



2-3 Δένδρα - Διαγραφή

Μπορεί να προκύψει το αντίστροφο πρόβλημα: μετά τη διαγραφή, κάποιος κόμβος μπορεί να έχει ένα μόνο παιδί.



Παράδειγμα
Διαγραφή Ε

29

2-3 Δένδρα - Διαγραφή

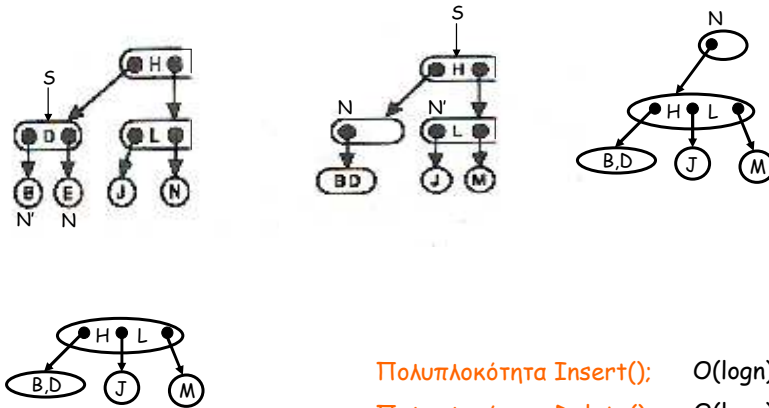
1. Αν το προς διαγραφή κλειδί (έστω K) περιέχεται σε κόμβο φύλλο, το διαγράφουμε. Διαφορετικά, το κλειδί (έστω K') που είναι επόμενο του K στην ενδο-διατεταγμένη διάσχιση περιέχεται σε φύλλο, οπότε αντικαθιστούμε το K με το K' και διαγράφουμε το K' .
2. Έστω N ο κόμβος από τον οποίο διαγράφεται το κλειδί. Αν ο N εξακολουθεί να έχει ένα κλειδί, ο αλγόριθμος τερματίζει.
3. Αν ο N είναι η ρίζα, τον διαγράφουμε. Σε αυτή την περίπτωση, ο N μπορεί να έχει ένα ή κανένα παιδί. Αν δεν έχει κανένα παιδί, το δένδρο μετά τη διαγραφή είναι άδαιο. Διαφορετικά, το παιδί του N είναι η νέα ρίζα του δένδρου.
4. Διαφορετικά, ο N έχει τουλάχιστον έναν αδελφικό κόμβο. Έστω N' ένας οποιοσδήποτε αδελφικός κόμβος του N . Έστω P ο πατέρας των N , N' και έστω ότι S είναι το κλειδί του P που χωρίζει τα δύο υπο-δένδρα (που οδηγούν από τον P στους N και N').
 - a. Ο N' είναι 3-κόμβος ακριβώς στα αριστερά (ακριβώς στα δεξιά) του N . Μετακινούμε το S στο N και αντικαθιστούμε το S στον πατέρα του με το δεξιότερο (αριστερότερο) κλειδί του N' . Αν οι N και N' είναι εσωτερικοί κόμβοι, μετατρέπουμε το δεξιότερο (αριστερότερο) υποδένδρο του N' σε αριστερότερο (δεξιότερο) υποδένδρο του N . Οι N , N' έχουν πλέον ένα κλειδί ο καθένας και ο αλγόριθμος τερματίζει.
 - b. Ο N' είναι 2-κόμβος. Συνενώνουμε το S και το κλειδί του N' σε έναν νέο 3-κόμβο, ο οποίος αντικαθιστά τους N , N' και αποτελεί το μοναδικό παιδί του P (ο οποίος απομένει τώρα χωρίς κλειδί). Θέτουμε $N = P$ και επαναλαμβάνουμε από το βήμα 3.

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

30

2-3 Δένδρα - Διαγραφή

Ένα ακόμη παράδειγμα



Πομπλοκότητα Insert(): $O(\log n)$

Πομπλοκότητα Delete(): $O(\log n)$

Πομπλοκότητα LookUp(): $O(\log n)$

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

31

Κοκκινόμαυρα Δένδρα

- Ένα **κοκκινόμαυρο δένδρο** είναι ένα ταξινομημένο δυαδικό δένδρο, στο οποίο, κάθε κόμβος περιέχει ένα επιπλέον στοιχείο πληροφορίας, το χρώμα του, το οποίο μπορεί να είναι είτε μαύρο ή κόκκινο.
- Αν κάποιο παιδί κάποιου κόμβου δεν υφίσταται, ο αντίστοιχος δείκτης είναι null. Θεωρούμε ότι δείκτες με τιμή null είναι δείκτες προς **εξωτερικούς** κόμβους (φύλλα) του δυαδικού δένδρου, ενώ οι συνήθεις κόμβοι που αποθηκεύουν κλειδιά αποτελούν τους **εσωτερικούς** κόμβους του δένδρου.

Ιδιότητες Κοκκινόμαυρων Δένδρων

1. Κάθε κόμβος έχει είτε κόκκινο είτε μαύρο χρώμα.
2. Το χρώμα της ρίζας είναι πάντα μαύρο.
3. Κάθε NULL κόμβος έχει μαύρο χρώμα.
4. Αν ένας κόμβος έχει κόκκινο χρώμα, τότε και τα δύο παιδιά του έχουν μαύρο χρώμα.
5. Κάθε μονοπάτι από οποιονδήποτε κόμβο προς οποιοδήποτε εξωτερικό κόμβο φύλλο που είναι απόγονός του περιέχει το ίδιο πλήθος μαύρων κόμβων.

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

32

Ύψος Κοκκινόμαυρου Δένδρου

Πρόταση: Ένα κόκκινο μαύρο δένδρο με n εσωτερικούς κόμβους έχει ύψος το πολύ $2\log(n+1)$.

Διαίσθηση: Τουλάχιστον

οι μισοί κόμβοι σε κάθε μονοπάτι από τη ρίζα σε φύλλο είναι μαύροι. **Γιατί;**

Απόδειξη

- Ορίζουμε το μαύρο ύψος ενός κόμβου v , το οποίο συμβολίζουμε με $bh(v)$, να είναι το πλήθος των μαύρων κόμβων σε κάθε μονοπάτι από τον κόμβο v σε οποιοδήποτε φύλλο (εξωτερικό κόμβο $null$), χωρίς να συμπεριλαμβάνουμε τον v .
- Αποδεικνύουμε επαγωγικά ότι το υπο-δένδρο με ρίζα κάποιο κόμβο v περιέχει τουλάχιστον $2^{bh(v)} - 1$ εσωτερικούς κόμβους (η επαγωγή ως προς το ύψος του v).

Βάση επαγωγής: αν ο v έχει ύψος 0 τότε είναι φύλλο (δηλαδή εξωτερικός κόμβος), οπότε ο αριθμός των εσωτερικών κόμβων στο υποδένδρο που εκφύεται από τον v είναι 0, όπως απαιτείται.

Επαγωγική Υπόθεση: Δοθέντος ενός οποιουδήποτε κόμβου v , υποθέτουμε ότι ο ισχυρισμός ισχύει για τα παιδιά του v .

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

33

Ύψος Κοκκινόμαυρου Δένδρου

Απόδειξη (συνέχεια)

Επαγωγικό Βήμα: Αποδεικνύουμε τον ισχυρισμό για τον κόμβο v .

- Έστω w ένα οποιοδήποτε παιδί του v . Τότε, $bh(w) \geq bh(v) - 1$ (αν ο w είναι κόκκινος τότε $bh(w) = bh(v)$, ενώ αν ο w είναι μαύρος τότε $bh(w) \geq bh(v) - 1$).
- Αφού το ύψος του w είναι πιο μικρό από εκείνο του v , από επαγωγική υπόθεση, το υποδένδρο που εκφύεται από τον w έχει $2^{bh(w)} - 1 \geq 2^{bh(v)-1} - 1$ εσωτερικούς κόμβους.
- Άρα, το υποδένδρο που εκφύεται από τον v έχει τουλάχιστον $2 * (2^{bh(v)-1} - 1) + 1 = 2^{bh(v)} - 1$ εσωτερικούς κόμβους, όπως απαιτείται.

Άρα, το υπο-δένδρο που εκφύεται από οποιονδήποτε κόμβο v περιέχει τουλάχιστον $2^{bh(v)} - 1$ εσωτερικούς κόμβους. (1)

Έστω h το ύψος του δένδρου και r η ρίζα. Είναι $bh(r) \geq h/2$, αφού βάσει της ιδιότητας 4, σε οποιοδήποτε μονοπάτι από τη ρίζα προς οποιονδήποτε εξωτερικό κόμβο, τουλάχιστον οι μισοί κόμβοι (εξαιρουμένης της ίδιας της ρίζας) θα πρέπει να είναι μαύροι.

Άρα, από (1), $n \geq 2^{h/2} - 1 \Rightarrow h \leq 2\log(n+1)$.

Πως υλοποιείται η `LookUp()`;
Τποια είναι η πολυπλοκότητα της;

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

34

Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Εισαγωγή

Αλγόριθμος

- Εισαγωγή του νέου στοιχείου με τον ίδιο τρόπο όπως σε ταξινομημένο δυαδικό δένδρο. Το μονοπάτι που ακολουθείται για την εισαγωγή του νέου κόμβου αποθηκεύεται σε στοίβα.
- Ο νέος κόμβος χαρακτηρίζεται κόκκινος.
- Αν οι ιδιότητες χρωματισμού εξακολουθούν να ισχύουν, ο αλγόριθμος τερματίζεται. Διαφορετικά, εκτελούνται ενέργειες που αποσκοπούν στην αποκατάσταση των ιδιοτήτων του δένδρου (οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια).

Για να απαιτείται η εκτέλεση ενεργειών αποκατάστασης του δένδρου θα πρέπει:

Ο πατρικός κόμβος του νέο-εισαχθέντα κόμβου να είναι κόκκινος. Γιατί;

⇒ Ο πατρικός αυτός κόμβος δεν μπορεί να είναι η ρίζα.

Ο παππούς του νέο-εισαχθέντα κόμβου να είναι μαύρος. Γιατί;

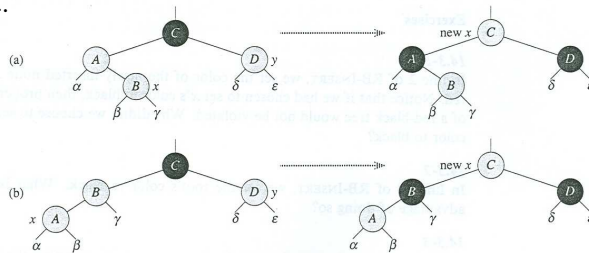
Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Εισαγωγή

Περιγραφή Ενεργειών Αποκατάστασης

1. Υποθέτουμε ότι ο πατέρας του x είναι αριστερό παιδί του παππού του x (η περίπτωση που ο πατέρας του x είναι δεξιό παιδί του παππού του x είναι συμμετρική). Αν ο x και ο πατέρας του x είναι και οι δύο κόκκινοι κόμβοι, απαιτούνται ενέργειες αποκατάστασης των ιδιοτήτων του δένδρου.

Διακρίνουμε περιπτώσεις:

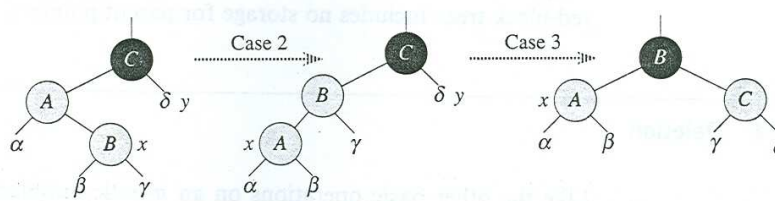
2. **Περίπτωση 1:** Ο αδελφικός κόμβος y του πατέρα του x είναι κόκκινος. Τότε, αλλάζουμε το χρώμα του πατέρα του x και του αδελφικού του κόμβου y σε μαύρο και το χρώμα του παππού του x σε κόκκινο. Εκτελούμε την εντολή " x = παππούς του x ". Επαναλαμβάνουμε ξεκινώντας από το Βήμα 1.



Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Εισαγωγή

Περιγραφή Ενεργειών Αποκατάστασης (συνέχεια)

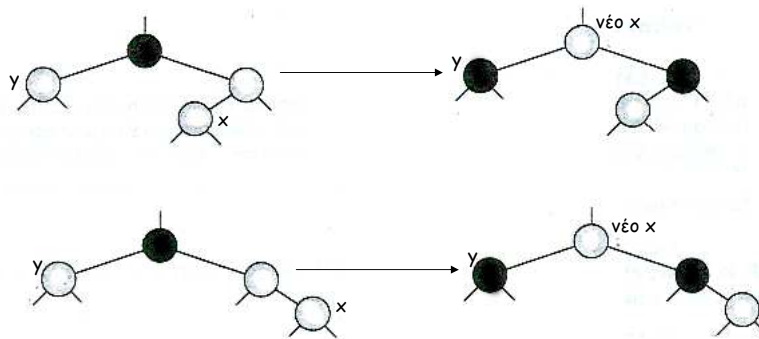
3. **Περίπτωση 2:** Ο γ (αδελφικός κόμβος του πατέρα του x) είναι μαύρος και ο x είναι δεξί παιδί του πατέρα του. Ανάγουμε την περίπτωση αυτή στην περίπτωση 3 με την εκτέλεση μιας αριστερής περιστροφής γύρω από τον πατέρα του x . (Η περίπτωση που ο x είναι αριστερό παιδί του πατέρα του είναι συμμετρική).
4. **Περίπτωση 3:** Ο x είναι αριστερό παιδί του πατέρα του. Το χρώμα του πατέρα του x αλλάζει σε μαύρο και του παππού σε κόκκινο. Εκτελείται μια δεξιά περιστροφή γύρω από τον παππού του x .



HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

37

Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Εισαγωγή - Κάποιες από τις Συμμετρικές Περιπτώσεις

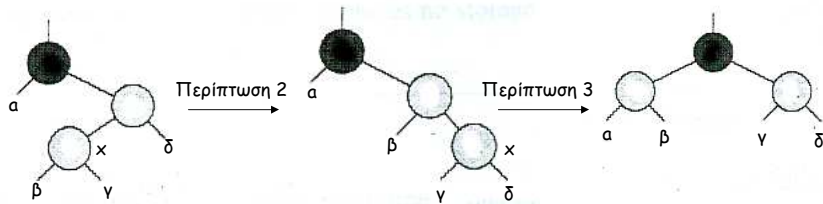


Περίπτωση 1: Ο αδελφικός κόμβος γ του πατρικού κόμβου του x είναι κόκκινος. (Συμμετρική περίπτωση που ο πατρικός κόμβος του x είναι δεξιό παιδί του παππού του x .)

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

38

Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Εισαγωγή - Κάποιες από τις Συμμετρικές Περιπτώσεις



Περίπτωση 2: Ο γ (αδελφικός κόμβος του πατέρα του x) είναι μαύρος και ο x είναι αριστερό παιδί του πατέρα του. Ανάγουμε την περίπτωση αυτή στην περίπτωση 3 με την εκτέλεση μιας δεξιιάς περιστροφής.

Περίπτωση 3: Ο x είναι δεξιό παιδί του πατέρα του. Το χρώμα του πατέρα του x αλλάζει σε μαύρο και του παππού σε κόκκινο. Εκτελείται μια αριστερή περιστροφή.

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

39

Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Εισαγωγή - Ψευδοκώδικας

```

RedBlackTree-Insert(pointer R, Key k) {
/* O R είναι δείκτης στη ρίζα του δένδρου και το K είναι το
   προς-εισαγωγή κλειδί. Θεωρώ ότι το δένδρο είναι διπλά συνδεδεμένο */

    γ = null; z = R;
    while (z != null) { // έχω αγνοήσει τους ελέγχους για το αν το κλειδί K βρίσκεται ήδη στο δένδρο
        γ = z; // οι οποίοι χρειάζονται
        if (K < z->Key) z = z->LC;
        else z = z->RC;
    }
    x = newcell(); x->Key = K; x->LC = x->RC = null; x->color = RED;
    x->p = γ;
    if (γ == null) (κάνε το x ρίζα του δένδρου);
    else if (x->key < γ->key) γ->lc = x; // τοποθέτηση του x ως
    else γ->rc = x; // κατάλληλου παιδιού του γ
    ColorPropertiesInsert(R,x)
}
    
```

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

40

Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Εισαγωγή

```

ColorPropertiesInsert(pointer R, pointer x) {
    while (x->p->color == RED) { //αν το χρώμα του πατέρα του x είναι επίσης κόκκινο
        if (x->p == x->p->p->LC) { // αν ο πατέρας του x είναι αριστερό παιδί του παππού του x
            y = x->p->p->RC; // ο y είναι ο αδελφικός κόμβος του πατέρα του x
            if (y->color == RED) {
                x->p->color = BLACK; // πατέρας και αδελφικός κόμβος πατέρα
                y->color = BLACK; // γίνονται και οι δυο μαύροι
                x->p->p->color = RED; // ο παππούς γίνεται κόκκινος
                x = x->p->p; // (νέο x = παππούς x); και επαναλαμβάνουμε
            }
        }
        else {
            if (x == x->p->RC) { // ο x είναι δεξιό παιδί του πατέρα του ⇒ Περίπτωση 2
                x = x->p; // ο πατέρας του x θα παίξει το ρόλο του x (δείτε σχήματα)
                LeftRotate(R, x); // αριστερή περιστροφή γύρω από τον πατέρα του x
            }
            x->p->color = BLACK;
            x->p->p->color = RED;
            RightRotate(R, x->p->p);
        }
    }
    else (1) με εναλλαγή του LC με RC
    και το αντίστροφο, καθώς και του LeftRotate με RightRotate
    και το αντίστροφο);
}

```

(1) με εναλλαγή του LC με RC και το αντίστροφο, καθώς και του LeftRotate με RightRotate και το αντίστροφο);

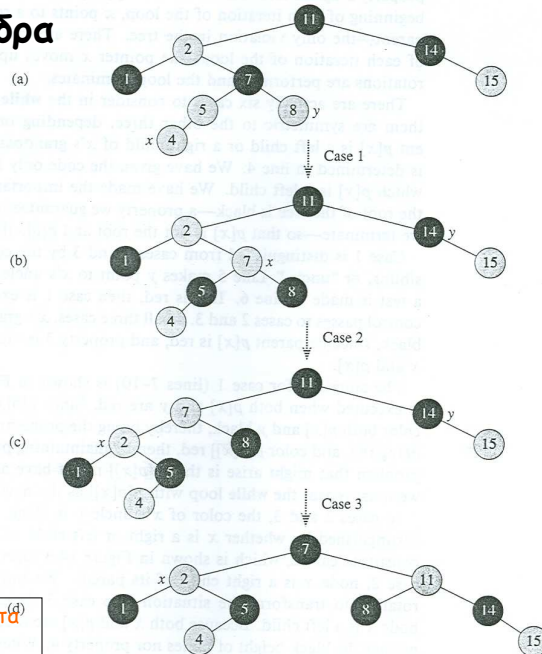
HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

41

Κοκκινόμαυρα Δένδρα Εισαγωγή Παράδειγμα

- (a) Κόμβος x αμέσως μετά την εισαγωγή του. Ο πατέρας του x και ο αδελφικός κόμβος y του πατέρα του x είναι κόκκινοι ⇒ Περίπτωση 1
(b) Το ρόλο του x θα παίξει τώρα ο κόμβος με κλειδί 7. Ο πατέρας του x είναι κόκκινος και ο αδελφικός κόμβος y του πατέρα του x είναι μαύρος. Αφού ο x είναι δεξιό παιδί του πατέρα του ενώ ο πατέρας του x αριστερό παιδί του δικού του πατέρα ⇒ Περίπτωση 2
(c) Περίπτωση 3,
(d) Τελικό δένδρο

Ποια είναι η χρονική πολυπλοκότητα της RBInsert();



Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Διαγραφή

- ❑ Η διαγραφή γίνεται με παρόμοιο τρόπο όπως σε ταξινομημένο δυαδικό δένδρο και στη συνέχεια ελέγχεται αν οι ιδιότητες των κοκκινόμαυρων δένδρων ισχύουν ή όχι και γίνονται κατάλληλες ενέργειες.
- ❑ Έστω γ ο κόμβος που θα διαγραφεί από το δένδρο.
- ❑ Αν το χρώμα του γ είναι κόκκινο, ο γ διαγράφεται και ο αλγόριθμος τερματίζει.
- ❑ **Γιατί δεν προκύπτει πρόβλημα με τις ιδιότητες χρωματισμού του δένδρου σε αυτή την περίπτωση?**
 - Δεν υπάρχουν κόμβοι των οποίων το μαύρο ύψος να έχει μεταβληθεί στο δένδρο
 - Δεν έχει πραγματοποιηθεί καμία απευθείας σύνδεση μεταξύ δύο κόκκινων κόμβων
 - Δεδομένου ότι, αν ο γ ήταν κόκκινος, δεν μπορεί να είναι ο ριζικός κόμβος, ο ριζικός κόμβος παραμένει μαύρος.
- ❑ Αν το χρώμα του γ είναι μαύρο, η διαγραφή του μπορεί να δημιουργήσει τα εξής προβλήματα:
 - Αν ο γ ήταν ο ριζικός κόμβος και τεθεί ως νέος ριζικός κάποιος κόκκινος κόμβος, έχει παραβιαστεί η ιδιότητα 2.
 - Αν ο μοναδικός θυγατρικός κόμβος x του γ και ο πατρικός κόμβος p του γ ήταν και οι δύο κόκκινοι, έχει παραβιαστεί η ιδιότητα 4.
 - Λόγω της διαγραφής του γ , όλα τα μονοπάτια που περιείχαν τον γ (πριν τη διαγραφή) έχουν ένα μαύρο κόμβο λιγότερο (μετά τη διαγραφή) $\Rightarrow$ μετά τη διαγραφή, όλοι οι πρόγονοι του γ στο δένδρο παραβιάζουν την ιδιότητα 5.

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

43

Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Διαγραφή

- ❑ Υποθέτουμε ότι η μαύρη ιδιότητα του γ μεταφέρεται στο παιδί του (έστω x), το οποίο αν είναι μαύρο γίνεται διπλά μαύρο (που είναι μη επιτρεπτό). Φανταζόμαστε πως κάθε κόμβος έχει ένα και μοναδικό κουπόνι που καθορίζει το χρώμα του (μαύρο ή κόκκινο). Τότε, ένας διπλά-μαύρος κόμβος είναι σαν να έχει δύο κουπόνια με μαύρο χρώμα. Αυτό είναι μη επιτρεπτό και ο κόμβος πρέπει να απαλλαγεί από το επιπρόσθετο μαύρο κουπόνι.
- ❑ Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, το επιπρόσθετο μαύρο κουπόνι μεταφέρεται προς τα πάνω (ακολουθώντας το μονοπάτι από τον κόμβο προς τη ρίζα) μέχρι είτε:
 - ◊ να φθάσουμε στη ρίζα, ή
 - ◊ να βρούμε έναν κόκκινο κόμβο που τον επαναχρωματίζουμε μαύρο και ο αλγόριθμος τερματίζει, ή
 - ◊ να μπορούν να εκτελεστούν κατάλληλες περιστροφές και επαναχρωματισμοί κάποιων κόμβων ώστε να επιλυθεί το πρόβλημα.

Παρατήρηση

Το πεδίο color του x εξακολουθεί να είναι είτε κόκκινο ή μαύρο (ανεξάρτητα του επιπρόσθετου μαύρου κουπονιού). Το πρόσθετο κουπόνι ενός κόμβου επισυνάπτεται στον δείκτη προς τον κόμβο αυτό και όχι στο πεδίο χρώμα του κόμβου (αυτή η υπόθεση απαιτείται για να λειτουργεί σωστά ο ψευδοκώδικας που θα παρουσιαστεί σε επόμενες διαφάνειες).

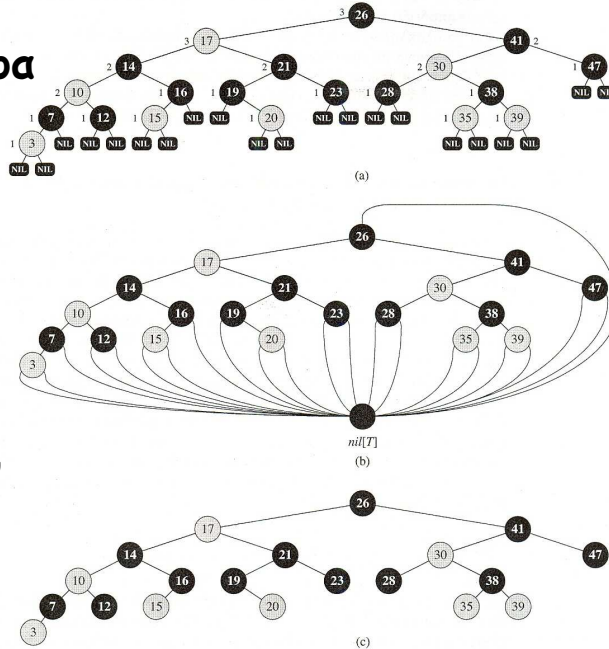
HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

44

Κοκκινόμαυρα Δένδρα Διαγραφή

Θεωρώ ότι το δένδρο υλοποιείται με κόμβο φρουρό. Έτσι, όλοι οι nil δείκτες δείχνουν στον κόμβο φρουρό.

(Αυτό εξυπηρετεί στη μείωση των ελέγχων που απαιτούνται στον κώδικα που θα παρουσιαστεί σε επόμενες διαφάνειες).



HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

45

Κοκκινόμαυρα Δένδρα- Διαγραφή

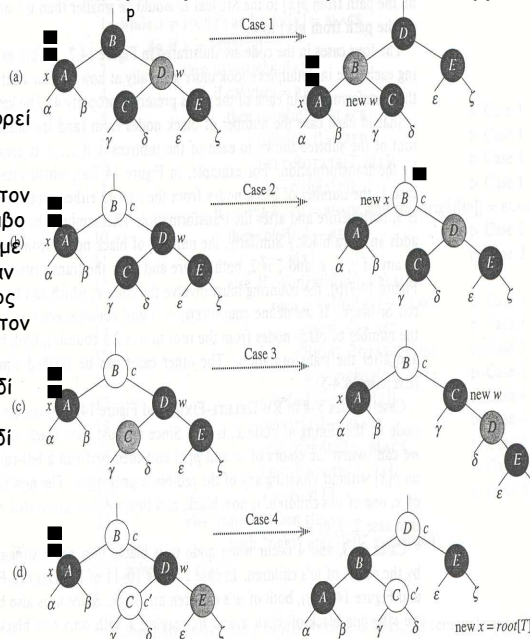
Έστω x το παιδί του κόμβου που διαγράφεται. Έστω w ο αδελφικός κόμβος και p ο πατέρας του x .

Αν ο x είναι διπλά μαύρος, ο w δεν μπορεί να είναι ο κόμβος φρουρός. **Γιατί;**

Αν συνέβαινε αυτό, το πλήθος των μαύρων κόμβων στο μονοπάτι από τον πατρικό κόμβο του x μέχρι τον κόμβο w (που είναι μαύρος αφού υποθέσαμε ότι είναι ο κόμβος φρουρός) θα ήταν μικρότερο από το αντίστοιχο πλήθος μαύρων κόμβων στο μονοπάτι από τον πατρικό κόμβο του x μέχρι τον x .

Υποθέτουμε ότι ο x είναι αριστερό παιδί του πατρικού του κόμβου. (Η περίπτωση που ο x είναι δεξιό παιδί του πατρικού του κόμβου είναι συμμετρική.)

Οι τέσσερις περιπτώσεις, στις οποίες πραγματοποιούνται κατάλληλες ενέργειες επαναχρωματισμού των κόμβων και περιστροφές παρουσιάζονται στο Σχήμα.



Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Διαγραφ

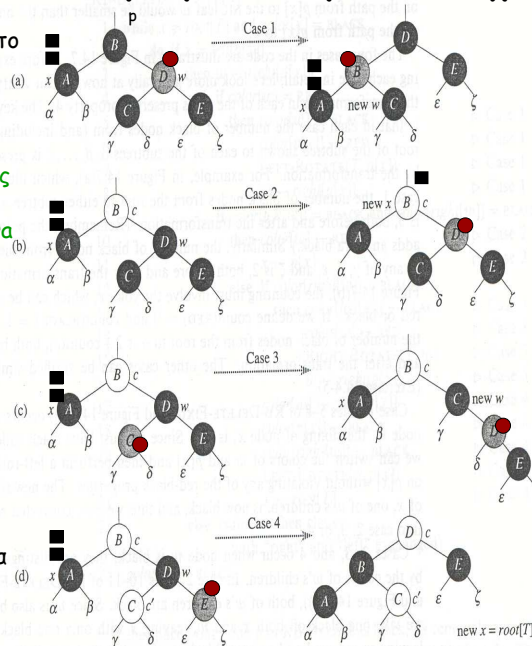
Διακρίνουμε περιπτώσεις ως προς το χρώμα του w .

Βασική Ιδέα

Σε όλες τις περιπτώσεις, ο μετασχηματισμός διατηρεί το πλήθος των μαύρων κόμβων (συμπεριλαμβανομένου και του extra μαύρου κουπονιού του x) από τον ριζικό κόμβο του εικονιζόμενου υποδένδρου (συμπεριλαμβανομένου του ριζικού) μέχρι καθένα από τα υποδένδρα $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ και ζ .

1. Περίπτωση 1: Ο w είναι κόκκινος.

Αλλάζουμε το χρώμα του w σε μαύρο και του p σε κόκκινο και εκτελούμε μια αριστερή περιστροφή γύρω από τον πατέρα του x . Έτσι, μεταπίπτουμε στην περίπτωση 2, 3, ή 4.



Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Διαγραφ

2. Ο w είναι μαύρος κόμβος.

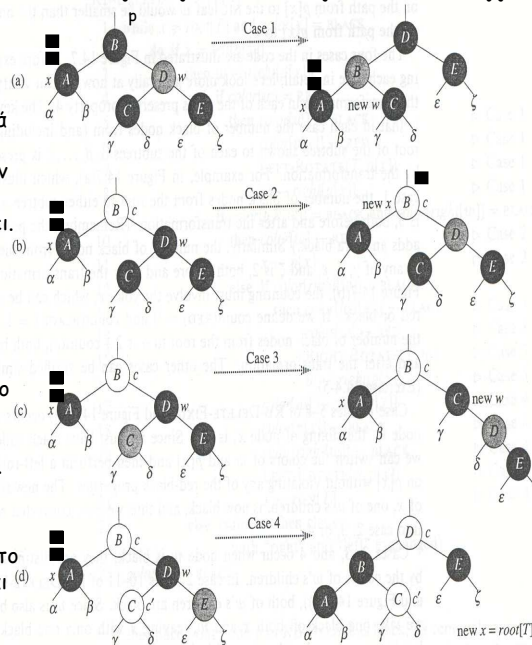
α. Περίπτωση 2: Και τα δύο παιδιά του w είναι μαύρα.

Αλλάζουμε το χρώμα του w σε κόκκινο, του x σε μαύρο (από διπλά μαύρο) και μεταφέρουμε το μαύρο που αφαιρέσαμε από τους w, x στον p . Αν ο p ήταν κόκκινος γίνεται μαύρος και ο αλγόριθμος τερματίζει. Διαφορετικά, ο p γίνεται διπλά μαύρος και ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται με $x = p$.

β. Περίπτωση 3: Το $w \rightarrow lc$ είναι κόκκινο και το $w \rightarrow rc$ μαύρο.

Αλλάζω το χρώμα του w σε κόκκινο και του $w \rightarrow lc$ σε μαύρο και εκτελώ μια περιστροφή γύρω από το $w \Rightarrow$ Μεταπίπτουμε στην περίπτωση 2c.

γ. Περίπτωση 4: Το $w \rightarrow rc$ είναι κόκκινο. Αλλάζω το χρώμα του $w \rightarrow rc$ σε μαύρο, του w σε ότι ήταν το χρώμα του p και του p σε μαύρο και εκτελώ μια περιστροφή γύρω από τον p . Ο αλγόριθμος τερματίζει.



Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Διαγραφή - Ψευδοκώδικας

```

RedBlack-Delete(pointer R, pointer z) {
    if (z->RC == NULL OR z->LC == NULL)
        y = z; // αν ο z έχει ένα ή κανένα παιδί, διαγράφεται ο ίδιος ο z
    else y = TreeSuccessor(R,z); // διαφορετικά, διαγράφεται ο επόμενος κόμβος στην ενδ/γμένη διάσχιση
    if (y->LC != NULL) x = y->LC; // ο x δείχνει στο μοναδικό παιδί του γ
    else x = y->RC;
    x->p = y->p;
    if (y->p == NULL) (κάνε το x ρίζα του δένδρου);
    else if (y == y->p->LC) y->p->LC = x; // αν ο γ είναι αριστερό παιδί του πατέρα του
    else y->p->RC = x;
    if (y != z) { // αν ο προς διαγραφή κόμβος είναι ο επόμενος στην ενδ/γμένη διάσχιση
        z->Key = y->key; // αντιγραφή όλων των πεδίων δεδομένων
        (αντιγραφή των υπολοίπων πεδίων δεδομένων του γ στο z);
    }
    if (y->color == BLACK) ColorPropertiesDelete(R,x);
    // αν η διαγραφή αφορούσε κόμβο με χρώμα μαύρο, εκτέλεση κατάλληλων
    // ενεργειών για την επαναφορά των ιδιοτήτων χρωματισμού του δένδρου
    return y;
}

```

HY240 - Παναγιώτα Φατούρου

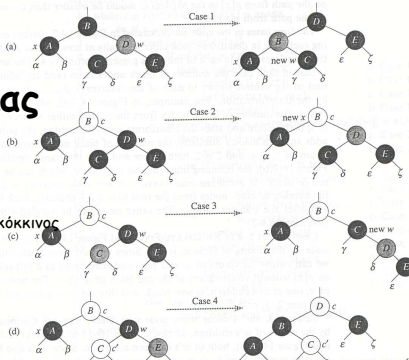
49

Κοκκινόμαυρα Δένδρα - Διαγραφή - Ψευδοκώδικας

```

ColorPropertiesDelete(pointer R, pointer x) {
    while (x != R AND x->color == BLACK) {
        if (x == x->p->LC) { // αν ο x είναι αριστερό παιδί
            w = x->p->RC;
            if (w->color == RED) { // αν αδελφικός του x κόκκινος
                w->color = BLACK; // Περίπτωση 1
                x->p->color = RED; // Περίπτωση 1
                LeftRotation(R, x->p); // Περίπτωση 1
                w = x->p->RC; // Περίπτωση 1
            }
            if (w->LC->color == BLACK AND w->RC->color == BLACK) {
                // αν και τα δύο παιδιά του w είναι μαύρα
                w->color = RED; // Περίπτωση 2
                x = x->p; // Περίπτωση 2
            }
            else {
                if (w->RC->color == BLACK) {
                    // αν δεξιό παιδί του x μαύρο
                    w->LC->color = BLACK; // Περίπτωση 3
                    w->color = RED; // Περίπτωση 3
                    RightRotation(R,w); // Περίπτωση 3
                    w = x->p->RC; // Περίπτωση 3
                }
                w->color = x->p->color; // Περίπτωση 4
                x->p->color = BLACK; // Περίπτωση 4
            }
        }
        else { // αν ο x είναι δεξιό παιδί
            w = x->p->LC;
            if (w->color == RED) { // αν αδελφικός του x κόκκινος
                w->color = BLACK; // Περίπτωση 1
                x->p->color = RED; // Περίπτωση 1
                RightRotation(R, x->p); // Περίπτωση 1
                w = x->p->LC; // Περίπτωση 1
            }
            if (w->LC->color == BLACK AND w->RC->color == BLACK) {
                // αν και τα δύο παιδιά του w είναι μαύρα
                w->color = RED; // Περίπτωση 2
                x = x->p; // Περίπτωση 2
            }
            else {
                if (w->LC->color == BLACK) {
                    // αν αριστερό παιδί του x μαύρο
                    w->RC->color = BLACK; // Περίπτωση 3
                    w->color = RED; // Περίπτωση 3
                    LeftRotation(R,w); // Περίπτωση 3
                    w = x->p->LC; // Περίπτωση 3
                }
                w->color = x->p->color; // Περίπτωση 4
                x->p->color = BLACK; // Περίπτωση 4
            }
        }
        x = x->p;
    }
    x->color = BLACK;
}

```



Τις είναι η χρονική πολυπλοκότητα της RBDelete()

50