

Algoritmusok és adatszerkezetek II.

2-3-4 fák és piros-fekete fák

Szegedi Tudományegyetem



Emlékeztető

Már kitölthető az első Coospace kvíz.

Egyebek

- Hallgatói ösztöndíjlehetőség a mestint tanszéken
- Szorgalmi feladatok
- Értékelés

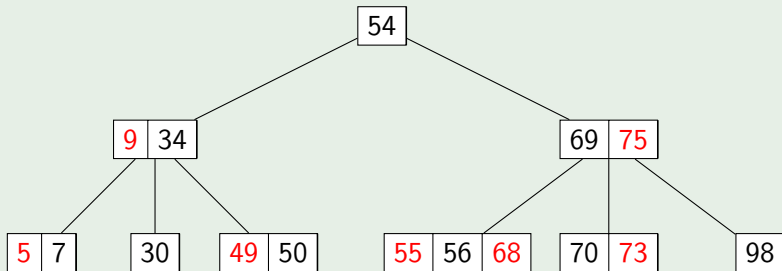


Definíció

2-3-4 fa alatt olyan **általános keresőfát** értünk, amelynek minden x csúcsára $Rang(x) \in \{1, 2, 3\}$

(Mégis miért hívjuk akkor 2-3-4 fának?)

Példa



Piros-fekete fák tulajdonságai

- 1 Minden csúcs színe piros vagy fekete
- 2 A gyökér színe fekete
- 3 Minden levele¹ fekete
- 4 A piros csúcsoknak **kizárólag** fekete színű gyerekeik vannak
- 5 Bármely csúcsból azonos számú fekete csúcs érintésével jutunk el bármelyik levélbe

¹levelek alatt itt most az "őrszemeket" értjük



Piros-fekete fák tulajdonságai

- 1 Minden csúcs színe piros vagy fekete
- 2 A gyökér színe fekete
- 3 Minden levele¹ fekete
- 4 A piros csúcsoknak **kizárólag** fekete színű gyerekeik vannak
- 5 Bármely csúcsból azonos számú fekete csúcs érintésével jutunk el bármelyik levélbe

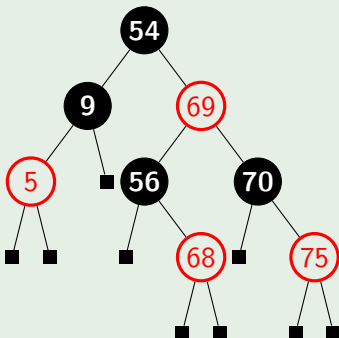
Tétel

Bármely n kulcsú piros-fekete fa magassága legfeljebb $2 \log(n + 1)$.

¹levelek alatt itt most az "őrszemeket" értjük

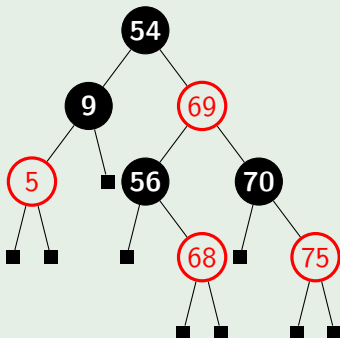
- $bh(x)$ jelölje az x csúcsból induló, bármely levélig vezető úton található, (x -en kívüli) fekete csúcsok számát

Példa



- $bh(x)$ jelölje az x csúcsból induló, bármely levélig vezető úton található, (x -en kívüli) fekete csúcsok számát

Példa



A (teljes) fa fekete-magassága 2
A 9 gyökerű fa fekete-magassága 1
A 69 gyökerű fa fekete-magassága 2



A piros-fekete fák legrosszabb magasságának igazolása

Fontos észrevételek

- 1 x gyökerű fa $h(x)$ magassága $\geq bh(x)$
- 2 x minden y gyerekére $bh(y) = bh(x)$ vagy $bh(y) = bh(x) - 1$
- 3 x minden y gyerekére $h(y) \leq h(x) - 1$



A piros-fekete fák legrosszabb magasságának igazolása

Fontos észrevételek

- 1 x gyökerű fa $h(x)$ magassága $\geq bh(x)$
- 2 x minden y gyerekére $bh(y) = bh(x)$ vagy $bh(y) = bh(x) - 1$
- 3 x minden y gyerekére $h(y) \leq h(x) - 1$

Minden x gyökerű fa legalább $2^{bh(x)} - 1$ csúcsot tartalmaz.

0 magas fára természetesen teljesül.

Az x gyökerű fában legalább annyi csúcs van, mint ahány csúcs a fiaiban legalább van + 1, azaz $2 * (2^{bh(x)-1} - 1) + 1 = 2^{bh(x)} - 1$



A piros-fekete fák legrosszabb magasságának igazolása

Fontos észrevételek

- 1 x gyökerű fa $h(x)$ magassága $\geq bh(x)$
- 2 x minden y gyerekére $bh(y) = bh(x)$ vagy $bh(y) = bh(x) - 1$
- 3 x minden y gyerekére $h(y) \leq h(x) - 1$

Minden x gyökerű fa legalább $2^{bh(x)} - 1$ csúcsot tartalmaz.

0 magas fára természetesen teljesül.

Az x gyökerű fában legalább annyi csúcs van, mint ahány csúcs a fiaiban legalább van + 1, azaz $2 * (2^{bh(x)-1} - 1) + 1 = 2^{bh(x)} - 1$

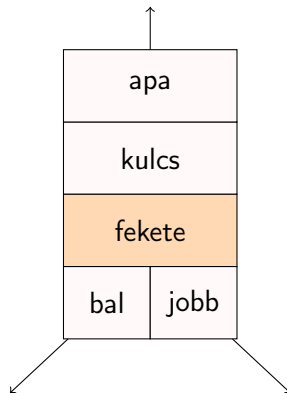
A piros-fekete fák 4. tulajdonságából következően

Bármely x -ből levélig menő úton az érintett csúcsok **legalább** $1/2$ -e fekete $\Rightarrow bh(x) \geq h(x)/2$, vagyis az x gyökerű fában lévő n kulcsok száma $n \geq 2^{h/2} - 1 \Rightarrow h \leq 2 \log(n + 1)$



Piros-fekete fa implementációja

```
class Node {  
    Object kulcs;  
    boolean fekete;  
    Node *apa;  
    Node *bal;  
    Node *jobb;  
}
```

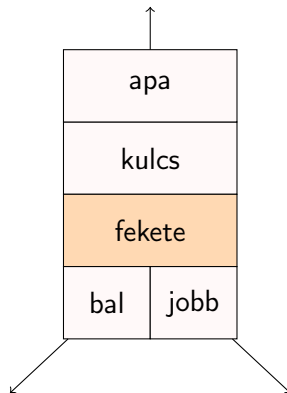


Piros-fekete fa implementációja

```
class Node {  
    Object kulcs;  
    boolean fekete;  
    Node *apa;  
    Node *bal;  
    Node *jobb;  
}
```

Megjegyzés

Csupán 1 bitnyi kiegészítő információ
⇒ akár a kulcsba is integrálható



AVL fa legrosszabb magassága jobb, mint a piros-fekete fáé

$$h < 1.45 * h_{OTP}(n)$$

vs.

$$h \leq 2 * h_{OPT}(n)$$

- $h_{OPT}(n)$ az n kulcsot tartalmazó, teljesen kiegyensúlyozott bináris keresőfa magassága



AVL vs. piros-fekete fa

AVL fa legrosszabb magassága jobb, mint a piros-fekete fáé

$$h < 1.45 * h_{OPT}(n)$$

vs.

$$h \leq 2 * h_{OPT}(n)$$

- $h_{OPT}(n)$ az n kulcsot tartalmazó, teljesen kiegyensúlyozott bináris keresőfa magassága
- Gyakorlati jelentősége minimális: $n = 2^{30} - 1 > 10^9$ -ra azt kapjuk, hogy egy AVL/piros-fekete-fa legfeljebb 44/60 magas
- Ha a Keres művelet végrehajtása dominál, el lehet gondolkozni az AVL-fa használatán



AVL vs. piros-fekete fa

AVL fa legrosszabb magassága jobb, mint a piros-fekete fáé

$$h < 1.45 * h_{OTP}(n)$$

vs.

$$h \leq 2 * h_{OPT}(n)$$

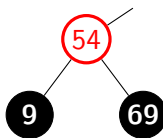
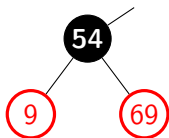
- $h_{OPT}(n)$ az n kulcsot tartalmazó, teljesen kiegyensúlyozott bináris keresőfa magassága
- Gyakorlati jelentősége minimális: $n = 2^{30} - 1 > 10^9$ -ra azt kapjuk, hogy egy AVL/piros-fekete-fa legfeljebb 44/60 magas
- Ha a Keres művelet végrehajtása dominál, el lehet gondolkozni az AVL-fa használatán

- A Beszúr és Töröl műveletek ugyanakkor implementációs szempontból egyszerűbbek/gyorsabbak piros-fekete fákra



A helyreállítás (egyik) záloga – átszínezés

- Ha van egy valid piros-fekete fánk, amelynek egy x csúcsa fekete, fiai viszont pirosak, akkor az 5. tulajdonságot nem sértő fát kapunk akkor is, ha x pirosra, fiai pedig feketére váltanak
- Másképpen, ha piros testvérpár színe feketére vált, a közös szülőnek a továbbiakban nem kell feketének lennie



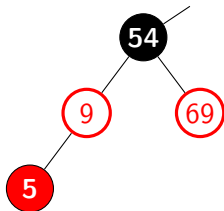
Beszúrás utáni javítás átszínezéssel

- A beszúrandó kulcsot piros színnel szúrjuk be (arra a helyre ahova egyébként egy bináris keresőfába tennénk)
- Mitől romolhat el beszúrás kapcsán a piros-fekete fa?



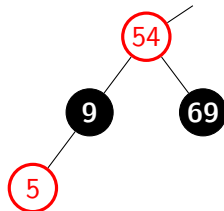
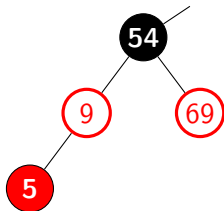
Beszúrás utáni javítás átszínezéssel

- A beszúrando kulcsot piros színnel szúrjuk be (arra a helyre ahova egyébként egy bináris keresőfába tennénk)
- Mitől romolhat el beszúrás kapcsán a piros-fekete fa?
 - Ha piros szülő jut piros gyerekekhez



Beszúrás utáni javítás átszínezéssel

- A beszúrando kulcsot piros színnel szúrjuk be (arra a helyre ahova egyébként egy bináris keresőfába tennénk)
- Mitől romolhat el beszúrás kapcsán a piros-fekete fa?
 - Ha piros szülő jut piros gyerekhez



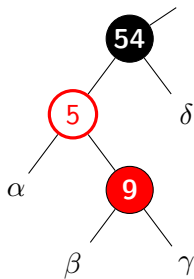
Mi lehet ennek a helyreállításnak a velejárója?

A pirosra színezett csúcs mentén újabb helyreállításra lehet szükség

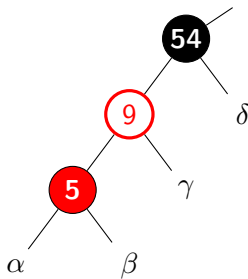


Beszúrás utáni javítás forgatással

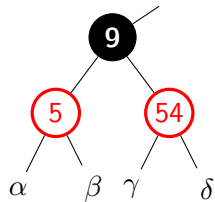
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ egy-egy részfat jelöl
- Az előző helyzettől az különbözteti meg a mostanit, hogy a beszúrt kulcs nagybátyja (a δ részfa gyökere) fekete
- AVL fákhhoz hasonlóan, itt is a "cikk-cakkos" esetben van szükség 2 forgatásra (a cikk-cakkot δ -hoz viszonyítva nézzük)



(a) 2 forgatás kell



(b) 1 forgatás elég

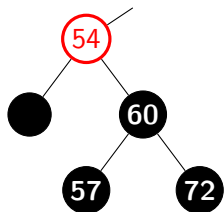


(c) helyreállítás után



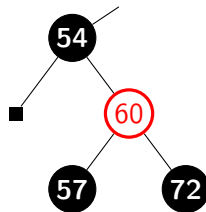
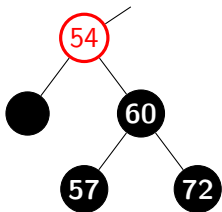
Törlés utáni javítás átszínezéssel

- Bajt az okozhat, ha kiesik egy fekete csúcs
- A kieső csúcs feketeségét át kell ruházni, hiszen két "rétegnyi" feketeségért semelyik csúcs sem lehet felelős
- Ha a duplán fekete csúcs testvére és unokaöccsei is feketék, a szülő át tudja vállalni a feketeséget



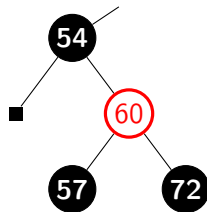
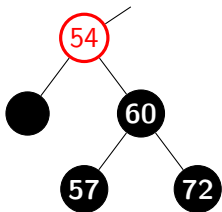
Törlés utáni javítás átszínezéssel

- Bajt az okozhat, ha kiesik egy fekete csúcs
- A kieső csúcs feketeségét át kell ruházni, hiszen két "rétegnyi" feketeségért semelyik csúcs sem lehet felelős
- Ha a duplán fekete csúcs testvére és unokaöccsei is feketék, a szülő át tudja vállalni a feketeséget



Törlés utáni javítás átszínezéssel

- Bajt az okozhat, ha kiesik egy fekete csúcs
- A kieső csúcs feketeségét át kell ruházni, hiszen két "rétegnyi" feketeségért semelyik csúcs sem lehet felelős
- Ha a duplán fekete csúcs testvére és unokaöccsei is feketék, a szülő át tudja vállalni a feketeséget



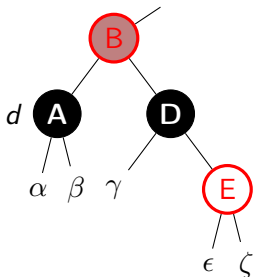
Mi történt volna, ha a duplán fekete csúcs apja nem piros?

Szükség esetén a helyreállítást az apától folytathatjuk tovább.



Törlés utáni javítás forgatással

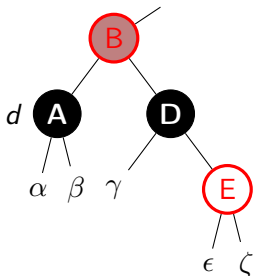
- Piros unokaöcs esetén forgatásra van szükség
- Ha a (d -vel megjelölt) duplán fekete csúcs távolabbi unokaöccse (E) piros, 1 forgatás is elég



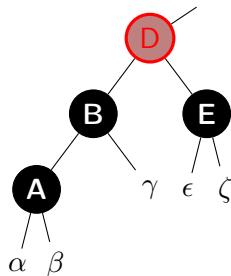
(d) helyreállítás előtt

Törlés utáni javítás forgatással

- Piros unokaöcs esetén forgatásra van szükség
- Ha a (d -vel megjelölt) duplán fekete csúcs távolabbi unokaöccse (E) piros, 1 forgatás is elég
- Valóban, az egyes részfákig a forgatást követően is ugyanannyi fekete csúcs érintésével tudunk eljutni
 - α és β : $2/3$; γ , ϵ és ζ : $1/2$ (B kezdeti színétől függően)



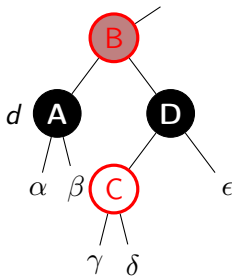
(e) helyreállítás előtt



(f) helyreállítás után

Törlés utáni javítás segédforgatással

- Piros unokaöcs esetén forgatásra van szükség
- Ha a (d -vel megjelölt) duplán fekete csúcs közelebbi unokaöccse piros, segédforgatásra van szükség

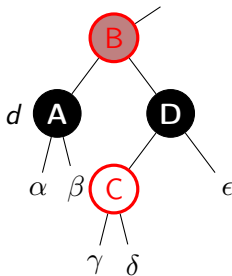


(g) segédforgatás előtt

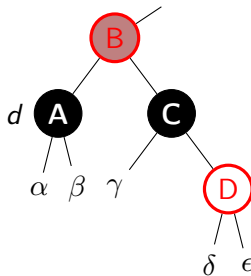


Törlés utáni javítás segédforgatással

- Piros unokaöcs esetén forgatásra van szükség
- Ha a (d -vel megjelölt) duplán fekete csúcs közelebbi unokaöccse piros, segédforgatásra van szükség
- 1 további forgatással garantáltan orvosolható (hiszen a duplán fekete csúcs távolabbi unokaöccse piros lett)



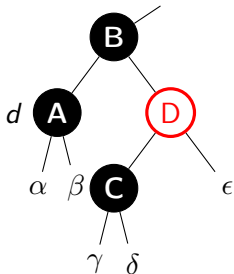
(h) segédforgatás előtt



(i) segédforgatás után

Egy további eshetőség segédforgatásra

- Piros testvér esetén is forgatni kell

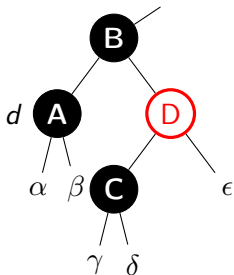


(j) segédforgatás előtt

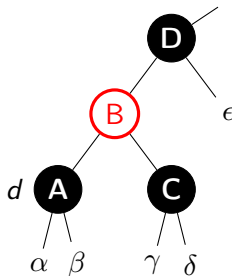


Egy további eshetőség segédforgatásra

- Piros testvér esetén is forgatni kell
- A duplán fekete csúcs megmarad, de a forgatást követően biztosan valamelyik már tárgyalt eset áll elő



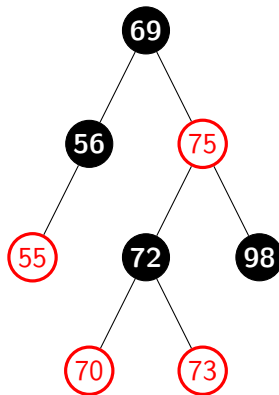
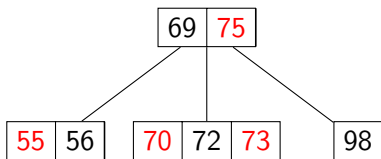
(k) segédforgatás előtt



(l) segédforgatás után



2-3-4 és piros-fekete fák közötti kapcsolat



A fekete csúcsokat piros leszármazottaikkal összeolvasztva 2-3-4 fát kapunk.

- A piros-fekete fák az AVL fákhhoz hasonló tulajdonságúak
- Piros-fekete fákkal tulajdonképp egy speciális hatékony általános keresőfát (2-3-4 fa) valósítunk meg

