

Algoritmusok és adatszerkezetek II.

Kiegyensúlyozott keresőfák

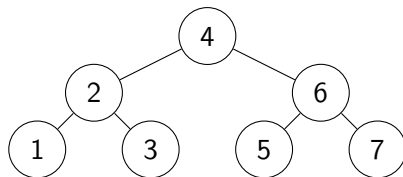
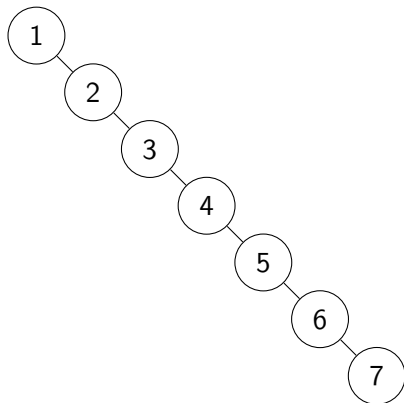
Szegedi Tudományegyetem



Mit értünk kiegyensúlyozott keresőfa alatt?

Emlékeztető

Az eddig tárgyalt műveletek h magas fákra $O(h)$ idejűek voltak
A továbbiakban szeretnénk, ha $h = \Theta(\log n)$ is teljesülne



Véletlen építésű bináris keresőfák

- n elemű bináris fa **legrosszabb esetben** $\Theta(n)$ magas is lehet
- n növekedésével a legrosszabb eset bekövetkezése azonban egyre valószínűtlenebb
- Ha egy bináris keresőfa előállításánál csak beszúrás műveleteket alkalmazunk, úgy igazolható a következő

Tétel

Egy n különböző kulcsot tartalmazó véletlen építésű bináris keresőfa várható magassága $O(\log n)$.



AVL fák (Adelson-Velsky, Landis, 1962)

- **Tetszőleges** műveletsorozat végrehajtása után **legrosszabb esetben is** $\Theta(\log n)$ magasságú kiegyensúlyozott keresőfa
- Garancia: semelyik csúcs egyensúlyi faktorának abszolút értéke nem lehet nagyobb 1-nél

Definíció

Egy p csúcs **egyensúlyi faktora** fiai magasságának különbsége.

Definíció

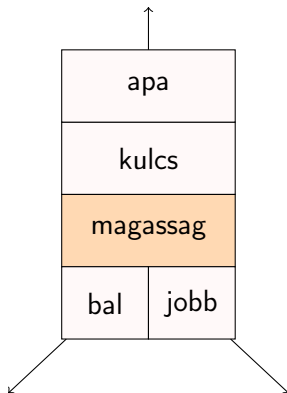
Üres fa magassága: $h(\text{nil}) = 0$

p gyökerű fa magassága: $h(p) = \max(h(p.\text{bal}), h(p.\text{jobb})) + 1$



AVL fa implementációja

```
class Node {  
    Object kulcs;  
    int magassag;  
    Node* apa;  
    Node* bal;  
    Node* jobb;  
}
```

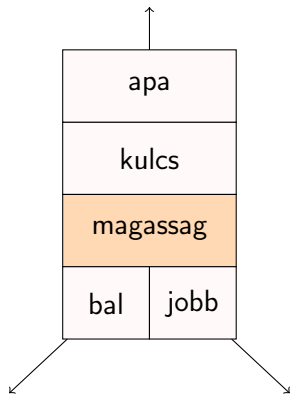


AVL fa implementációja

```
class Node {  
    Object kulcs;  
    int magassag;  
    Node* apa;  
    Node* bal;  
    Node* jobb;  
}
```

Megjegyzés

Találkozni olyan implementációval is, ahol a magasság helyett az egyensúlyi faktort tárolják



Legalább hány kulcsból áll egy h magas AVL fa?

magasság	m
1	1
2	2
3	$1+2+1=4$
4	$2+4+1=7$
5	$4+7+1=12$
6	$7+12+1=20$
7	$12+20+1=33$
8	$20+33+1=54$
\vdots	\vdots



Legalább hány kulcsból áll egy h magas AVL fa?

magasság	m
1	1
2	2
3	$1+2+1=4$
4	$2+4+1=7$
5	$4+7+1=12$
6	$7+12+1=20$
7	$12+20+1=33$
8	$20+33+1=54$
\vdots	\vdots
h	$m_{h-2} + m_{h-1} + 1$



Miért igaz, hogy az AVL fák $O(\log n)$ magasak?

- Jelölje m_h a h magas AVL fában lévő minimálisan található kulcsok számát ($m_1 = 1, m_2 = 2$)
- Általánosságban ($h > 2$ esetén): $m_h = m_{h-2} + m_{h-1} + 1$
- Nyilvánvalóan igaz továbbá, hogy $m_{h-2} < m_{h-1}$, vagyis $m_h > 2m_{h-2}$



Miért igaz, hogy az AVL fák $O(\log n)$ magasak?

- Jelölje m_h a h magas AVL fában lévő minimálisan található kulcsok számát ($m_1 = 1, m_2 = 2$)
- Általánosságban ($h > 2$ esetén): $m_h = m_{h-2} + m_{h-1} + 1$
- Nyilvánvalóan igaz továbbá, hogy $m_{h-2} < m_{h-1}$, vagyis $m_h > 2m_{h-2} > 2 * 2m_{h-4}$



Miért igaz, hogy az AVL fák $O(\log n)$ magasak?

- Jelölje m_h a h magas AVL fában lévő minimálisan található kulcsok számát ($m_1 = 1, m_2 = 2$)
- Általánosságban ($h > 2$ esetén): $m_h = m_{h-2} + m_{h-1} + 1$
- Nyilvánvalóan igaz továbbá, hogy $m_{h-2} < m_{h-1}$, vagyis $m_h > 2m_{h-2} > 2 * 2m_{h-4} > 2 * 2 * 2m_{h-6}$
- Általánosságban $m_h > 2^i m_{h-2i}$, amit m_1 -ig visszavezetve $m_h > 2^{h/2}$



Miért igaz, hogy az AVL fák $O(\log n)$ magasak?

- Jelölje m_h a h magas AVL fában lévő minimálisan található kulcsok számát ($m_1 = 1, m_2 = 2$)
- Általánosságban ($h > 2$ esetén): $m_h = m_{h-2} + m_{h-1} + 1$
- Nyilvánvalóan igaz továbbá, hogy $m_{h-2} < m_{h-1}$, vagyis $m_h > 2m_{h-2} > 2 * 2m_{h-4} > 2 * 2 * 2m_{h-6}$
- Általánosságban $m_h > 2^i m_{h-2i}$, amit m_1 -ig visszavezetve $m_h > 2^{h/2}$
- Tegyük fel, hogy egy h magas AVL fa $n \geq m_h$ csúcsból áll, azaz $n > 2^{h/2}$



Miért igaz, hogy az AVL fák $O(\log n)$ magasak?

- Jelölje m_h a h magas AVL fában lévő minimálisan található kulcsok számát ($m_1 = 1, m_2 = 2$)
- Általánosságban ($h > 2$ esetén): $m_h = m_{h-2} + m_{h-1} + 1$
- Nyilvánvalóan igaz továbbá, hogy $m_{h-2} < m_{h-1}$, vagyis $m_h > 2m_{h-2} > 2 * 2m_{h-4} > 2 * 2 * 2m_{h-6}$
- Általánosságban $m_h > 2^i m_{h-2i}$, amit m_1 -ig visszavezetve $m_h > 2^{h/2}$
- Tegyük fel, hogy egy h magas AVL fa $n \geq m_h$ csúcsból áll, azaz $n > 2^{h/2}$, vagyis $h < 2 \log_2(n)$



Miért igaz, hogy az AVL fák $O(\log n)$ magasak?

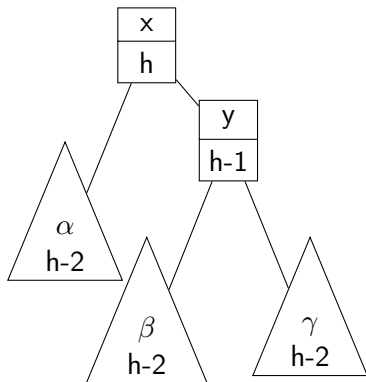
- Jelölje m_h a h magas AVL fában lévő minimálisan található kulcsok számát ($m_1 = 1, m_2 = 2$)
- Általánosságban ($h > 2$ esetén): $m_h = m_{h-2} + m_{h-1} + 1$
- Nyilvánvalóan igaz továbbá, hogy $m_{h-2} < m_{h-1}$, vagyis $m_h > 2m_{h-2} > 2 * 2m_{h-4} > 2 * 2 * 2m_{h-6}$
- Általánosságban $m_h > 2^i m_{h-2i}$, amit m_1 -ig visszavezetve $m_h > 2^{h/2}$
- Tegyük fel, hogy egy h magas AVL fa $n \geq m_h$ csúcsból áll, azaz $n > 2^{h/2}$, vagyis $h < 2 \log_2(n)$

Megjegyzés

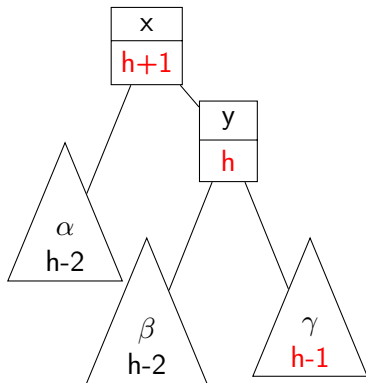
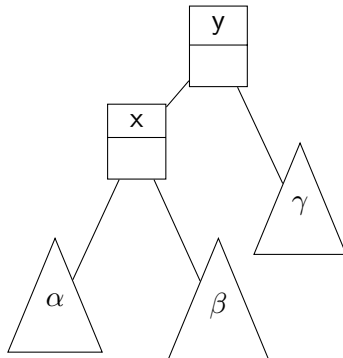
Az élesebb $h < 1.44 \log_2(n)$ korlát is bizonyítható.



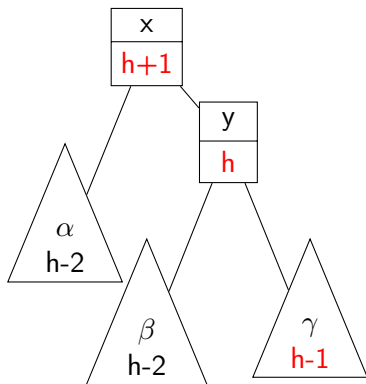
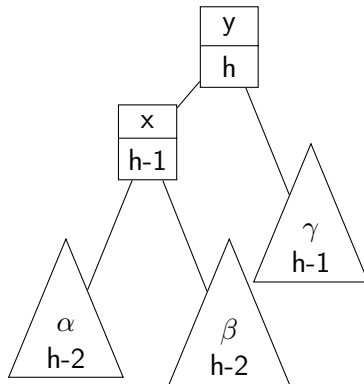
AVL fák kiegyensúlyozottságának fenntartása forgatásokkal

(a) x körüli balra forgatás előtt

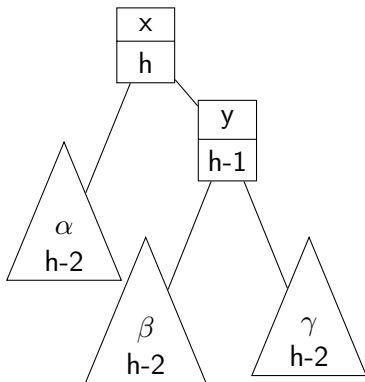
AVL fák kiegyensúlyozottságának fenntartása forgatásokkal

(a) x körüli balra forgatás előtt(b) x körüli balra forgatva

AVL fák kiegyensúlyozottságának fenntartása forgatásokkal

(a) x körüli balra forgatás előtt(b) x körüli balra forgatva

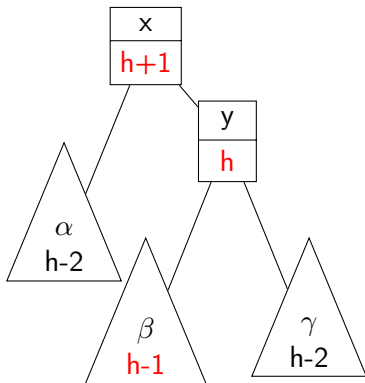
Amikor egy forgatás nem elég



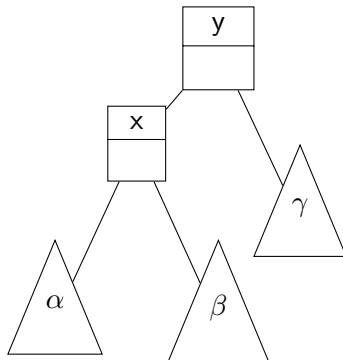
(a) x körüli balra forgatás előtt



Amikor egy forgatás nem elég



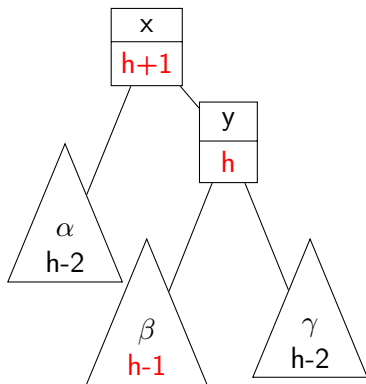
(a) x körüli balra forgatás előtt



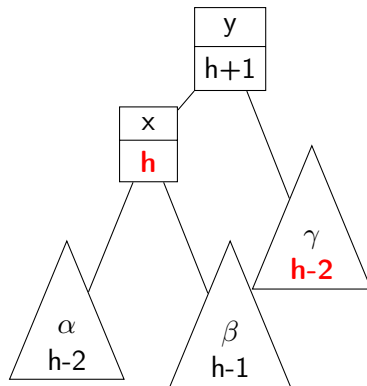
(b) x körüli balra forgatva



Amikor egy forgatás nem elég



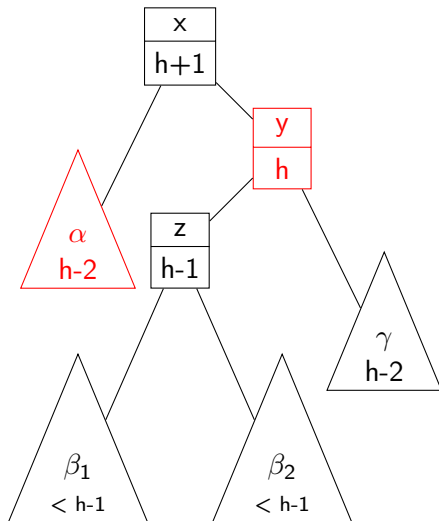
(a) x körüli balra forgatás előtt



(b) x körüli balra forgatva



Amikor egy forgatás nem elég – segédforgatás

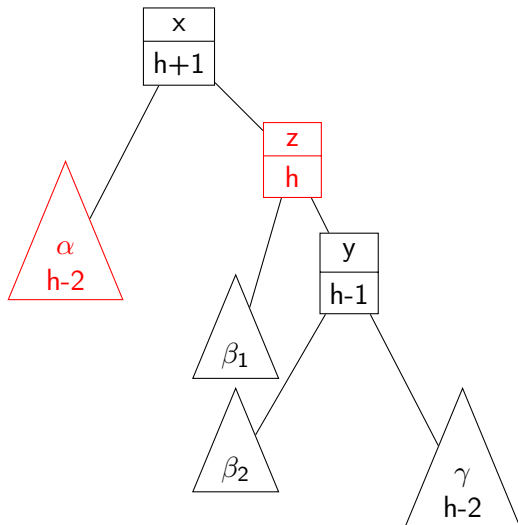


Megoldás

y körül jobbra forgatunk,
majd x körül balra



Amikor egy forgatás nem elég – segédforgatás

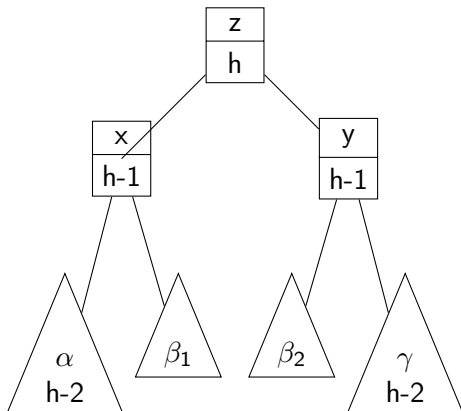


Észrevétel

β_2 nem lehetett magasabb,
mint γ



Amikor egy forgatás nem elég – segédforgatás



Megjegyzések a helyreállításokhoz

- A tárgyalt esetek tükörképei is előfordulhatnak
- A törlés hatására elromló AVL-fát azonos módon állítjuk helyre



Általános keresőfák

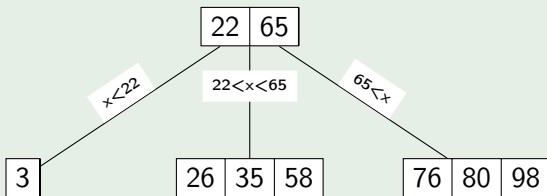
- Az általános keresőfát az különbözteti meg a bináris keresőfától, hogy egy csúcs több kulcsot is tartalmazhat
- Keresőfa tulajdonság kiterjesztése
 - A csúcsban található kulcsok $<$ szerint rendezettek
 - A tárolt kulcsok értékei meghatározzák a kulcsértékeknek azon tartományait, amelyekbe a részfák kulcsai eshetnek



Általános keresőfák

- Az általános keresőfát az különbözteti meg a bináris keresőfától, hogy egy csúcs több kulcsot is tartalmazhat
- Keresőfa tulajdonság kiterjesztése
 - A csúcsban található kulcsok $<$ szerint rendezettek
 - A tárolt kulcsok értékei meghatározzák a kulcsértékeknek azon tartományait, amelyekbe a részfák kulcsai eshetnek

Példa



B-fa definíciója

Definíció

t -rangú B-fa alatt olyan általános keresőfát értünk, amelyre teljesül, hogy:

- Minden gyökértől különböző p csúcsára $t \leq Rang(p) \leq 2t^a$
- r gyökerének rangjára pedig $1 \leq Rang(r) \leq 2t$
- Minden nemlevél p csúcsra és $1 \leq i \leq Rang(p) + 1$ esetén $Fiu(p, i) \neq Nil$
- Minden $p \in F$ levélpontra $d(p) = h(F)$, azaz minden levél pont mélysége azonos.

^arang alatt a fapontban tárolt kulcsok számát értjük



B-fa implementációja

```
class Node {  
    Object[] kulcsok;  
    int meret;  
    Node *apa;  
    Node *gyerekek[meret+1];  
    boolean level;  
}
```



B-fa implementációja

```
class Node {  
    Object[] kulcsok;  
    int meret;  
    Node *apa;  
    Node *gyerekek[meret+1];  
    boolean level;  
}
```

Fontos!

Az eddigiektől eltérően egy csúcsban több kulcs is található.
A csúcson belüli kulcsokra érvényesül a $<$ rendezés.
A csúcsokról eltároljuk, hogy levelek-e (level változó)



B-fában keresés

```
B-FÁBANKERES(x, k) {  
    i=0  
    while i < meret és k > x.kulcsok[i] {  
        i = i+1  
    }  
  
    if (i < meret és k = x.kulcsok[i]) {  
        return (x,i)    // az x csúcs i-edik kulcsát kerestük  
    }  
    if (x.level) {  
        return nil      // a B-fa nem tartalmazza k-t  
    } else {  
        // a megfelelő ágban keresünk tovább  
        return B-FÁBANKERES(x.gyerekek[i], k)  
    }  
}
```



B-fák kiegyensúlyozottsága

- A B-fák kiegyensúlyozottsága abból fakad, hogy minden levél azonos mélységen található, illetve, hogy minden (nemgyökér) csúcs legalább $t + 1$ elágazással rendelkezik
 - t értéke a gyakorlatban nagy, ezen a kurzuson 2-nek vesszük (hacsak más nem mondunk)
- Az AVL-fánál "kiegyensúlyozottabb", magassága $O(\log_t(n))$
 - Aszimptotikusan nincs jelentősége a logaritmus alapjának, viszont ha másodlagos háttértárról olvasunk, számíthat



B-fák tulajdonságainak fenntartása – méret túlcsordulása

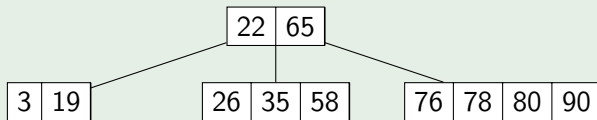
- B-fákba is levélként szúrunk be
- $2t$ méretű csúcsba beszúrva, $2t + 1$ méretű csúcsot kapunk



B-fák tulajdonságainak fenntartása – méret túlcsoordulása

- B-fákba is levélként szúrunk be
- $2t$ méretű csúcsba beszúrva, $2t + 1$ méretű csúcsot kapunk a "középső" elem mentén kettévágva éppen $2t$ méretű csúcsunk lesz (a középső elemet küldjük föl az ősbe)
- Szükség szerint ismételjük az előző lépést

Példa

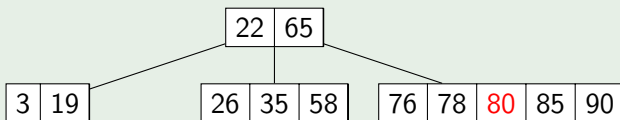


B-fák tulajdonságainak fenntartása – méret túlcsoordulása

- B-fákba is levélként szúrunk be
- $2t$ méretű csúcsba beszúrva, $2t + 1$ méretű csúcsot kapunk a "középső" elem mentén kettévágva éppen $2t$ méretű csúcsunk lesz (a középső elemet küldjük föl az ősbbe)
- Szükség szerint ismételjük az előző lépést

Példa

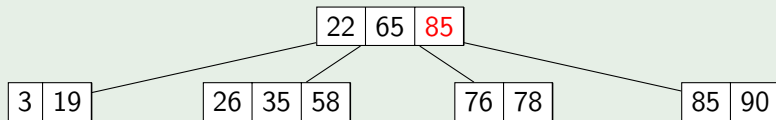
Beszúr(85)



B-fák tulajdonságainak fenntartása – méret túlcsoordulása

- B-fákba is levélként szúrunk be
- $2t$ méretű csúcsba beszúrva, $2t + 1$ méretű csúcsot kapunk a "középső" elem mentén kettévágva éppen $2t$ méretű csúcsunk lesz (a középső elemet küldjük föl az ősbe)
- Szükség szerint ismételjük az előző lépést

Példa



B-fák tulajdonságainak fenntartása – méret alul csordulása

- Kulcs törlése t méretű csúcsból $t - 1$ méretűvé teheti azt
- Itt is megelőzővel helyettesítünk
- Két eset lehetséges
 - Szomszédtól kölcsönzünk, ha rendelkezik felesleggel (azaz $> t$ méretű)
 - Összeolvasztjuk a kritikusan kicsi csúcsot a (kölcsönadni nem tudó) szomszédal $\Rightarrow t + (t - 1) + 1 = 2t$ méretű csúcs jön létre



Összegzés

- A bináris keresőfák műveletei $O(h)$ idejűek
- Legrosszabb esetben azonban n is lehet a fák magassága ($\Theta(\log n)$ helyett)
- Kiegyensúlyozott keresőfák használatával garantálható, hogy a keresőfa kiegyensúlyozottsága sose romoljon el "túlságosan"

