Análise amortizada

Notas de aula de um curso do Robert Tarjan.

"*Amortized Analysis Explained*"

por Rebecca Fiebrink, Princeton University

Splay trees

ABB: árvore binária de busca

Operação SPLAY(x, S), onde S é uma splay tree:
quando x é acessado, move-se x para a raiz por rotações.

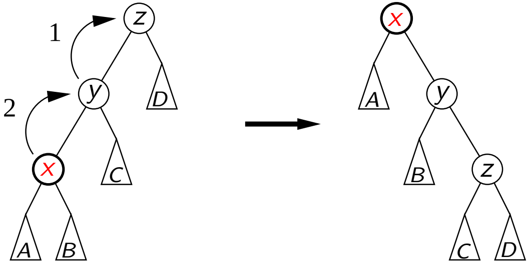
As rotações são feitas numa ordem específica, de duas em duas.

Splay trees

ABB: árvore binária de busca

Operação SPLAY(x, S), onde S é uma splay tree:
quando x é acessado, move-se x para a raiz por rotações.

As rotações são feitas numa ordem específica, de duas em duas.



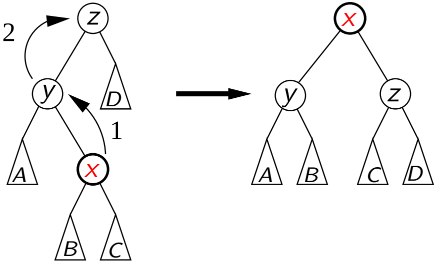
Acima, o rr splay step.

Splay trees

ABB: árvore binária de busca

Operação SPLAY(x, S), onde S é uma splay tree:
quando x é acessado, move-se x para a raiz por rotações.

As rotações são feitas numa ordem específica, de duas em duas.



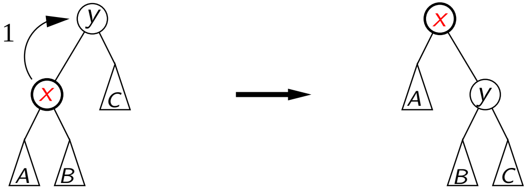
Acima, o lr splay step.

Splay trees

ABB: árvore binária de busca

Operação SPLAY(x, S), onde S é uma splay tree:
quando x é acessado, move-se x para a raiz por rotações.

As rotações são feitas numa ordem específica, de duas em duas.
Eventualmente no final uma rotação simples é necessária.



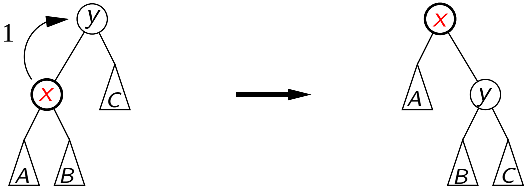
Acima, o r splay step.

Splay trees

ABB: árvore binária de busca

Operação SPLAY(x, S), onde S é uma splay tree:
quando x é acessado, move-se x para a raiz por rotações.

As rotações são feitas numa ordem específica, de duas em duas.
Eventualmente no final uma rotação simples é necessária.



Acima, o r splay step.

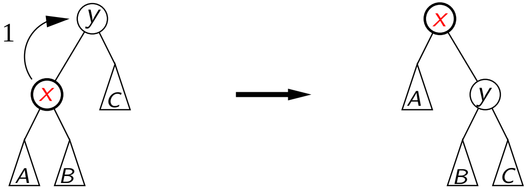
Além destes, o l splay, o rl splay e o ll splay step.

Splay trees

ABB: árvore binária de busca

Operação SPLAY(x, S), onde S é uma splay tree:
quando x é acessado, move-se x para a raiz por rotações.

As rotações são feitas numa ordem específica, de duas em duas.
Eventualmente no final uma rotação simples é necessária.



Acima, o r splay step.

Além destes, o l splay, o rl splay e o ll splay step.

Splay steps são realizados até que x seja raiz.

Splay trees

ABB: árvore binária de busca

Operação SPLAY(x, S), onde S é uma splay tree:
quando x é acessado, move-se x para a raiz por rotações.

Splay trees

ABB: árvore binária de busca

Operação SPLAY(x, S), onde S é uma splay tree:
quando x é acessado, move-se x para a raiz por rotações.

Custo de pior caso do SPLAY: $\Theta(n)$,
onde n é o número de elementos na splay tree.

Splay trees

ABB: árvore binária de busca

Operação SPLAY(x, S), onde S é uma splay tree:
quando x é acessado, move-se x para a raiz por rotações.

Custo de pior caso do SPLAY: $\Theta(n)$,
onde n é o número de elementos na splay tree.

Queremos mostrar que uma splay tree tem
comportamento mais parecido com o de uma ABBB.

(ABBB: ABB balanceada)

Splay trees: pior caso

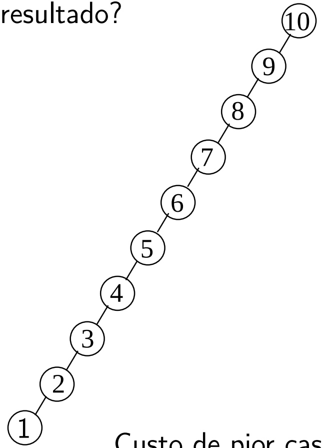
Insira numa splay tree vazia $1, 2, 3, 4, \ldots, 10$.

Qual é o resultado?

Splay trees: pior caso

Insira numa splay tree vazia $1, 2, 3, 4, \ldots, 10$.

Qual é o resultado?



Custo de pior caso do SPLAY: $\Theta(n)$,
onde n é o número de elementos na splay tree.

Splay trees: análise

S: splay tree

Custo: número de rotações.

Mostraremos que o custo amortizado por SPLAY é $\mathrm{O}(\lg n)$.

Splay trees: análise

S: splay tree

Custo: número de rotações.

Mostraremos que o custo amortizado por SPLAY é $\mathrm{O}(\lg n)$.

x participa de todos os splay steps de SPLAY(x, S).

Splay trees: análise

S: splay tree

Custo: número de rotações.

Mostraremos que o custo amortizado por SPLAY é $\mathrm{O}(\lg n)$.

x participa de todos os splay steps de SPLAY(x, S).

Análise amortizada dos splay steps.

Splay trees: análise

S: splay tree

Custo: número de rotações.

Mostraremos que o custo amortizado por SPLAY é $\mathrm{O}(\lg n)$.

x participa de todos os splay steps de SPLAY(x, S).

Análise amortizada dos splay steps.

$S_i(x)$: subárvore de S enraizada em x no instante i
$s_i(x) = |S_i(x)|$ ▷ número de nós na subárvore

Splay trees: análise

S: splay tree

Custo: número de rotações.

Mostraremos que o custo amortizado por SPLAY é $\mathrm{O}(\lg n)$.

x participa de todos os splay steps de SPLAY(x, S).

Análise amortizada dos splay steps.

$S_i(x)$: subárvore de S enraizada em x no instante i
$s_i(x) = |S_i(x)|$ ▷ número de nós na subárvore

Tome $r_i(x) = \lg s_i(x)$.

$r_i(x)$ indica o potencial local no nó x.

Splay trees: análise

S: splay tree

Custo: número de rotações.

Mostraremos que o custo amortizado por SPLAY é $\mathrm{O}(\lg n)$.

x participa de todos os splay steps de SPLAY(x, S).

Análise amortizada dos splay steps.

$S_i(x)$: subárvore de S enraizada em x no instante i
$s_i(x) = |S_i(x)|$ ▷ número de nós na subárvore

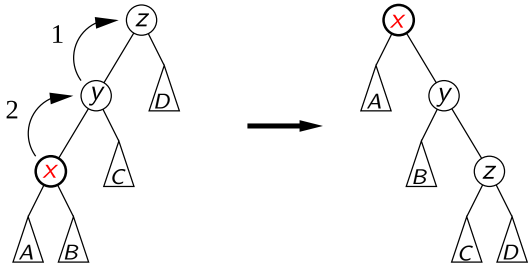
Tome $r_i(x) = \lg s_i(x)$.

$r_i(x)$ indica o potencial local no nó x.

Seja $\Phi_i = \sum_x r_i(x)$.

Análise amortizada dos splay steps

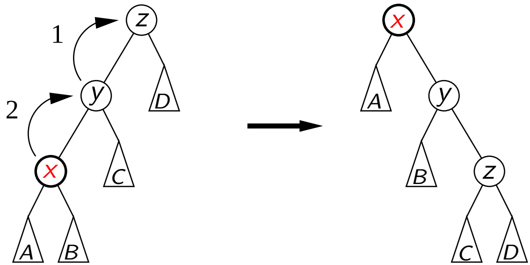
Caso do rr splay step.



Custo real: 2

Análise amortizada dos splay steps

Caso do rr splay step.



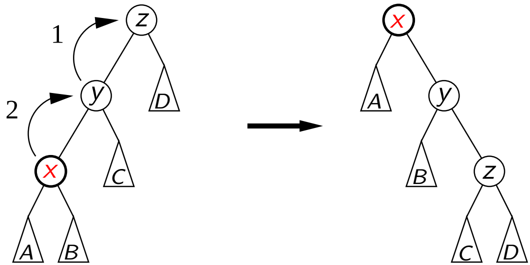
Custo real: 2

Alteração no potencial:

$$\Phi_i - \Phi_{i-1} = \sum_w r_i(w) - \sum_w r_{i-1}(w) = \sum_w (r_i(w) - r_{i-1}(w))$$

Análise amortizada dos splay steps

Caso do rr splay step.



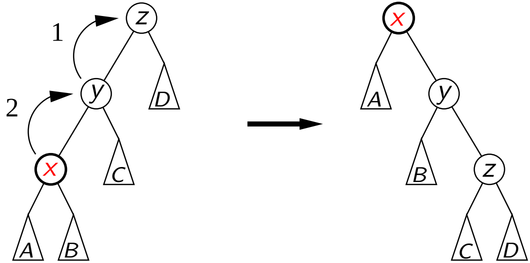
Custo real: 2

Alteração no potencial:

$$\Phi_i - \Phi_{i-1} = \sum_w r_i(w) - \sum_w r_{i-1}(w) = \sum_w (r_i(w) - r_{i-1}(w))$$
$$= (r_i(x) - r_{i-1}(x)) + (r_i(y) - r_{i-1}(y)) + (r_i(z) - r_{i-1}(z))$$

Análise amortizada dos splay steps

Caso do rr splay step.



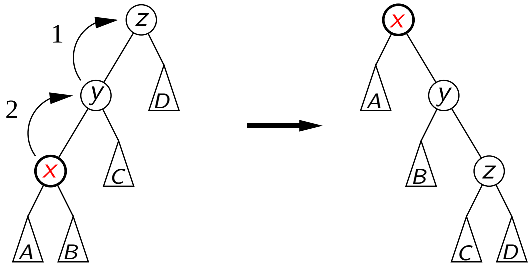
Custo real: 2

Alteração no potencial:

$$\begin{aligned}
\Phi_i - \Phi_{i-1} &= \textstyle\sum_w r_i(w) - \sum_w r_{i-1}(w) = \sum_w (r_i(w) - r_{i-1}(w)) \\
&= (r_i(x) - r_{i-1}(x)) + (r_i(y) - r_{i-1}(y)) + (r_i(z) - r_{i-1}(z)) \\
&= (r_i(y) + r_i(z)) - (r_{i-1}(x) + r_{i-1}(y)) \qquad \triangleright\ r_i(x) = r_{i-1}(z)
\end{aligned}$$

Análise amortizada dos splay steps

Caso do rr splay step.



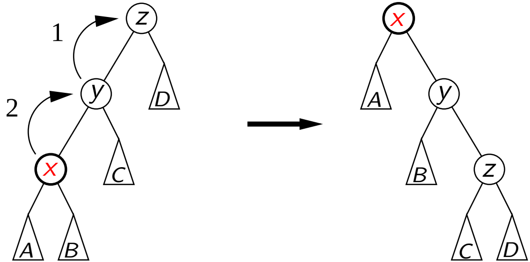
Custo real: 2

Alteração no potencial:

$$
\begin{aligned}
\Phi_i - \Phi_{i-1} &= \textstyle\sum_w r_i(w) - \sum_w r_{i-1}(w) = \sum_w (r_i(w) - r_{i-1}(w)) \\
&= (r_i(x) - r_{i-1}(x)) + (r_i(y) - r_{i-1}(y)) + (r_i(z) - r_{i-1}(z)) \\
&= (r_i(y) + r_i(z)) - (r_{i-1}(x) + r_{i-1}(y)) && \triangleright\ r_i(x) = r_{i-1}(z) \\
&\leq r_i(y) + r_i(z) - 2\, r_{i-1}(x) && \triangleright\ r_{i-1}(x) \leq r_{i-1}(y)
\end{aligned}
$$

Análise amortizada dos splay steps

Caso do rr splay step.

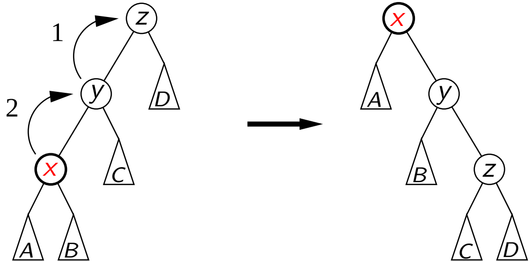


Custo real: 2

Alteração no potencial: $\Phi_i - \Phi_{i-1} \leq r_i(y) + r_i(z) - 2r_{i-1}(x)$

Análise amortizada dos splay steps

Caso do rr splay step.



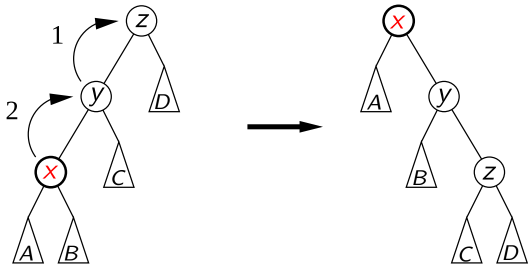
Custo real: 2

Alteração no potencial: $\Phi_i - \Phi_{i-1} \leq r_i(y) + r_i(z) - 2r_{i-1}(x)$

Custo amortizado: $\hat{c}_i \leq 2 + r_i(y) + r_i(z) - 2r_{i-1}(x)$

Análise amortizada dos splay steps

Caso do rr splay step.



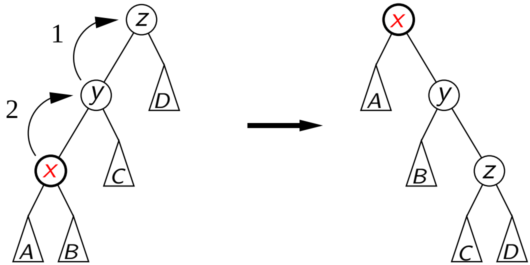
Custo real: 2

Alteração no potencial: $\Phi_i - \Phi_{i-1} \leq r_i(y) + r_i(z) - 2r_{i-1}(x)$

Custo amortizado: $\hat{c}_i \leq 2 + r_i(y) + r_i(z) - 2r_{i-1}(x)$

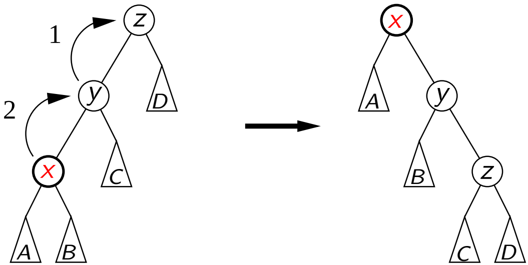
Queremos uma delimitação que dependa apenas de x.

Caso do rr splay step



Temos que $\frac{\log a + \log b}{2} \leq \log(\frac{a+b}{2})$. Logo

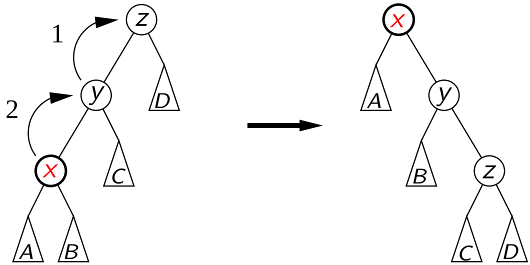
Caso do rr splay step



Temos que $\frac{\log a + \log b}{2} \leq \log(\frac{a+b}{2})$. Logo

$$\begin{aligned} r_{i-1}(x) + r_i(z) &= \lg s_{i-1}(x) + \lg s_i(z) \\ &\leq 2 \lg \left(\frac{s_{i-1}(x) + s_i(z)}{2}\right) \\ &< 2 \lg \left(\frac{s_i(x)}{2}\right) \\ &= 2 \lg s_i(x) - 2. \end{aligned}$$

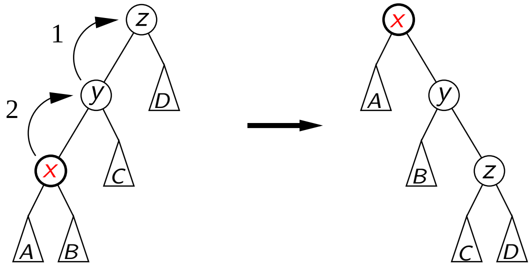
Caso do rr splay step



Temos que $\frac{\log a + \log b}{2} \leq \log(\frac{a+b}{2})$. Logo

$$r_{i-1}(x) + r_i(z) \ < \ 2 \lg s_i(x) - 2 \ = \ 2\, r_i(x) - 2.$$

Caso do rr splay step



Temos que $\frac{\log a + \log b}{2} \leq \log(\frac{a+b}{2})$. Logo

$$r_{i-1}(x) + r_i(z) \ < \ 2 \lg s_i(x) - 2 \ = \ 2\, r_i(x) - 2.$$

Então

$$\begin{aligned} \hat{c}_i &\leq 2 + r_i(y) + r_i(z) - 2r_{i-1}(x) \\ &< 2 + r_i(x) + (2\, r_i(x) - r_{i-1}(x) - 2) - 2r_{i-1}(x) \\ &= 3(r_i(x) - r_{i-1}(x)). \end{aligned}$$

Análise amortizada dos splay steps

Analogamente podemos mostrar que

$$\hat{c}_i < 3(r_i(x) - r_{i-1}(x))$$

para rl splay steps, lr splay steps, e ll splay steps.

Análise amortizada dos splay steps

Analogamente podemos mostrar que

$$\hat{c}_i < 3(r_i(x) - r_{i-1}(x))$$

para rl splay steps, lr splay steps, e ll splay steps.

Para l splay steps e r splay steps, vale que

$$\hat{c}_i \leq 3(r_i(x) - r_{i-1}(x)) + 1.$$

Análise amortizada dos splay steps

Analogamente podemos mostrar que

$$\hat{c}_i < 3(r_i(x) - r_{i-1}(x))$$

para rl splay steps, lr splay steps, e ll splay steps.

Para l splay steps e r splay steps, vale que

$$\hat{c}_i \leq 3(r_i(x) - r_{i-1}(x)) + 1.$$

Se m é o número de splay steps e n o número de nós,

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{m} \hat{c}_i &\leq 3\sum_{i=1}^{m}(r_i(x) - r_{i-1}(x)) + 1 \\ &= 3(r_m(x) - r_0(x)) + 1 \\ &\leq 3 \lg n + 1.\end{aligned}$$

Análise amortizada dos splay steps

Lembre-se que $\Phi_i = \sum_x r_i(x)$.

Ou seja, $\Phi_i \geq 0$ para todo i.

Análise amortizada dos splay steps

Lembre-se que $\Phi_i = \sum_x r_i(x)$.

Ou seja, $\Phi_i \geq 0$ para todo i.

Então vale que o custo do SPLAY(x, S) é

$$\sum_{i=1}^{m} c_i = \sum_{i=1}^{m} \hat{c}_i - \Phi_m + \Phi_0 \leq 3 \lg n + 1 - \Phi_m + \Phi_0.$$

Análise amortizada dos splay steps

Lembre-se que $\Phi_i = \sum_x r_i(x)$.

Ou seja, $\Phi_i \geq 0$ para todo i.

Então vale que o custo do SPLAY(x, S) é

$$\sum_{i=1}^{m} c_i = \sum_{i=1}^{m} \hat{c}_i - \Phi_m + \Phi_0 \leq 3 \lg n + 1 - \Phi_m + \Phi_0.$$

É possível mostrar algo semelhante para inserções em splay trees.

Análise amortizada dos splay steps

Lembre-se que $\Phi_i = \sum_x r_i(x)$.

Ou seja, $\Phi_i \geq 0$ para todo i.

Então vale que o custo do SPLAY(x, S) é

$$\sum_{i=1}^{m} c_i \;=\; \sum_{i=1}^{m} \hat{c}_i \;-\Phi_m + \Phi_0 \leq \; 3 \lg n + 1 - \Phi_m + \Phi_0.$$

É possível mostrar algo semelhante para inserções em splay trees.

E disso é possível concluir que o custo amortizado
por operação em uma splay tree é $\mathrm{O}(\lg n)$.

Inserções em splay trees

A inserção em splay trees é igual à inserção em ABB, seguida de uma chamada a SPLAY no elemento inserido.

Seja y_1 o pai de x após a inserção, e
y_i o pai de y_{i-1} para $i = 1, \ldots, k$, onde y_k é a raiz da árvore.

Inserções em splay trees

A inserção em splay trees é igual à inserção em ABB, seguida de uma chamada a SPLAY no elemento inserido.

Seja y_1 o pai de x após a inserção, e
y_i o pai de y_{i-1} para $i = 1, \ldots, k$, onde y_k é a raiz da árvore.

Considere a variação do potencial causado pela inserção.

r: potencial local antes da inserção
r': potencial local depois da inserção

Inserções em splay trees

A inserção em splay trees é igual à inserção em ABB, seguida de uma chamada a SPLAY no elemento inserido.

Seja y_1 o pai de x após a inserção, e
y_i o pai de y_{i-1} para $i = 1, \ldots, k$, onde y_k é a raiz da árvore.

Considere a variação do potencial causado pela inserção.

r: potencial local antes da inserção
r': potencial local depois da inserção

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \sum_{j=1}^{k} (r'(y_j) - r(y_j)) \\ &= \sum_{j=1}^{k} (\lg(s(y_j) + 1) - \lg(s(y_j))) \end{aligned}$$

Inserções em splay trees

A inserção em splay trees é igual à inserção em ABB, seguida de uma chamada a SPLAY no elemento inserido.

Seja y_1 o pai de x após a inserção, e
y_i o pai de y_{i-1} para $i = 1, \ldots, k$, onde y_k é a raiz da árvore.

Considere a variação do potencial causado pela inserção.

r: potencial local antes da inserção
r': potencial local depois da inserção

$$\begin{aligned}
\Delta\Phi &= \sum_{j=1}^{k}(r'(y_j) - r(y_j)) = \sum_{j=1}^{k}(\lg(s(y_j)+1) - \lg(s(y_j))) \\
&= \sum_{j=1}^{k} \lg \frac{s(y_j)+1}{s(y_j)}
\end{aligned}$$

Inserções em splay trees

A inserção em splay trees é igual à inserção em ABB, seguida de uma chamada a SPLAY no elemento inserido.

Seja y_1 o pai de x após a inserção, e y_i o pai de y_{i-1} para $i = 1, \ldots, k$, onde y_k é a raiz da árvore.

Considere a variação do potencial causado pela inserção.

r: potencial local antes da inserção
r': potencial local depois da inserção

$$\begin{aligned}
\Delta\Phi &= \sum_{j=1}^{k}(r'(y_j) - r(y_j)) = \sum_{j=1}^{k}(\lg(s(y_j)+1) - \lg(s(y_j))) \\
&= \sum_{j=1}^{k}\lg\frac{s(y_j)+1}{s(y_j)} = \lg\Big(\prod_{j=1}^{k}\frac{s(y_j)+1}{s(y_j)}\Big)
\end{aligned}$$

Inserções em splay trees

Seja y_1 o pai de x após a inserção, e y_i o pai de y_{i-1} para $i = 1, \ldots, k$, onde y_k é a raiz da árvore.

Considere a variação do potencial causado pela inserção.

r: potencial local antes da inserção
r': potencial local depois da inserção

$$\begin{aligned}
\Delta\Phi &= \sum_{j=1}^{k} (r'(y_j) - r(y_j)) = \sum_{j=1}^{k} (\lg(s(y_j)+1) - \lg(s(y_j))) \\
&= \sum_{j=1}^{k} \lg \frac{s(y_j)+1}{s(y_j)} = \lg \Big(\prod_{j=1}^{k} \frac{s(y_j)+1}{s(y_j)} \Big)
\end{aligned}$$

Inserções em splay trees

Seja y_1 o pai de x após a inserção, e y_i o pai de y_{i-1} para $i = 1, \ldots, k$, onde y_k é a raiz da árvore.

Considere a variação do potencial causado pela inserção.

r: potencial local antes da inserção
r': potencial local depois da inserção

$$\begin{aligned}
\Delta\Phi &= \sum_{j=1}^{k} (r'(y_j) - r(y_j)) = \sum_{j=1}^{k} (\lg(s(y_j)+1) - \lg(s(y_j))) \\
&= \sum_{j=1}^{k} \lg \frac{s(y_j)+1}{s(y_j)} = \lg \Big(\prod_{j=1}^{k} \frac{s(y_j)+1}{s(y_j)} \Big) \\
&\leq \lg \Big(\frac{s(y_2)}{s(y_1)} \cdot \frac{s(y_3)}{s(y_2)} \cdots \frac{s(y_k)}{s(y_{k-1})} \cdot \frac{s(y_k)+1}{s(y_k)} \Big) \quad \text{(pois } s(y_j)+1 \leq s(y_{j+1})\text{)}
\end{aligned}$$

Inserções em splay trees

Seja y_1 o pai de x após a inserção, e y_i o pai de y_{i-1} para $i = 1, \ldots, k$, onde y_k é a raiz da árvore.

Considere a variação do potencial causado pela inserção.

r: potencial local antes da inserção
r': potencial local depois da inserção

$$
\begin{aligned}
\Delta\Phi &= \sum_{j=1}^{k} \lg \frac{s(y_j)+1}{s(y_j)} = \lg\Big(\prod_{j=1}^{k} \frac{s(y_j)+1}{s(y_j)}\Big) \\
&\leq \lg\Big(\frac{s(y_2)}{s(y_1)} \cdot \frac{s(y_3)}{s(y_2)} \cdots \frac{s(y_k)}{s(y_{k-1})} \cdot \frac{s(y_k)+1}{s(y_k)}\Big) \quad \text{(pois } s(y_j)+1 \leq s(y_{j+1})\text{)} \\
&= \lg\Big(\frac{s(y_k)+1}{s(y_1)}\Big)
\end{aligned}
$$

Inserções em splay trees

Seja y_1 o pai de x após a inserção, e y_i o pai de y_{i-1} para $i = 1, \ldots, k$, onde y_k é a raiz da árvore.

Considere a variação do potencial causado pela inserção.

r: potencial local antes da inserção
r': potencial local depois da inserção

$$\begin{aligned}
\Delta\Phi &= \sum_{j=1}^{k} \lg \frac{s(y_j)+1}{s(y_j)} = \lg \Big(\prod_{j=1}^{k} \frac{s(y_j)+1}{s(y_j)} \Big) \\
&= \lg \Big(\frac{s(y_2)}{s(y_1)} \cdot \frac{s(y_3)}{s(y_2)} \cdots \frac{s(y_k)}{s(y_{k-1})} \cdot \frac{s(y_k)+1}{s(y_k)} \Big) \quad \text{(pois } s(y_j)+1 \leq s(y_{j+1})\text{)} \\
&= \lg \Big(\frac{s(y_k)+1}{s(y_1)} \Big) \leq \lg(n+1).
\end{aligned}$$

Inserções em splay trees

Seja y_1 o pai de x após a inserção, e y_i o pai de y_{i-1} para $i = 1, \ldots, k$, onde y_k é a raiz da árvore.

Considere a variação do potencial causado pela inserção.

r: potencial local antes da inserção
r': potencial local depois da inserção

$$\begin{aligned}
\Delta\Phi &= \sum_{j=1}^{k} \lg \frac{s(y_j)+1}{s(y_j)} = \lg\Big(\prod_{j=1}^{k} \frac{s(y_j)+1}{s(y_j)}\Big) \\
&= \lg\Big(\frac{s(y_2)}{s(y_1)} \cdot \frac{s(y_3)}{s(y_2)} \cdots \frac{s(y_k)}{s(y_{k-1})} \cdot \frac{s(y_k)+1}{s(y_k)}\Big) \quad \text{(pois } s(y_j)+1 \leq s(y_{j+1})\text{)} \\
&= \lg\Big(\frac{s(y_k)+1}{s(y_1)}\Big) \leq \lg(n+1).
\end{aligned}$$

Então $\hat{c} \leq 0 + \lg n + 1 = \lg n + 1$. (inserção não faz rotações)

Concluindo a análise

Lembre-se que $\Phi_i \geq 0$ para todo i e agora $\Phi_0 = 0$.
(Começamos da árvore vazia.)

Concluindo a análise

Lembre-se que $\Phi_i \geq 0$ para todo i e agora $\Phi_0 = 0$.
(Começamos da árvore vazia.)

Então o custo total de m operações é

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^{m} c_i &= \sum_{i=1}^{m} \hat{c}_i - \Phi_m + \Phi_0 \\
&\leq \sum_{i=1}^{m} (3 \lg n_i + 1) - \Phi_m + \Phi_0 \\
&\leq 3m \lg m + m + 0 \\
&\leq 4m \lg m.
\end{aligned}$$

Concluindo a análise

Lembre-se que $\Phi_i \geq 0$ para todo i e agora $\Phi_0 = 0$.
(Começamos da árvore vazia.)

Então o custo total de m operações é

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^{m} c_i &= \sum_{i=1}^{m} \hat{c}_i - \Phi_m + \Phi_0 \\
&\leq \sum_{i=1}^{m} (3 \lg n_i + 1) - \Phi_m + \Phi_0 \\
&\leq 3m \lg m + m + 0 \\
&\leq 4m \lg m.
\end{aligned}$$

Portanto o custo amortizado por operação é $\mathrm{O}(\lg m)$.