

CI2612: Algoritmos y Estructuras de Datos II

Blai Bonet

Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

Cálculo de estadísticos de orden (selección)

© 2016 Blai Bonet

Objetivos

- Introducir el problema de selección del i -ésimo elemento en conjuntos de n elementos
- Presentar dos soluciones: un algoritmo randomizado que corre en tiempo lineal esperado y un algoritmo determinístico que corre en tiempo lineal
- Hacer análisis de correctitud y desempeño de ambos algoritmos

© 2016 Blai Bonet

Introducción

El i -ésimo estadístico de orden de un conjunto de n elementos es el **i -ésimo elemento más pequeño del conjunto**

Para un conjunto de n elementos:

- el primer estadístico de orden es el **menor elemento**
- el n -ésimo estadístico es el **mayor elemento**
- si n es par, el i -ésimo estadístico para $i = n/2$ es la **mediana**
- si $n = 2k + 1$ es impar, el i -ésimo estadístico para $i = \lfloor n/2 \rfloor = k$ es la **mediana inferior**
- si $n = 2k + 1$ es impar, el i -ésimo estadístico para $i = \lceil n/2 \rceil = k + 1$ es la **mediana superior**

© 2016 Blai Bonet

Problema de selección (cálculo de estadísticos)

Queremos diseñar un algoritmo que resuelva el siguiente problema:

Input: conjunto A con n **elementos distintos** e índice $i \in \{1, \dots, n\}$

Output: $x \in A$ tal que x es $>$ a exactamente $i - 1$ elementos en A

El problema de selección se resuelve en tiempo $O(n \log n)$ si primero ordenamos el conjunto

En este capítulo mostraremos dos algoritmos más eficientes:

- un **algoritmo randomizado** que calcula el i -ésimo elemento en **tiempo esperado** $O(n)$
- un **algoritmo determinístico** que calcula el i -ésimo elemento en tiempo $O(n)$ en el **peor caso**

Mínimos y máximos

Antes de abordar el caso general, nos ocupamos de los casos especiales $i = 1$ (cálculo del mínimo) e $i = n$ (cálculo del máximo)

Ambos problemas pueden resolverse claramente en tiempo lineal con un recorrido sobre todos los elementos del conjunto

Input: arreglo $A[p \dots r]$ con $n = r - p + 1$ **elementos distintos**

Output: máximo elemento x en $A[p \dots r]$

```
1 Maximum(array A, int p, int r)
2     m = A[p]
3     for i = p + 1 to r
4         if m < A[i]
5             m = A[i]
6     return m
```

Selección en tiempo lineal esperado

El problema general parece más difícil que calcular el máximo/mínimo

Sin embargo, selección puede hacerse en **tiempo lineal** en el peor caso

Primero mostraremos un algoritmo del tipo **dividir y conquistar** que es parecido a **Quicksort** excepto que hace la recursión **sólo** sobre un lado de la partición

Esta característica hace que el tiempo esperado sea de $\Theta(n)$ en lugar del tiempo esperado de $\Theta(n \log n)$ para **Quicksort**

El algoritmo **Randomized-Select** utiliza **Randomized-Partition** al igual que **Randomized-Quicksort**

Selección en tiempo lineal esperado

Input: arreglo $A[p \dots r]$ con $n = r - p + 1$ **elementos distintos** e índice $i \in \{1, \dots, n\}$

Output: $x \in A$ tal que x es $>$ a exactamente $i - 1$ elementos en A

```
1 Randomized-Select(array A, int p, int r, int i)
2     if p == r
3         return A[p]
4     q = Randomized-Partition(A, p, r)
5     k = q - p + 1                                % rango de A[q]: A[q] es k-ésimo
6     if i == k
7         return A[q]
8     else if i < k                                % i-ésimo está en A[p...q-1]
9         return Randomized-Select(A, p, q-1, i)
10    else                                          % i-ésimo es (i-k)-ésimo en A[q+1...r]
11        return Randomized-Select(A, q+1, r, i-k)
```

Correctitud

Demostración por inducción en el tamaño n :

Caso $n = 1$: Entonces $i = 1$, $p = r$, y el i -ésimo es $A[p] = A[r]$

Caso $n > 1$: **Randomized-Partition** reordena A y retorna **pivote** q tal que $A[j] < A[q] < A[k]$ para todo j y k con $p \leq j < q < k \leq r$

Para $k = q - p + 1$, tenemos:

- el k -ésimo de $A[p \dots r]$ es $A[q]$
- si $i < k$, el i -ésimo de $A[p \dots r]$ es el i -ésimo de $A[p \dots q - 1]$
- si $i > k$, el i -ésimo de $A[p \dots r]$ es el $(i - k)$ -ésimo de $A[q + 1 \dots r]$

Entonces, por HI, **Randomized-Select** es correcto \square

Análisis de peor caso

Existen varios peores casos que toman tiempo $\Theta(n^2)$

Considere el caso $i = 1$ (queremos el mínimo de $A[p \dots r]$) y suponga que **todas las llamadas** a **Randomized-Partition** retornan un pivote q tal que $A[q]$ es el **máximo** de $A[p \dots r]$

Entonces, $q = r$ y la recursión es sobre $A[p \dots r - 1]$ de tamaño $n - 1$

Se realizan $n - 1$ recursiones hasta que $p = r$ cuando se retorna $A[p]$

Cada llamada a **Randomized-Partition** toma tiempo $\Theta(k)$ donde k es el tamaño de $A[p \dots r]$

El tiempo total es:

$$T(n) = \sum_{k=1}^n \Theta(k) = \Theta\left(\sum_{k=1}^n k\right) = \Theta\left(\frac{n(n+1)}{2}\right) = \Theta(n^2)$$

Análisis de tiempo esperado (1 de 8)

Veremos que el tiempo esperado de **Randomized-Select** es $\Theta(n)$ para **cualquier entrada** (e.g. no existe entrada para la cual **Randomized-Select** corre en tiempo esperado $\Theta(n^2)$)

Definimos la **variable aleatoria** $T(n)$ para el tiempo de corrida sobre una entrada cualquiera $A[p \dots r]$ con **elementos distintos** de tamaño $n = r - p + 1$

El pivote q retornado por **Randomized-Partition** es cualquier elemento de $A[p \dots r]$ con **igual probabilidad**

Por lo tanto, el subarreglo $A[p \dots q]$ tiene k elementos con probabilidad $1/n$ para todo $1 \leq k \leq n$

Análisis de tiempo esperado (2 de 8)

Definimos la **variable aleatoria indicadora** X_k dada por

$$X_k = \mathbb{I}\{\text{el subarreglo } A[p \dots q] \text{ tiene } k \text{ elementos}\}$$

Como los elementos en $A[p \dots r]$ son distintos:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X_k] &= \mathbb{P}(\text{el subarreglo } A[p \dots q] \text{ tiene } k \text{ elementos}) \\ &= \mathbb{P}(A[q] \text{ es el } k\text{-ésimo de } A[p \dots r]) \\ &= 1/n \end{aligned}$$

Acotamos $T(n)$ considerando el subproblema más costoso:

$$T(n) \leq \Theta(n) + \sum_{k=1}^n X_k \cdot \max\{T(k-1), T(n-k)\}$$

Análisis de tiempo esperado (3 de 8)

Asumimos que $T(n)$ es **monotona creciente**:

$$T(n) \leq \Theta(n) + \sum_{k=1}^n X_k \cdot T(\max\{k-1, n-k\})$$

Tomamos **valor esperado** en ambos lados

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[T(n)] &\leq \mathbb{E}[\Theta(n)] + \sum_{k=1}^n \mathbb{E}[X_k \cdot T(\max\{k-1, n-k\})] \\ &= \Theta(n) + \sum_{k=1}^n \mathbb{E}[X_k] \cdot \mathbb{E}[T(\max\{k-1, n-k\})] \\ &= \Theta(n) + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \mathbb{E}[T(\max\{k-1, n-k\})] \end{aligned}$$

Análisis de tiempo esperado (4 de 8)

$$\mathbb{E}[X_k \cdot T(\max\{k-1, n-k\})] \stackrel{?}{=} \mathbb{E}[X_k] \cdot \mathbb{E}[T(\max\{k-1, n-k\})]$$

El valor de la v.a. X_k depende del **pivote aleatorio** escogido por **Randomized-Partition**

El valor de la v.a. $T(\max\{k-1, n-k\})$ depende de los **próximos pivotes aleatorios** escogidos por **Randomized-Partition**

Dichas escogencias se realizan con la función **Random(p, r)**

Cada llamada a **Random(p, r)** retorna un **nuevo entero aleatorio** que es **independiente** de los otros enteros aleatorios (pasados y futuros)

(Resp. Ejercicio 9.2-2)

Análisis de tiempo esperado (5 de 8)

Veamos $\sum_{k=1}^n \mathbb{E}[T(\max\{k-1, n-k\})]$. Considere

$$m_k \doteq \max\{k-1, n-k\} = \begin{cases} n-k & \text{si } k \leq \lceil n/2 \rceil \\ k-1 & \text{si } k > \lceil n/2 \rceil \end{cases}$$

Cuando $n = 2\ell$ es par:

$$\begin{aligned} T(m_1) &= T(n-1) \\ T(m_2) &= T(n-2) \\ &\dots \\ T(m_\ell) &= T(\ell) = T(\lfloor n/2 \rfloor) \\ T(m_{\ell+1}) &= T(\ell) = T(\lfloor n/2 \rfloor) \\ &\dots \\ T(m_n) &= T(n-1) \end{aligned}$$

Análisis de tiempo esperado (5 de 8)

Veamos $\sum_{k=1}^n \mathbb{E}[T(\max\{k-1, n-k\})]$. Considere

$$m_k \doteq \max\{k-1, n-k\} = \begin{cases} n-k & \text{si } k \leq \lceil n/2 \rceil \\ k-1 & \text{si } k > \lceil n/2 \rceil \end{cases}$$

Cuando $n = 2\ell$ es par:

$$\sum_{k=1}^n \mathbb{E}[T(\max\{k-1, n-k\})] = 2 \sum_{k=\lfloor n/2 \rfloor}^{n-1} \mathbb{E}[T(k)]$$

Análisis de tiempo esperado (5 de 8)

Veamos $\sum_{k=1}^n \mathbb{E}[T(\max\{k-1, n-k\})]$. Considere

$$m_k \doteq \max\{k-1, n-k\} = \begin{cases} n-k & \text{si } k \leq \lceil n/2 \rceil \\ k-1 & \text{si } k > \lceil n/2 \rceil \end{cases}$$

Cuando $n = 2\ell + 1$ es impar:

$$T(m_1) = T(n-1)$$

$$T(m_2) = T(n-2)$$

...

$$T(m_\ell) = T(n-\ell) = T(\ell+1) = T(\lceil n/2 \rceil)$$

$$T(m_{\ell+1}) = T(n-\ell-1) = T(\ell) = T(\lfloor n/2 \rfloor)$$

$$T(m_{\ell+2}) = T(\ell+2-1) = T(\ell+1) = T(\lceil n/2 \rceil)$$

...

$$T(m_n) = T(n-1)$$

Análisis de tiempo esperado (5 de 8)

Veamos $\sum_{k=1}^n \mathbb{E}[T(\max\{k-1, n-k\})]$. Considere

$$m_k \doteq \max\{k-1, n-k\} = \begin{cases} n-k & \text{si } k \leq \lceil n/2 \rceil \\ k-1 & \text{si } k > \lceil n/2 \rceil \end{cases}$$

Cuando $n = 2\ell + 1$ es impar:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \mathbb{E}[T(\max\{k-1, n-k\})] &= \mathbb{E}[T(\lfloor n/2 \rfloor)] + 2 \sum_{k=\lceil n/2 \rceil}^{n-1} \mathbb{E}[T(k)] \\ &\leq 2 \sum_{k=\lceil n/2 \rceil}^{n-1} \mathbb{E}[T(k)] \end{aligned}$$

Análisis de tiempo esperado (5 de 8)

Veamos $\sum_{k=1}^n \mathbb{E}[T(\max\{k-1, n-k\})]$. Considere

$$m_k \doteq \max\{k-1, n-k\} = \begin{cases} n-k & \text{si } k \leq \lceil n/2 \rceil \\ k-1 & \text{si } k > \lceil n/2 \rceil \end{cases}$$

En ambos casos:

$$\sum_{k=1}^n \mathbb{E}[T(\max\{k-1, n-k\})] \leq 2 \sum_{k=\lceil n/2 \rceil}^{n-1} \mathbb{E}[T(k)]$$

Análisis de tiempo esperado (6 de 8)

$$\mathbb{E}[T(n)] \leq \Theta(n) + \frac{2}{n} \sum_{k=\lceil n/2 \rceil}^{n-1} \mathbb{E}[T(k)]$$

Mostraremos que $\mathbb{E}[T(n)] = O(n)$ por **sustitución** (i.e. inducción)

Sea $f(n)$ la función representada por el término $\Theta(n)$, y a una constante tal que $f(n) \leq an$ para todo $n > 0$

Tesis inductiva: $\mathbb{E}[T(n)] \leq cn$ para n grande ($n \geq n_0$) y $T(n) = O(1)$ para $n < n_0$

Análisis de tiempo esperado (7 de 8)

Para $n \geq 2n_0$,

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[T(n)] &\leq \Theta(n) + \frac{2}{n} \sum_{k=\lfloor n/2 \rfloor}^{n-1} \mathbb{E}[T(k)] \\ &\leq an + \frac{2}{n} \sum_{k=\lfloor n/2 \rfloor}^{n-1} ck \\ &= an + \frac{2c}{n} \left(\sum_{k=1}^{n-1} k - \sum_{k=1}^{\lfloor n/2 \rfloor - 1} k \right) \\ &\leq an + \frac{2c}{n} \left(\frac{(n-1)n}{2} - \frac{(n/2-2)(n/2-1)}{2} \right) \\ &\leq an + \frac{3cn}{4} + \frac{c}{2} \\ &= cn - \left(\frac{cn}{4} - \frac{c}{2} - an \right)\end{aligned}$$

Análisis de tiempo esperado (8 de 8)

Terminamos mostrando $cn - \left(\frac{cn}{4} - \frac{c}{2} - an \right) \leq cn$ para $n \geq 2n_0$

Es decir,

$$\begin{aligned}\frac{cn}{4} - \frac{c}{2} - an &\geq 0 \\ n \left(\frac{c}{4} - a \right) &\geq \frac{c}{2}\end{aligned}$$

Si $c > 4a$, entonces $n(c/4 - a) \geq c/2$ cuando $n \geq 2c/(c - 4a)$

Por lo tanto, c y n_0 deben ser tales que $c > 4a$ y $n_0 > c/(c - 4a)$ para que $\mathbb{E}[T(n)] = O(n)$ cuando **todos los elementos son distintos** \square

Selección en tiempo lineal en el peor caso

Ahora damos un algoritmo de selección que corre en tiempo lineal en el peor caso

Algoritmo de **interés teórico** ya que el algoritmo randomizado es más simple y tiene mejor desempeño en la práctica

El algoritmo es parecido al anterior pero garantiza que los “splits” sobre el arreglo son siempre balanceados

El algoritmo utiliza una versión de **Partition** al cual se le pasa el elemento pivote

Algoritmo de selección de tiempo lineal

El algoritmo realiza lo siguiente:

- Divide los n elementos de la entrada en $\lceil \frac{n}{5} \rceil$ grupos de hasta 5 elementos cada grupo (i.e. grupos pequeños)
- Calcula la mediana de cada grupo con **Insertion-Sort**
- Calcula la **mediana de las medianas** de forma recursiva
- Utiliza la mediana de las medianas como **pivote** para particionar los elementos de la entrada, garantizando una **partición balanceada**
- Hace recursión sobre el subproblema apropiado como en el algoritmo anterior

Mediana de las medianas

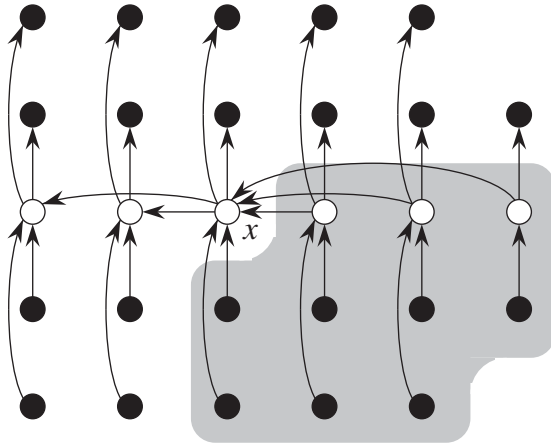


Imagen de Cormen et al. Intro. to Algorithms. MIT Press

Algoritmo de selección de tiempo lineal

```

1  Select(array A, int p, int r, int i)
2      if r - p + 1 <= N                                % constante N a determinar
3          Insertion-Sort(A, p, r)
4          return A[i]
5
6      ℓ = ⌈(r - p + 1) / 5⌉                               % número de grupos
7      let M[1...ℓ] be new array                         % mediana de cada grupo
8      for j = 0 to ℓ - 1
9          u = min { p + 5 * j + 4, r }
10         Insertion-Sort(A, p + 5 * j, u)
11         M[j+1] = A[⌈(p + 5 * j + u) / 2⌉]             % mediana (j+1)-ésimo grupo
12         x = Select(M, 1, ℓ, ⌈ℓ/2⌉)                   % mediana de medianas
13
14         q = Partition-With-Pivot(A, p, r, x)
15         k = q - p + 1                                  % rango de A[q]: A[q] es k-ésimo
16         if i == k
17             return A[q]                                % k-ésimo en A[p...r] es A[q]
18         else if i < k
19             return Select(A, p, q-1, i)                % i-ésimo está en A[p...q-1]
20         else
21             return Select(A, q+1, r, i-k)              % i-ésimo es (i-k)-ésimo en A[q+1...r]
    
```

Correctitud

El mismo argumento de antes

Lo único que ha cambiado es como se escoge el pivote:

- Antes el pivote era escogido de forma aleatoria
- Ahora el pivote es la mediana de las medianas

Si bajo la escogencia aleatoria el algoritmo es correcto, entonces lo tiene que ser con la nueva escogencia

Análisis de peor caso (1 de 4)

Acotamos el número de elementos mayores estrictos al pivote x :

Como los elementos son distintos, la mitad de las medianas son $\geq x$

Por lo tanto, la mitad de los grupos contribuyen 3 elementos **mayores estrictos** a x excepto (ver figura):

- el grupo al cual pertenece x
- el último grupo que puede tener menos de 5 elementos (cuando n no es divisible por 5)

El número de elementos mayores estrictos a x es al menos

$$3 \left(\left\lceil \frac{1}{2} \left\lceil \frac{n}{5} \right\rceil \right\rceil - 2 \right) \geq \frac{3n}{10} - 6$$

Análisis de peor caso (2 de 4)

El número de elementos **menores estrictos** a x es n menos el número de elementos mayores a x menos 1. Dicho número es a lo sumo

$$n - \left(\frac{3n}{10} - 6 \right) - 1 = \frac{7n}{10} + 6 - 1 = \frac{7n}{10} + 5$$

De forma similar se muestra que el número de elementos mayores estrictos a x es a lo sumo $7n/10 + 5$

Como consecuencia, la **segunda recursión** es sobre un arreglo de tamaño menor o igual a $\lceil 7n/10 \rceil + 5$

La **primera recursión** (para calcular la mediana de las medianas) es siempre sobre un arreglo de tamaño $\lceil n/5 \rceil$

Análisis de peor caso (3 de 4)

Por razones que serán claras en breves, elegimos $N = 140$ (se pueden usar otros valores)

Asumiendo que $T(n)$ es una función monotonamente creciente, obtenemos

$$T(n) \leq \begin{cases} O(1) & \text{si } n < 140 \\ T(\lceil n/5 \rceil) + T(\lceil 7n/10 \rceil + 5) + O(n) & \text{si } n \geq 140 \end{cases}$$

donde el término $O(n)$ contabiliza todos los tiempos excepto las dos recursiones

Análisis de peor caso (4 de 4)

Para terminar mostraremos $T(n) \leq cn$ para una constante c

Sea c una constante suficientemente grande tal que $T(n) \leq cn$ para todo $n < 140$, y a la constante para el término $O(n)$ para todo $n > 0$

$$\begin{aligned} T(n) &\leq T(\lceil n/5 \rceil) + T(\lceil 7n/10 \rceil + 5) + O(n) \\ &\leq c\lceil n/5 \rceil + c(\lceil 7n/10 \rceil + 5) + an \\ &\leq c(n/5 + 1) + c(7n/10 + 6) + an \\ &= c(9n/10 + 7) + an \\ &= cn - (cn/10 - 7c - an) \end{aligned}$$

Para $n \geq 140$ y $c \geq 20a$, se verifica $cn/10 - 7c - an \geq 0$ y entonces $T(n) \leq cn$ para todo n \square

Observaciones finales

Randomized-Select es un algoritmo simple pero su análisis es complejo

Select es un algoritmo complejo pero su análisis es más simple

Resumen

- Sin asumir nada particular sobre los elementos, podemos hacer selección en tiempo lineal sin necesidad de ordenar los elementos
- **Randomized-Select** es un algoritmo randomizado que corre en tiempo esperado lineal para cualquier entrada (de elementos distintos)
- La contraparte determinista es el algoritmo **Select** que corre en tiempo lineal (para elementos distintos)
- En la práctica, **Randomized-Select** tienen mejor desempeño que **Select**

Ejercicios (1 de 3)

1. Escriba el pseudocódigo de **Minimum(A, p, r)**
2. (9.2-1) Muestre que **Randomized-Select** no hace recursión sobre arreglos de tamaño 0
3. (9.2-3) Escriba una versión iterativa de **Randomized-Select**
4. **Randomized-Select** asume que todos los elementos son distintos para ofrecer una garantía de tiempo lineal esperado. Modifique el algoritmo para que corra en tiempo lineal esperado aún cuando existan elementos repetidos. (**Ayuda:** defina una rutina de partición que devuelve dos índices i y j tal que todos los elementos entre i y j son iguales)
5. Escriba el pseudocódigo de **Partition-With-Pivot(A, p, r, x)**

Ejercicios (2 de 3)

6. (9.3-1) ¿Se mantendrá el tiempo lineal si cambiamos **Select** para que divida la entrada en grupos de 7 elementos en lugar de 5 elementos?
¿Que sucede si dividimos la entrada en grupos de 3 elementos?
7. (9.3-2) Muestre que cuando $n \geq 140$, al menos $\lceil n/4 \rceil$ elementos son menores a la mediana de medianas x y al menos $\lceil n/4 \rceil$ son mayores a x
8. (9.3-3) De una versión determinística de **Quicksort** que corra en tiempo $O(n \log n)$ en el peor caso, asumiendo elementos distintos
9. Modifique **Select** para que trabaje en tiempo lineal aún cuando existan elementos repetidos

Ejercicios (3 de 3)

10. (9.3-5) Suponga que tiene a su disposición una rutina **Median(A, p, r)** que calcula la mediana de $A[p \dots r]$ en tiempo lineal. De un **algoritmo simple** de selección para calcular el i -ésimo elemento en tiempo lineal
11. (9.3-6) Los k -ésimos cuantiles de un conjunto de n elementos son $k - 1$ elementos que dividen al conjunto en k partes de igual tamaño (o con diferencias de tamaño de a lo sumo 1 elemento). Describa un algoritmo que corra en tiempo $O(n \log k)$ en el peor caso para calcular los k -ésimos cuantiles de un conjunto de n elementos
12. (9.3-8) Sean $X[1 \dots n]$ y $Y[1 \dots n]$ dos arreglos ordenados de n elementos cada uno. Asumiendo que los $2n$ elementos son distintos, describa un algoritmo que corra en tiempo $O(\log n)$ para encontrar la mediana de los $2n$ elementos