Técnicas de Projeto (Parte 2)
Projeto e Análise de Algoritmo

Felipe Cunha

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Técnicas de Projeto

1) Divisão e Conquista

Divisão e Conquista

- Consiste em dividir o problema em partes menores, encontrar soluções para essas partes (supostamente mais fá cil), e combina-las em uma solução global.
  - Geralmente leva a soluções eficientes e elegantes, principalmente se forem recursivas.

- Basicamente essa técnica consiste das seguintes fases (executadas nesta ordem):
  - Divisão (particionamento) do problema original em sub-problemas similares ao original mas que são menores em tamanho;
  - Resolução de cada sub-problema sucessivamente e independentemente (em geral de forma recursiva);
  - Combinação das soluções individuais em uma solução global para todo o problema.

Divisão e Conquista

- Um algoritmo de “divisão e conquista” é normalmente relacionado a uma equação de recorrência que contém termos referentes ao próprio problema.

$$T(n) = aT(\frac{n}{b}) + f(n)$$

onde a indica o número de sub-problemas gerados, b o tamanho de cada um deles e f(n) o custo para fazer a divisão.

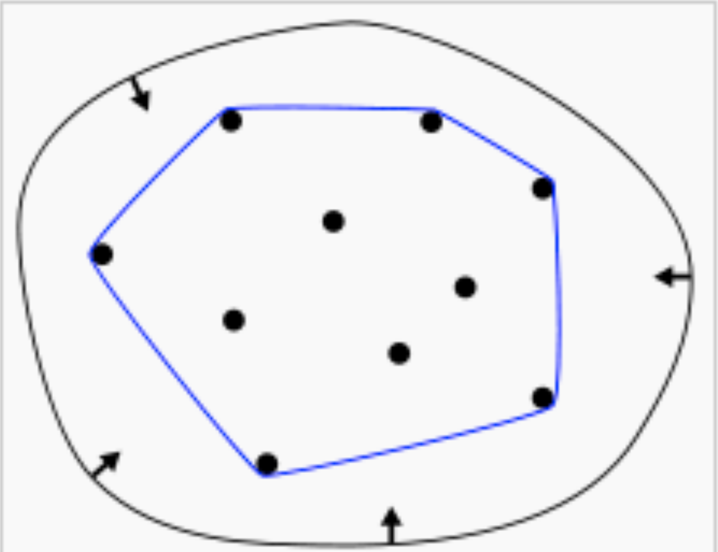
Divisão e Conquista

- Paradigma bastante usado em Ciência da Computação em problemas como:
  - Ordenação: Mergesort, Quicksort (Tecnicamente falando, o Quicksort poderia ser chamado de um algoritmo conquista e divisão);
  - Pesquisa: Pesquisa Binária;
  - Algoritmos aritméticos: multiplicação de inteiros, multiplicação de matrizes,
  - FFT (*Fast Fourier Transform*);
  - Algoritmos geométricos: Convex Hull, Par mais próximo;
  - ...

Convex Hull

- É o menor polígono formado pelas linhas limítrofes de uma rede de Delaunay, capaz de conter todos os v értices dessa rede.

- Para *objetos planos*, isto é, restritos ao plano, a envoltória convexa pode ser facilmente visualizada de uma tira elástica que ao ser esticada envolva todo o objeto dado, quando ela é solta, ela assumirá a forma requerida da envoltória convexa.



O invólucro convexo do conjunto dos pontos assinalados é a região limitada pela linha azul.

Convex Hull

- **Gift wrapping** aka **Jarvis march** — $O(nh)$
  One of the simplest (although not the most time efficient in the worst case) planar algorithms. Discovered independently by Chand & Kapur in 1970 and R. A. Jarvis in 1973. It has $O(nh)$ time complexity, where n is the number of points in the set, and h is the number of points in the hull. In the worst case the complexity is $\Theta(n^2)$.
- **Graham scan** — $O(n \log n)$
  A slightly more sophisticated, but much more efficient algorithm, published by Ronald Graham in 1972. If the points are already sorted by one of the coordinates or by the angle to a fixed vector, then the algorithm takes $O(n)$ time.
- **QuickHull**
  Discovered independently in 1977 by W. Eddy and in 1978 by A. Bykat. Just like the quicksort algorithm, it has the expected time complexity of $O(n \log n)$, but may degenerate to $\Theta(nh) = O(n^2)$ in the worst case.
- **Divide and conquer** — $O(n \log n)$
  Another $O(n \log n)$ algorithm, published in 1977 by Preparata and Hong. This algorithm is also applicable to the three dimensional case.
- **Monotone chain** aka **Andrew's algorithm**— $O(n \log n)$
  Published in 1979 by A. M. Andrew. The algorithm can be seen as a variant of Graham scan which sorts the points lexicographically by their coordinates. When the input is already sorted, the algorithm takes $O(n)$ time.
- **Incremental convex hull algorithm** — $O(n \log n)$
  Published in 1984 by Michael Kallay.

Convex Hull

Exemplo: Max/Min

- Seja A um vetor de inteiros, A[1..n], $n \geq 1$ que não está ordenado.

- Pede-se:
  – Determine o maior e o menor elementos desse vetor usando divisão e conquista;
  – Determine o custo (número de comparações) para achar esses dois elementos supondo que A possui n elementos.

Exemplo: Max/Min

Cada chamada de MaxMin4 atribui às variáveis *Max* e *Min* o maior e o menor elementos em $A[Linf]..A[Lsup]$.

```
MAXMIN4(Linf, Lsup, Max, Min)
    ▷ Variáveis auxiliares: Max1, Max2, Min1, Min2, Meio
    if (Lsup − Linf) ≤ 1                                ▷ Condição da parada recursiva
      then if A[Linf] < A[Lsup]
              then Max ← A[Lsup]
                   Min ← A[Linf]
              else Max ← A[Linf]
                   Min ← A[Lsup]
      else Meio ← ⌊(Linf+Lsup)/2⌋          ▷ Acha o menor e maior elementos de cada partição
           MAXMIN4(Linf, Meio, Max1, Min1)
           MAXMIN4(Meio+1, Lsup, Max2, Min2)
           if Max1 > Max2
              then Max ← Max1
              else Max ← Max2
           if Min1 < Min2
              then Min ← Min1
              else Min ← Min2
```

Exemplo: Max/Min

- Análise:

Seja $f(n)$ o número de comparações entre os elementos de A, que possui n elementos.

$$\begin{aligned} f(n) &= 1, && \text{para } n \leq 2, \\ f(n) &= f(\lfloor n/2 \rfloor) + f(\lceil n/2 \rceil) + 2, && \text{para } n > 2. \end{aligned}$$

Quando $n = 2^i$ para algum inteiro positivo i, temos que:

$$f(n) = 2f(\tfrac{n}{2}) + 2$$

Exemplo: Max/Min

- Análise:

Resolvendo esta equação de recorrência (em função de n e i), temos:

$$\begin{array}{rcl} f(n) & = & 2f(\frac{n}{2}) + 2 \\ 2f(\frac{n}{2}) & = & 2^2 f(\frac{n}{2^2}) + 2^2 \\ 2^2 f(\frac{n}{2^2}) & = & 2^3 f(\frac{n}{2^3}) + 2^3 \\ & \vdots & \\ 2^{i-3} f(\frac{n}{2^{i-3}}) & = & 2^{i-2} f(\frac{n}{2^{i-2}}) + 2^{i-2} \\ 2^{i-2} f(\frac{n}{2^{i-2}}) & = & 2^{i-1} f(\frac{n}{2^{i-1}}) + 2^{i-1} \\ & = & 2^{i-1} f(2) + 2^{i-1} \\ & = & 2^{i-1} + 2^{i-1} \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} f(2^i) & = & 2f(2^{i-1}) + 2 \\ 2f(2^{i-1}) & = & 2^2 f(2^{i-2}) + 2^2 \\ 2^2 f(2^{i-2}) & = & 2^3 f(2^{i-3}) + 2^3 \\ & \vdots & \\ 2^{i-3} f(2^3) & = & 2^{i-2} f(2^2) + 2^{i-2} \\ 2^{i-2} f(2^2) & = & 2^{i-1} f(2^1) + 2^{i-1} \\ & = & 2^{i-1} f(2) + 2^{i-1} \\ & = & 2^{i-1} + 2^{i-1} \end{array}$$

Fazendo a expansão desta equação temos:

$$\begin{array}{rcl} 2^{i-2} f(2^2) & = & 2^{i-1} + 2^{i-1} \\ 2^{i-3} f(2^3) & = & 2^{i-1} + 2^{i-1} + 2^{i-2} \\ & \vdots & \\ 2^2 f(2^{i-2}) + 2^2 & = & 2^{i-1} + 2^{i-1} + 2^{i-2} + \ldots + 2^3 \\ 2f(2^{i-1}) + 2 & = & 2^{i-1} + 2^{i-1} + 2^{i-2} + \ldots + 2^3 + 2^2 \\ f(2^i) & = & 2^{i-1} + 2^{i-1} + 2^{i-2} + \ldots + 2^3 + 2^2 + 2 \\ & = & 2^{i-1} + \sum_{k=1}^{i-1} 2^k = 2^{i-1} + 2^i - 2 \\ f(n) & = & \frac{n}{2} + n - 2 = \frac{3n}{2} - 2. \end{array}$$

Logo, $f(n) = 3n/2 - 2$ para o melhor caso, pior caso e caso médio.

Exemplo: Max/Min

- Conforme mostrado anteriormente, o algoritmo apresentado neste exemplo é **ótimo**.
- Entretanto, ele pode ser pior do que os já apresentados, pois, a cada chamada recursiva, salva *Linf*, *Lsup*, *Max* e *Min*, al ém do endereço de retorno da chamada para o procedimento.
- Além disso, uma comparação adicional é necessária a cada chamada recursiva para verificar se $Lsup - Linf \leq 1$ (condição de parada).
- O valor de $n + 1$ deve ser menor do que a metade do maior inteiro que pode ser representado pelo compilador, para não provocar *overflow* na operação $Linf + Lsup$.

Exemplo: Exponenciação

Problema: Calcular a^n, para todo real a e inteiro $n \geq 0$.

Primeira solução (incremental):

- Caso base: n = 0; $a^0 = 1$.
- Hipótese de indução: Suponha que, para qualquer inteiro $k < n$ e real a, sei calcular a^k.
- Passo da indução: Queremos provar que conseguimos calcular a^k, para $k=n$. Por hipótese de indução, sei calcular a^{n-1}. Então, calculo a^n multiplicando a^{n-1} por a.

Exemplo: Exponenciação

```
Exponenciação(a, n)
   se n = 0 então retorne(1)
   senão an:=Exponenciação(a, n - 1)
   an := an * a
   retorne(an)
```

Análise:

Vamos agora projetar um algoritmo para o problema usando o método de divisão e conquista.

Exemplo: Exponenciação

ExponenciaçãoDC(a, n)

```
se n = 0 então retorne(1)
senão
    an := ExponenciaçãoDC(a, n/2)
    an := an * an
    se (n mod 2) = 1 an := an * a
retorne(an)
```

Análise:

Colocar 2 condições de contorno: n=0, n=1

Exemplo: Busca Binária

```
BuscaBinaria(A, e, d, x)
Entrada: Vetor A, delimitadores e e d do subvetor e
x.
Saída: Indice 1 ≤ i ≤ n tal que A[i ] = x ou i = 0.

      se e = d então
      se A[e] = x então retorne(e) senão retorne(-1)
      senão
        i := (e + d)/2
        se A[i ] = x então retorne(i)
        senão se A[i ] > x
        i := BuscaBinaria(A, e, i − 1, x)
      senão
        i := BuscaBinaria(A, i + 1, d, x)
      retorne(i)
```

Exemplo: Busca Binária

- Análise:

- Caso médio:
  - Cada elemento tem probabilidade 1/n de ser o valor procurado.
  - Usar uma árvore para análise.

Exercícios:

- Proponha versões não recursivas para os exemplos acima. A eliminação da recursividade altera a complexidade das soluções?

Exemplo: QuickSort

- Algoritmo de ordenação baseado na estratégia de Dividir e Conquistar
- Em contraste ao Mergesort, no Quicksort é a operação de divisão a mais custosa: depois de escolhemos o *pivot*, temos que separar os elementos do vetor maiores que o *pivot* dos menores que o *pivot*.

Exemplo: QuickSort

- Conseguimos fazer essa divisão com $\Theta(n)$ operações: basta varrer o vetor com dois apontadores, um varrendo da direita para a esquerda e outro da esquerda para a direita, em busca de elementos situados na parte errada do vetor, e trocar um par de elementos de lugar quando encontrado.

- Após essa etapa, basta ordenarmos os dois trechos do vetor recursivamente para obtermos o vetor ordenado, ou seja, a conquista é imediata.

Exemplo: QuickSort

```
Quicksort(A, esq, dir)
// Entrada: Vetor A de inteiros e os índices esq e dir que delimitam início e
fim do subvetor a ser ordenado.
//Saída: Subvetor de A de esq a dir ordenado.

início
   i=esq
   j=dir
   pivô=A[dir]
   repita
      enquanto (A[i] < pivo) faça i= i + 1
      enquanto (A[j] > pivo) faça j= j – 1
      se (i <= j) então
         troca (A[i], A[j])
         i = i + 1
         j = j – 1
   até_que (i > j)
   se (j > esq) então QuickSort(A, esq, j)
   se (i < dir) então QuickSort(A, i, dir)
fim
```

Exemplo: Quicksort

- **Análise do pior caso:**
- Quantas comparações e quantas trocas o algoritmo Quicksort executa no pior caso?
- Certamente a operação de divisão tem complexidade $\Theta(n)$, mas o tamanho dos dois subproblemas depende do pivot escolhido.
- No pior caso, cada divisão sucessiva do Quicksort separa um único elemento dos demais, recaindo na recorrência:
  - » $T(n) = 0, n = 1$
  - » $T(n) = T(n - 1) + n, n > 1,$
- Portanto, $\Theta(n^2)$ comparações e trocas são executadas no pior caso.
- Então, o algoritmo Quicksort é assintoticamente menos eficiente que o Mergesort no pior caso.
- Veremos que, no caso médio, o Quicksort efetua $\Theta(n \log n)$ comparações e trocas.
- Assim, na prática, o Quicksort é bastante eficiente, com uma vantagem adicional em relação ao Mergesort: é in place, isto é, não utiliza um vetor auxiliar.

Exemplo: Quicksort

- **Análise do caso médio:**
- Considere que *i* é o índice da posição do *pivot* escolhido no vetor ordenado.
- Supondo que qualquer elemento do vetor tem igual probabilidade de ser escolhido como o *pivot*
- Então, na média, o tamanho dos subproblemas resolvidos em cada divisão sucessiva será (n>=2):

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T(i-1)+T(n-i))$$

Exemplo: Quicksort

- Supondo T(0)=0, Não é difícil ver que:

$$\sum_{i=1}^{n} T(i-1) = \sum_{i=1}^{n} T(n-i) = \sum_{i=1}^{n-1} T(i)$$

- Assim, no caso médio, o número de operações efetuadas pelo Quicksort é dado pela recorrência:

$$T(n) = \begin{cases} 0, n < 2 \\ \frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n-1} T(i) + n - 1, n \geq 2 \end{cases}$$

- Esta recorrência é Θ(n log n). Portanto, na média, o Quicksort executa Θ(n log n) trocas e comparações.

Considerações Finais

- Este paradigma não é aplicado apenas a problemas recursivos.

- Existem pelo menos três cenários onde divisão e conquista é aplicado:
  1. Processar independentemente partes do conjunto de dados.
     – Exemplo: Mergesort.
  2. Eliminar partes do conjunto de dados a serem examinados.
     – Exemplo: Pesquisa binária.
  3. Processar separadamente partes do conjunto de dados mas onde a solução de uma parte influencia no resultado da outra.
     – Exemplo: Somador apresentado.

Considerações Finais

- O projeto de algoritmos, é importante procurar sempre manter o **balanceamento** na sub-divisão de um problema em partes menores.

- Divisão e conquista não é a única técnica em que balanceamento é útil.

- Exemplo:
  - Pior caso do quicksort.