

# Analisi e Progetto di Algoritmi

UniShare

Davide Cozzi

@dlcgold

Gabriele De Rosa

@derogab

Federica Di Lauro

@f\_dila

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Introduzione al corso</b>	<b>3</b>
2.1	Argomenti . . . . .	3
2.2	Ripasso Algoritmi 1 . . . . .	4
2.2.1	Equazioni di Ricorrenza . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Programmazione Dinamica</b>	<b>9</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

Questi appunti sono presi a lezione. Per quanto sia stata fatta una revisione è altamente probabile (praticamente certo) che possano contenere errori, sia di stampa che di vero e proprio contenuto. Per eventuali proposte di correzione effettuare una pull request. Link: <https://github.com/dlccgold/Appunti>.

Grazie mille e buono studio!

# Capitolo 2

## Introduzione al corso

### 2.1 Argomenti

Si hanno diversi tipi di problemi:

- **problemi di ottimo** dove si cercano singole soluzioni efficienti (massimi o minimi) tra molte soluzioni possibili. Si usa anche la **programmazione greedy**, dove si sceglie in base ai costi locali per ottenere massimi e minimi senza però guardare i costi complessivi.
- **problemi non risolubili in tempi accettabili**, per i quali si usa la **programmazione dinamica**, che cerca di individuare sotto-strutture ottime per risolvere il problema, cercando la soluzione migliore memorizzando le altre soluzioni e utilizzandole. Si cerca comunque la soluzione meno dispendiosa in termini di tempo.
- **problemi NP-completi**, ovvero problemi per cui non si può trovare un algoritmo o non si può trovare un algoritmo con una complessità asintotica polinomiale. Si useranno anche tecniche non deterministiche. Si cercherà di studiare uno dei 10 problemi più difficili della matematica:  $P \subseteq NP$ ?

Studieremo poi i grafi non pesati con gli algoritmi *BFS* (per cercare in ampiezza) e *DFS* (per cercare in profondità). Studieremo anche i grafi pesati con problemi di cammino minimo.

## 2.2 Ripasso Algoritmi 1

Innanzitutto due algoritmi con lo stesso scopo si possono confrontare in base a tempo e spazio, scegliendo anche in base alle esigenze hardware. Per lo spazio si calcola quanto spazio viene richiesto da variabili e strutture dati, soprattutto queste ultime che dipendono dalla dimensione dell'input. Per quanto riguarda il tempo si usano le tecniche di conto soprattutto basate sui cicli e, in generale, su tutte operazioni da effettuare. Il tempo si basa sull'input  $n$  e si indica con  $T(n)$  e si esprime in forma asintotica, interessandoci quindi unicamente all'ordine di grandezza. Si hanno il caso peggiore, indicato con l'O-grande e quello migliore indicato con l'o-piccolo a seconda di  $n$ .

Si ricorda poi la tecnica della ricorsione con algoritmi che si muovono su se stessi mediante dei "passi" arrivando ad un caso base di uscita. Per calcolare i tempi di un algoritmo ricorsivo si ha  $T(n) = F(n) + T(n - 1)$  con  $F$  che rappresenta le istruzioni delle subroutines. Questa equazione di ricorrenza non è facilmente calcolabile ma può essere espansa muovendosi sui passi fino a che non si arriva a qualcosa di calcolabile grazie al caso 0, questo è il metodo iterativo (anche se si ha anche il metodo per sostituzione). Per gli algoritmi ricorsivi si hanno anche i divide et impera (dove il problema  $P$  è diviso in sottoproblemi risolti separatamente, con la divide, e poi combinati alla fine, con la combina) dove i tempi non sono sempre calcolabili ma se lo sono si usa il metodo dell'esperto (studiando le tre possibili casistiche).

### 2.2.1 Equazioni di Ricorrenza

Le equazioni di ricorrenza hanno solitamente la seguente forma:

$$\begin{cases} T(n) = T(n - 1) + f(n) \\ T(1) = \Theta(1) \end{cases}$$

Esistono tre metodi per risolvere le equazioni di ricorrenza:

- Iterativo (detto anche Albero di ricorsione)
- Sostituzione
- Esperto (detto anche Principale)

**Metodo Iterativo**

Si può usare sia per algoritmi ricorsivi e per Divide et Impera. Ad ogni passo si prende il valore a destra dell'uguaglianza e lo si sostituisce, arrivando, dopo  $k$  passi ad una formula generale. Sempre  $k$  ci darà il caso base. Posso rappresentare questo metodo con l'albero delle chiamate ricorsive, guardando quanto è alto l'albero e quanto impiega ad ogni livello

**Esempio 1.** *Calcolo i tempi di:*

$$\begin{cases} T(N) = T(n-1) + 8 \\ T(1) = 6 \end{cases}$$

*procedo nella seguente maniera:*

$$\begin{aligned} T(n) &= T(n-1) + 8 = [T(n-2) + 8] + 8 = T(n-2) + 2 \cdot 8 \\ &= [T(n-3) + 8] + 2 \cdot 8 = T(n-3) + 3 \cdot 8 \\ &= [T(n-4) + 8] + 3 \cdot 8 = T(n-4) + 4 \cdot 8 \\ &= T(n-k) + k \cdot 8 \end{aligned}$$

*per  $k = n - 1$  si ha:*

$$T[n - (n - 1)] + (n - 1) \cdot 8 = T(1) + (n - 1) \cdot 8 = 6 + (n - 1) \cdot 8 = \Theta(n)$$

*Altri esempi su sito e appunti di Chiodini*

**Metodo per Sostituzione**

Si ipotizza un tempo di calcolo (si possono usare gli asintotici con  $O$  e  $\Omega$  lo si dimostra per induzione

**Esempio 2.**

$$\begin{cases} T(n) = 2 \cdot T\left(\frac{n}{2}\right) + n & n > 1 \\ T(1) & n = 1 \end{cases}$$

*Ipotizzo  $O(n \cdot \log n)$  e dimostro per induzione:*

$$T(n) = O(n \cdot \log n) \leq c \cdot n \cdot \log n$$

*Serve una dimostrazione forte: ipotizzo  $T(m)$  vera per  $1 \leq m \leq n - 1$  quindi si ha:*

$$\begin{aligned} T(n) &= 2 \cdot T\left(\frac{n}{2}\right) + n \leq 2 \cdot \left[c \cdot \frac{n}{2} \cdot \log \frac{n}{2}\right] + n \\ &= c \cdot n \cdot \log \frac{n}{2} + n = c \cdot n \cdot (\log_2 n - \log_2 2) + n \\ &= c \cdot n \cdot \log_2 n - c \cdot n + n \leq c \cdot n \cdot \log n \text{ se } c \geq 1 \end{aligned}$$

*Analizzo ora il caso base:*

$T(1) = 1$  quindi voglio  $1 \leq c \cdot \log_2 1$  ovvero  $1 \leq c \cdot 0$  ovvero mai. testo fino a che non trovo  $T(3) = 2 \cdot T(1) + 3 = 2 \cdot 1 + 3 = 5$  che mi va bene, infatti  $5 \leq c \cdot 3 \cdot \log_2 3$

### Metodo dell'Esperto

Posso usare questo metodo solo nel caso di un'equazione di ricorrenza di questo tipo:

$$\begin{cases} T(n) = a \cdot T\left(\frac{n}{b}\right) + f(n) \\ T(1) = \Theta(1) \end{cases}$$

dove:

- $a \cdot T\left(\frac{n}{b}\right)$  è l'Impera ed è  $\sim n^{\log_b a}$
- $f(n)$  è il divide e il combina (ovvero la parte iterativa)

Si definiscono tre casi:

- **caso 1:**  $n^{\log_b a} > f(n)$  quindi  $T(n) \sim n^{\log_b a}$ . Si hanno le seguenti condizioni necessarie:  $f(n) = O(n^{\log_b a - \epsilon})$  (con  $\epsilon > 0$ ) e quindi  $T(n) = \Theta(n^{\log_b a - \epsilon})$
- **caso 2:**  $n^{\log_b a} \cong f(n)$  quindi  $T(n) \sim f(n) \cdot \log n$ . Si hanno le seguenti condizioni necessarie  $f(n) = \Theta(n^{\log_b a})$  e quindi  $T(n) = \Theta(n^{\log_b a})$
- **caso 3:**  $n^{\log_b a} < f(n)$  quindi  $T(n) \sim f(n)$ . Si hanno le seguenti condizioni necessarie:  $f(n) = \Omega(n^{\log_b a + \epsilon})$  (con  $\epsilon > 0$ ) e  $a \cdot f\left(\frac{n}{b}\right) \leq k \cdot f(n)$  (con  $k < 1$ ) quindi  $T(n) = \Theta(f(n))$

**Esempio 3.** *Risolve:*

$$T(n) = 9 \cdot T\left(\frac{n}{3}\right) + n$$

*Si ha:  $f(n) = n$ ,  $a = 9$  e  $b = 3$ .*

*Ho che  $n^{\log_3 9} = n^2$  quindi ho il primo caso:*

*$f(n) = O(n^{\log_b a - \epsilon}) = O(n^{2 - \epsilon})$  Posso dire che  $\exists \epsilon : O(n^{2 - \epsilon}) = n$ ?*

*Si  $\forall \epsilon < 1$ , per esempio  $\epsilon = \frac{1}{2}$ . Quindi il Metodo dell'esperto è applicabile (nel primo caso) e si ha quindi  $T(n) = \Theta(n)$*

**Esempio 4.** *Si può analizzare meglio il MergeSort:*

$$T(n) \cong 2 \cdot T\left(\frac{n}{2}\right) + \Theta(n)$$

*Si ha:  $f(n) = \Theta(n)$  e  $n^{\log_b a} = n^{\log_2 2} = n$*

*Posso applicare il Metodo dell'esperto nel secondo caso avendo così:*

$$T(n) = \Theta(n \cdot \log n)$$

**Esempio 5.**

$$T(n) = 3 \cdot T\left(\frac{n}{4}\right) + n \cdot \log n$$

*Si ha:  $f(n) = n \cdot \log n$  e  $n^{\log_b a} = n^{\log_4 3}$  e siamo nel terzo caso:*

$$f(n) = \Omega(n^{\log_4 3 + \epsilon})$$

*se pongo  $\epsilon = 1 - \log_4 3$  ottengo  $n$ . Il terzo caso richiede una doppia verifica:*

$$3 \cdot \frac{n}{4} \cdot \log \frac{n}{4} \leq k \cdot n \log n$$

*che vale per  $k = \frac{3}{4}$  infatti si ha:*

$$\frac{3}{4} \cdot n \cdot \log \frac{n}{4} \leq \frac{3}{4} \cdot n \cdot \log n$$

*Si hanno quindi entrambi i requisiti e si può asserire che  $T(n) = \Theta(n \cdot \log n)$*

**Esempio 6.** *Calcolo i tempi di:*

$$T(n) = 2 \cdot T\left(\frac{n}{2}\right) + n \cdot \log n$$

*Si ha:  $n^{\log_b a} = n^{\log_2 2} = n$  e  $f(n) = n \cdot \log n$ . Provo a procedere col terzo caso, dimostrando che:*

$$n \cdot \log n = \Omega(n^{\log_b a + \epsilon}) = \Omega(n^{1+\epsilon}) = \Omega(n \cdot n^\epsilon)$$

*Ma tale  $\epsilon$  non esiste in quanto  $n^\epsilon > \log n$  infatti:*

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \cdot \log n}{n \cdot n^\epsilon} = 0, \quad \forall \epsilon > 0$$

*Bisogna quindi applicare un altro metodo per risolvere l'equazione di ricorrenza*



**Esempio 7.** *Calcolo la seguente equazione di ricorrenza:*

$$\begin{cases} T(n) = 1 & n = 1 \\ T(n) = 2 \cdot T(\frac{n}{2}) + 1 & n > 1 \end{cases}$$

*Quindi avrò un albero binario di soli 1 di profondità  $2^k$ . Quindi  $T(n) = \sum_{i=0}^k 2^i = 2^{k+1} - 1$  con  $k = \log n$  in quanto si avranno in totale  $n = 2^k = 2 \cdot 2^k - 1$ . Quindi ottengo  $2n - 1$  quindi avrò  $\Theta(n)$ .*

Abbiamo poi visto alcune strutture dati: *array*, *list*, *stack*, *queue*, *tree* (e *binary-tree*) e *heap*.

## Capitolo 3

# Programmazione Dinamica

Partiamo dall'algoritmo che calcola la lista di Fibonacci:

```
function FIB(n)  
  if n = 1 then  
    return n  
  else  
    return FIB(n - 1) + FIB(n - 2)  
  end if  
end function
```

Si vede che non sappiamo calcolarne la complessità, che non è polinomiale ma magari esponenziale o addirittura fattoriale.

Sia  $T(n)$  il costo della chiamata alla funzione. Se  $n = 0$  o  $n = 1$  ho  $T(n) = 1$ . Andando avanti avrò  $T(n) = 1 + T(n - 1) + T(n - 2)$  che non è risolvibile con le tecniche che conosciamo. Vediamo come risolverla: riscriviamo l'equazione non omogenea:

$$T(n) - T(n - 1) - T(n - 2) = 1$$

e facciamo una piccola approssimazione:

$$T(n) - T(n - 1) - T(n - 2) = 0$$

ottenendo un'equazione lineare omogenea a cui sommerò qualcosa per ottenere il risultato della non omogenea. Quindi risolvo l'omogenea ipotizzando un valore per  $T(n)$ , per esempio  $T(n) = r^n$ , e testiamolo, diventa:

$$r^n - r^{n-1} - r^{n-2} = 0$$

moltiplico da entrambe le parti per  $r^2$  perché posso:

$$r^2 \cdot r^n - r \cdot r^n - r^n = 0$$

$$r^2 - r - 1 = 0$$

che è un'equazione di secondo grado con soluzioni  $r = \frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}$  Quindi

$$T(n) - T(n-1) - T(n-2) = 0$$

ha due soluzioni:

$$C_1 \left( \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^n$$
$$C_2 \left( \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^n$$

quindi:

$$T_0(n) = C_1 \left( \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^n + C_2 \left( \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^n$$

Ora cerco la soluzione particolare, sostituisco in:

$$T(n) - T(n-1) - T(n-2) = 1$$

Tutte le  $T(\cdot)$  con  $k$  ottenendo  $k - k - k = 1 \rightarrow k = -1$ .

Quindi la soluzione finale è:

$$T(n) = C_1 \left( \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^n + C_2 \left( \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^n - 1 = \Theta \left( \left( \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^n \right)$$

*che è la sezione aurea*

Miglioriamo l'algoritmo introducendo un array di  $n$  celle  $F$ , inizializzarlo

```
F[1...n]
for i ← 1 to n do
  F[i] ← empty
end for
```

e procedere con la ricorsione con annotazione, che scrive i vari step su un array (spreca quindi memoria) e modificando fibonacci per ottenere la versione con annotazione:

```
function FIBANN(n)  
  if f[i] == empty then  
    if n ≤ 1 then  
      F[n] ← n  
    else  
      F[n] = FIBANN(n − 1) + FIBANN(n − 2)  
    end if  
    return F[n]  
  end if  
end function
```

Quindi se si richiede qualcosa di già usato lo si ritorna prendendolo dall'array.

Iterativamente sarebbe:

```
function FIBIT(n)  
  F[0] ← 0  
  F[1] ← 1  
  for i ← 2 to n do  
    F[i] ← F[i − 1] + F[i − 2]  
  end for  
  return F[n]  
end function
```

### Un Nuovo Problema

da fare a casa