

# ASD - Algoritmi e Strutture Dati

Elia Ronchetti

@ulerich

2022/2023

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione algoritmi</b>	<b>6</b>
1.1	Che cos'è un algoritmo? . . . . .	6
1.2	Analisi di un algoritmo . . . . .	6
1.3	Regole sullo Pseudocodice . . . . .	7
1.4	Esame . . . . .	8
1.5	Definizioni di base . . . . .	8
1.6	Ricerca Sequenziale . . . . .	9
1.6.1	Cosa devo identificare . . . . .	9
1.6.2	Caso medio . . . . .	11
1.7	Ricerca binaria (o dicotomica) . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Calcolo tempo di esecuzione algoritmi</b>	<b>15</b>
2.1	Selection Sort . . . . .	15
2.1.1	Implementazione . . . . .	17
2.1.2	Tempi d'esecuzione, caso migliore e peggiore . . . . .	18
2.1.3	Confronto tra Selection e Insertion sort . . . . .	19
2.2	Nozioni per rappresentare i tempi di esecuzione . . . . .	19
2.2.1	Limiti asintotici . . . . .	20
2.2.2	Proprietà . . . . .	20
2.3	Esercizio ricerca elementi V2 in V1 . . . . .	21
2.3.1	Implementazione . . . . .	21
2.4	Riassunto ordini di grandezza . . . . .	23
2.5	Somma di due valori costituiti da bit . . . . .	23
2.5.1	Implementazione . . . . .	24
2.5.2	Calcolo tempo . . . . .	25
2.6	Esercizio - Calcolo tempo codice già scritto . . . . .	26
2.6.1	Calcolo tempo istruzioni . . . . .	26
2.6.2	Miglioramento Algoritmo . . . . .	27
2.7	Esercizio for innestati . . . . .	27
2.7.1	Calcolo tempo . . . . .	27
2.7.2	Quando usare le sommatorie . . . . .	30

2.7.3	Note per l'esame per le approssimazioni . . . . .	30
2.8	Esercizio - Verifica se la matrice data è simmetrica . . . . .	30
2.8.1	Come interrompo un ciclo? . . . . .	32

### **3 Ricorsione 33**

3.1	Fattoriale . . . . .	33
3.1.1	Iterativo . . . . .	33
3.1.2	Ricorsivo . . . . .	33
3.2	Potenza ricorsiva . . . . .	34
3.2.1	Calcolo tempo di esecuzione . . . . .	34
3.3	La ricorsione è sempre più efficiente rispetto all'iterazione? . .	34
3.4	Ricerca carattere in Array . . . . .	35
3.4.1	Implementazione . . . . .	35
3.5	Divide et Impera . . . . .	35
3.5.1	Ordinamento tramite Divide et Impera - Merge Sort . .	36
3.5.2	Esecuzione ordinamento . . . . .	36
3.5.3	Implementazione codice . . . . .	37
3.5.4	Calcolo tempo Merge Sort . . . . .	38
3.6	Metodi per calcolo tempo in algoritmi ricorsivi . . . . .	41
3.6.1	Metodo iterativo o dell'albero di ricorsione . . . . .	41
3.6.2	Metodo di sostituzione . . . . .	41
3.6.3	Teorema dell'esperto o Metodo principale . . . . .	42
3.6.4	Esempio applicazione teorema dell'esperto su MergeSort	43
3.6.5	Altro esempio . . . . .	43
3.6.6	Esercizio teorema dell'esperto . . . . .	44
3.6.7	Esercizi Divide et Impera . . . . .	44
3.7	Esercizi esame (primo parziale o prima parte completo) . . . .	44
3.8	Quick Sort . . . . .	44
3.8.1	Differenze tra Merge Sort e Quick Sort . . . . .	45
3.8.2	Logica Divide et Impera . . . . .	45
3.8.3	Simulazione esecuzione . . . . .	46
3.8.4	Implementazione . . . . .	47
3.8.5	Scelta del Pivot . . . . .	48
3.8.6	Tempi di esecuzione Partition . . . . .	48
3.8.7	Tempo di esecuzione Quicksort . . . . .	48
3.8.8	Come ridurre di molto la probabilità che si scelga un Pivot pessimo . . . . .	49
3.9	Esiste un algoritmo di ordinamento con tempo Theta n? . . .	50
3.9.1	Funzionamento . . . . .	51
3.9.2	Implementazione codice . . . . .	52
3.10	Radix sort . . . . .	53

3.10.1	Implementazione . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Strutture dati</b>	<b>54</b>
4.1	ADT . . . . .	54
4.1.1	Operazioni base della struttura dati . . . . .	54
4.2	Array . . . . .	55
4.2.1	Perchè l'Array richiede che venga data la dimensione da allocare? . . . . .	55
4.3	Liste Dinamiche . . . . .	56
4.4	Tipi di liste . . . . .	57
4.4.1	Lista dinamica semplice . . . . .	57
4.4.2	Lista dinamica doppia o doppiamente concatenata . . . . .	58
4.4.3	Liste circolari . . . . .	58
4.5	Implementazione Operazioni Lista . . . . .	58
4.5.1	Search . . . . .	58
4.5.2	Insert . . . . .	59
4.5.3	Delete . . . . .	60
4.6	Esercizi . . . . .	61
4.6.1	Data una lista in input invertirla . . . . .	61
4.6.2	Ricerca palindroma in una lista doppia . . . . .	61
4.7	Esercizi Lista ricorsivi . . . . .	62
4.7.1	Conta quante volte è presente uno specifico elemento in una lista . . . . .	62
4.7.2	Contare quante coppie di valori in posizione consecutiva sono presenti in una lista . . . . .	62
4.7.3	Ordinare una lista . . . . .	63
4.8	Stack - Pile . . . . .	63
4.8.1	Operazioni . . . . .	63
4.9	Realizzazione Stack . . . . .	64
4.9.1	Array . . . . .	64
4.9.2	Liste dinamiche . . . . .	65
4.10	Esercizi Stack . . . . .	66
4.10.1	Cancellare da uno stack un elemento k dato in input . . . . .	66
4.10.2	Scrivere un algoritmo che salva 2 stack in un array solo . . . . .	67
4.10.3	Copiare un stack S in S1 così da ottenerne 2 copie esatte dei dati, con lo stesso ordine . . . . .	68
4.10.4	Trova nello stack p un elemento k . . . . .	68
4.10.5	Verifichiamo che le parentesi di una stringa siano bilanciate (n aperte = n chiuse) . . . . .	68
4.11	Queue - Coda . . . . .	69
4.11.1	Implementazione . . . . .	70

4.11.2	Liste dinamiche . . . . .	70
4.11.3	Copia elementi da una coda Q1 a un'altra coda Q2 . . .	71
4.11.4	Implementare una coda usando due pile . . . . .	71
4.11.5	Note per esame . . . . .	72
4.12	Alberi binari . . . . .	72
4.12.1	Grafo . . . . .	72
4.12.2	Albero radicato . . . . .	72
4.12.3	Alberi binari . . . . .	72
4.13	Implementazione Albero Binario . . . . .	74
4.13.1	Stampare tutte le chiavi di un albero binario . . . . .	74
4.13.2	Alberi Binari di Ricerca . . . . .	75
4.13.3	Vantaggi Albero Binario di Ricerca . . . . .	75
4.13.4	Implementazione Ricerca . . . . .	75
4.13.5	Operazioni di Inserimento . . . . .	77
4.13.6	Cancellazione elementi da albero . . . . .	77
4.13.7	Alberi AVL . . . . .	79

# Capitolo 1

## Introduzione algoritmi

### 1.1 Che cos'è un algoritmo?

Un algoritmo è

- Una sequenza di istruzioni elementari
- Agisce su un input per produrre un output
- Risolve un problema computazionale

Un algoritmo deve essere corretto e efficiente.

**Corretto** Significa che deve funzionare per qualsiasi input valido

**Efficiente** Deve occupare il minor spazio possibile ed impiegare il minor tempo possibile.

L'efficienza di un algoritmo si misura in termini di spazio e tempo

### 1.2 Analisi di un algoritmo

Per analizzare l'efficienza di un algoritmo si calcola il numero di istruzioni eseguite, ma esso non è univoco, varia in base all'input ricevuto, è quindi necessario individuare il **caso migliore** e il **caso peggiore**, essi si analizzano a parità di dimensioni, per questo non dipendono da essa. Dire che il caso migliore è quando l'array è vuoto non ha senso ai fini dell'analisi.

Per avere un'idea dei tempi di esecuzione è necessario calcolare il **Caso Medio**

**NON è la media tra caso peggiore e caso migliore!**

## 1.3 Regole sullo Pseudocodice

Gli algoritmi saranno scritti in Pseudocodice secondo le seguenti regole

- Il codice sarà simil C/Java
- Cicli: for, while, do-while
- Condizioni: if, else
- Indentazione + begin/end
- Commenti /\*.....\*/
- Assegnamenti  $A = 5$ ,  $A := 5$ ,  $A \leftarrow 5$
- Test del valore  $A == 5$
- Variabili: locali
- Array  $A[i] \rightarrow i \rightarrow 1 \dots n$
- Gli Array partono da 1
- Dati sono considerati oggetti con attributi (come  $\text{length}(A)$  per gli array)
- Puntatori: liste dinamiche
- Funzioni/Procedure - I parametri sono passati per valore (non per indirizzo)
- Operatori booleani AND e OR sono cortocircuitati, quindi se ho a AND b valuterò prima a e se è falso non valuterò b, per OR invece se a è vero non valuterò b

**Macchina RAM (Random Access Machine)** La macchina su cui verranno eseguiti gli algoritmi sarà considerata RAM e quindi con le seguenti Caratteristiche

- Memoria ad accesso diretto
- No limiti memoria
- Sistema monoprocesso

## 1.4 Esame

L'esame sarà uno scritto con esercizi e domande di teoria. I parziali sono tendenzialmente riservati al primo anno, ma è possibile scrivere una email al prof 2 settimane prima del parziale e chiedere di poterlo sostenere anche se si è di un altro anno, sarà a sua discrezione concedere o meno questa opportunità. Si possono recuperare i parziali, è possibile anche tentare un recupero per migliorare un voto già positivo, accettando il rischio di che se il voto preso nell'esame di recupero è minore di quello originale si dovrà accettare quel voto.

## 1.5 Definizioni di base

**Algoritmo Corretto** Un algoritmo si definisce corretto se per tutti gli input si ottiene il risultato desiderato, l'algoritmo è corretto solo se garantisce la correttezza del risultato.

**Algoritmo efficiente** Minor utilizzo di **Spazio** e **Tempo**.

### Determinare l'efficienza di un algoritmo

Il primo passo è determinare il numero di istruzioni eseguite dall'algoritmo dato che così facendo non dipende dalla potenza dell'hardware e dall'input.

#### Operazioni valutazione algoritmo

1. Conto le istruzioni **eseguite**
2. Determinare  $T$  peggiore -  $T$  migliore -  $T$  medio (la media non è fra  $T$  peggiore e  $T$  migliore)

Il tempo non sarà una quantità in secondi, ma dipenderanno da un parametro  $n$   $T(n)$ .

Quando devo scegliere un algoritmo mi baso sulla funzione  $n$ , dato che al crescere dell'input la funzione crescerà in modo lineare, quadratico, cubico, ecc. e questo mi mostrerà come cresce il tempo in funzione di  $n$ .

A parità di  $n$  controllo il fattore moltiplicativo.



**Esempio** I polinomiali hanno tempi di esecuzione accettabili, mentre i tempi esponenziali sono intrattabili, il problema è che esistono algoritmi esatti, ma sono esponenziali, per questo sono inutili dato che non con grandi input non si fermano mai.

Determinare il **Caso peggiore** serve per capire quanto tempo devo aspettare al massimo, quindi dopo quanto tempo avrò sicuramente un risultato, il **Caso minore**, determina il tempo minimo che devo aspettare, il **Caso medio** determina mediamente quanto tempo devo aspettare (non è la media fra T peggiore e T migliore).

## 1.6 Ricerca Sequenziale

```

int RicSeq(int k, int v[])
1   i=1
    while v[i] != k AND i <= length(v)
        i++
1   if i <= length(v)
1/0      return(i)
    else
1/0      return(-1)

```

In questo semplice algoritmo per la ricerca sequenziale di un numero all'interno di un array ci concentreremo sulla ricerca del caso peggiore e quello migliore.

Ricordiamo che il caso peggiore e migliore si determina a parità di dimensione dell'input, non ha senso dire che il caso migliore è il vettore vuoto.

I numeri a fianco indicano il numero di volte per cui ogni operazione è eseguita. Else non viene considerato dato che non viene effettuato un controllo, quando l'if è falso rimanda alle istruzioni sotto l'else (a livello di linguaggio macchina è un'etichetta che indica al codice dove effettuare la jump nel caso in cui la condizione dell'if non fosse vera).

### 1.6.1 Cosa devo identificare

Devo identificare:

- Quando si verifica (in che condizioni)
- Il tempo di esecuzione

**Quando si verifica**

**Migliore** Indicato come **t**. Posso pensare (sempre intuitivamente) che il caso migliore è quando il numero si trova nella prima posizione del vettore. Effettivamente in questo caso il ciclo while non viene mai attuato (a parte la verifica della condizione)

**Peggior** In questo caso devo identificare per quale input la ricerca sequenziale performa peggio, intuitivamente posso pensare che il caso peggiore è quando il numero non è presente nel vettore, dato che devo scorrere tutto il vettore.

Analizzando l'esecuzione di tutte le istruzioni posso confermare la mia ipotesi.

**Importante** Non basta fare un esempio, per identificare il caso migliore e peggiore, devo descrivere (anche in forma verbale) per quali input si verifica, in questo caso abbiamo detto infatti, quando il numero non è presente oppure quando il numero si trova nella prima posizione.

**Analisi tempo di esecuzione** Il tempo di esecuzione dipende dal numero di operazioni eseguite, i tempi di esecuzioni maggiori si concentrano spesso nei cicli (for, while, do-while, ecc.), ma è comunque importante valutare tutte le istruzioni.

**Tempo di esecuzione caso migliore** Indicato con  $t(n)$  In questo caso vengono eseguite solamente 4 istruzioni

```
int RicSeq(int k, int v[])
1  i=1
1  while v[i] != k AND i <= length(v)
      i++
1  if i <= length(v)
1      return(i)
   else
0      return(-1)
```

Le quattro istruzioni con dei commenti

- $i=1$
- while (controlla una volta sola dato che trova subito che  $k = v[i]$ )
- $\text{if } i \leq \text{length}(v)$
- $\text{return}(i)$

Si tratta di una funzione costante  $t(n) = 4$ , solitamente le funzioni riguardanti i tempi di esecuzione sono in funzione di  $n$ , ma in questo specifico caso la funzione non dipende dalla dimensione dell'input, infatti se il numero è all'inizio del vettore a prescindere dalle dimensioni dell'array non dovrò mai scorrere il vettore (vedremo che non è praticamente mai così per il caso peggiore)

**Analisi esecuzione caso peggiore** Indicato con  $T(n)$

```
int RicSeq(int k, int v[])
1   i=1
n+1 while v[i] != k AND i <= length(v)
n       i++
1   if i <= length(v)
0       return(i)
    else
1       return(-1)
```

Il ciclo while viene eseguito  $n+1$  volte dato che ogni volta che incremento  $i++$ , devo verificare di non essere uscito dall'array, quindi verrà eseguito sempre una volta in più rispetto all'incremento.

Questo significa che  $T(n) = 3 + 1 + 2n = 2n + 4$  dove  $n$  è la dimensione dell'input, in questo caso la dimensione dell'array.

Questa funzione indica il numero di istruzioni eseguite (non è propriamente un tempo).

### 1.6.2 Caso medio

Indicato come  $T_m(n)$ , è il tempo medio di esecuzione, non è la media fra il caso migliore e peggiore.

In questo caso dobbiamo chiederci, cosa ci aspettiamo che succeda mediamente?

In questo caso mi aspetto che il caso medio sia che  $k$  si trovi in posizione  $\frac{n}{2}$ , quindi che sia a metà. Mi aspetto quindi che il caso medio sia il caso peggiore diviso due.

In generale il caso medio è un po' più complesso dato che richiederebbe di conoscere la distribuzione di probabilità dell'input.

$$T_m(n) = 2\frac{n}{2} + 4 = n + 4$$

**Possibile obiezione** Sto mettendo sullo stesso piano le istruzioni `if` e `while` che magari hanno più condizioni da verificare, effettivamente il `while` impiega leggermente più tempo, posso scrivere una funzione indicando con  $c$  ( $c_1, c_2, c_3, \dots$ ) il tempo di esecuzione che può avere ogni istruzioni, il problema è che la funzione diventa enorme e poco comprensibile, alla fine a me interessa capire l'ordine di grandezza di esecuzione per poter capire se l'algoritmo è efficiente e per poterlo confrontare con altri algoritmi, alla fine se confronto un algoritmo che ha come caso medio  $1000n$  con uno che ha come caso medio  $n^2$  sceglierò comunque il primo, quindi non mi interessa se alcune funzioni ci mettono un po' di più di altre.

## 1.7 Ricerca binaria (o dicotomica)

La ricerca binaria si basa sull'assunzione che l'array dato in input sia ordinato.

L'elemento da cercare viene confrontato ripetutamente con l'elemento al centro della struttura dati e, in base al risultato del confronto, viene ridotta la porzione di dati in cui si effettua la successiva ricerca. Questo processo viene ripetuto fino a quando l'elemento desiderato viene trovato o fino a quando la porzione di dati da esaminare diventa vuota.

```
int Ricerca_Binaria(int k, int v[])
    sx = 1;
    dx = length(v);
    m = (sx+dx) div 2; //divisione intera
    while (v[m] != k AND sx <= dx)
        if v[m] > k
            dx = m-1;
        else
            sx = m+1;
        m = (sx+dx) div 2;
    if sx <= dx
        return(m);
    else
        return(-1);
```

**Ricerca e analisi caso migliore** Il caso migliore è quando il numero da cercare  $k$  si trova esattamente al centro dell'array, quindi in posizione  $\frac{n}{2}$ , dato che non entra mai nel ciclo.

Verifichiamo quante volte vengono eseguite le istruzioni:

```

int Ricerca_Binaria(int k, int v[])
1  sx = 1;
1  dx = length(v);
1  m = (sx+dx) div 2; //divisione intera
1  while (v[m] != k AND sx <= dx)
      if v[m] > k
          dx = m-1;
      else
          sx = m+1;
          m = (sx+dx) div 2;
1  if sx <= dx
1      return(m);
      else
          return(-1);

```

In totale abbiamo  $t(n) = 6$  istruzioni eseguite. Anche in questo caso il valore non dipende da  $n$  perchè non dipende dalla dimensione del vettore, basta che l'elemento si trovi al centro dell'array.

**Ricerca e analisi caso peggiore** Qui il caso peggiore è quando  $k$  non è presente in  $v$ .

Verifichiamo quante volte vengono eseguite le istruzioni:

```

int Ricerca_Binaria(int k, int v[])
1  sx = 1;
1  dx = length(v);
1  m = (sx+dx) div 2; //divisione intera
tw+1 while (v[m] != k AND sx <= dx)
tw      if v[m] > k
ft          dx = m-1;
          else
ff          sx = m+1;
tw          m = (sx+dx) div 2;
1  if sx <= dx
      return(m);
      else
1      return(-1);

```

Quante volte cicla il while? Dipende dall'input!

Indichiamo questo valore con  $t_w$

Quante volte testo l'if nel while? Sempre  $t_w$  volte.

Quante volte l'if risulta vero e quindi eseguo il codice nell'if? Anche qua

dipende, quindi indico questo valore con  $t_{if}$ , per l'else assegno  $f_{if}$  (false if). Assegno  $t_w$  anche per l'assegnazione di  $m$ .

**Semplificazioni per il calcolo del tempo** Posso considerare il numero di esecuzioni dell'if e dell'else come una sola variabile, quindi sempre  $t_w$ , in totale ho quindi  $2t_w$  esecuzioni, all'interno del while, mentre i controlli del while sono  $t_w + 1$  (il +1 è per il controllo del while finale).

Otengo quindi:

```

int Ricerca_Binaria(int k, int v[])
1      sx = 1;
1      dx = length(v);
1      m = (sx+dx) div 2; //divisione intera
tw+1 while (v[m] != k AND sx <= dx)
2(tw)   if v[m] > k
           dx = m-1;
           else
               sx = m+1;
tw      m = (sx+dx) div 2;
1      if sx <= dx
           return(m);
           else
1      return(-1);

```

In totale avrò che  $T(n) = 6 + 4t_w$

Ma  $t_w$  quante volte viene eseguito? Dato che ogni volta l'array viene diviso in 2 parti ho la seguente progressione:

- Passo 0  $n$
- Passo 1  $\frac{n}{2}$
- Passo 2  $\frac{n}{2^2}$
- Passo 3  $\frac{n}{2^3}$
- ...

Questa è una tipica progressione logaritmica infatti avrò che  $n = 2^r$  e quindi  $r = \log_2(n)$ . Quindi il tempo peggiore sarà  $T(n) = 6 + 4\log_2(n)$ .

**Caso medio** In questo caso mi aspetto che mediamente dovrà dividere metà delle volte l'array rispetto al caso peggiore, quindi avrà  $t_m(n) = 6 + 2\log_2(n)$ .

# Capitolo 2

## Calcolo tempo di esecuzione algoritmi

In questo capitolo vedremo come calcolare il tempo di esecuzione di algoritmi, partiremo ad analizzare algoritmi di ordinamento, più che per la loro funzione primaria, per studiare come è possibile affrontare un problema con diverse tecniche e come l'utilizzo di diverse tecniche influenzi anche notevolmente l'efficienza.

### 2.1 Selection Sort

Ordinamento per selezione, dove per selezione intendo che ad ogni passo seleziono il valore minimo presente nell'array, scambio l'elemento più piccolo con l'elemento in prima posizione, mi sposto sul secondo valore e cerco il più piccolo, andrà a sostituirlo nella seconda posizione, e così via fino a quando non ho un solo valore da ordinare.

Qui di seguito il codice:

```
void SelSort(int A[])
(n-1)+1  For i = 1 to length(A) - 1
(n-1)    Pmin = i
sum(n-i)      For j = i + 1 to length(A)
sum(n-i)      if A[j] < A[Pmin]
t-if          Pmin = j
//Variabile appoggio per lo scambio
(n-1)        app = A[i]
(n-1)        A[i] = A[Pmin]
(n-1)        A[Pmin] = app
```

$\text{Length}(A) - 1$ , perchè l'ultimo valore sono sicuro che sarà il più grande di tutti dato che per gli tutti gli altri elementi ho cercato il minimo.

**Tempo esecuzione** Il For viene eseguito  $(n-1)+1$  volte perchè devo considerare anche il controllo finale che viene effettuato.

Il secondo For invece è più complesso da gestire perchè dipende anche da  $i$  che è esterna al ciclo stesso. Ogni volta che eseguo il secondo For l'array si restringe di 1 perchè ogni volta ordino un valore (trovando il minimo) quindi avrò una progressione del tipo  $(n + (n - 1) + (n - 2) + (n - 3) + \dots + (1))$ , quindi  $(n - i) + 1$ , devo considerare perchè che verrà eseguito ogni volta che il primo For viene eseguito quindi  $\sum_{i=1}^{n-1} (n - i)$ .

Il tempo di esecuzione sarà quindi:

$$5(n - 1) + 2 \sum i = 1^{n-1}(n - 1) + t_{if}$$

Dove  $5(n-1)$  e la sommatoria non dipendono dall'input, mentre  $t_{if}$  sì.

**Ricerca e Analisi caso peggiore** Il caso peggiore è A ordinato al contrario, dato che in questo caso l'if viene eseguito ogni volta (dato che  $A[j]$  sarà sempre minore di  $A[\text{Pmin}]$ ).

$t_{if}$  avrà il seguente tempo di esecuzione  $(n - 1) + (n - 2) + (n - 3) + \dots + 1 = \sum_{i=1}^{n-1} = \sum_{i=1}^n i$

Quindi:

$$T_p(n) = 5(n - 1) + 3 \sum_{i=1}^{n-1} (n - 1) = 5(n - 1) + 3 \sum_{i=1}^n i$$

Ricordiamo questa equivalenza:

$$\sum_{i=1}^f i = \frac{f(f + 1)}{2}$$

Quindi sostituendo otteniamo:

$$5(n - 1) + 3 \frac{(n - 1)n}{2}$$

Dato che a noi interessa l'ordine di grandezza e non ci interessano i dettagli possiamo approssimare questo risultato come:

$$\approx 5n + n^2 \approx n^2$$



**Nota** In realtà se è decrescente quando scambio il minimo in fondo all'array con il primo valore, che sarà il maggiore, sta ordinando entrambi gli elementi, però per semplificazione consideriamo che l'if viene eseguito ogni volta.

**Ricerca e Analisi caso migliore** Il caso migliore è quando l'array è ordinato dato che non eseguo mai l'if, quindi dato che  $t_{if} = 0$  ottengo:

$$t_m(n) = 5(n-1) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} (n-1) + 0 = 5(n-1) + \frac{2}{2}(n-1)n = 5n + n^2 \approx n^2$$

Notiamo quindi che il caso migliore e peggiore non sono molto diversi, anzi hanno lo stesso ordine di grandezza.

## Insertion Sort

In questo caso ordino partendo dal primo numero e controllando il secondo, verifico se il primo è maggiore del secondo e nel caso li scambio, poi controllo il terzo numero e procedo a ordinarlo insieme ai primi due e così via.

**Esempio** È come ordinare un mazzo di carte pescandole mano, quindi inizialmente ho due carte, le ordino confrontandole ed eventualmente scambiandole, poi pesco la terza e la ordino con le altre due e così via, fino a quando non ho pescato tutte le carte.

### 2.1.1 Implementazione

```

void InsSort(A[])
(n-1)c  For i = 2 to length(A)
(n-1)c      App = A[i]
(n-1)c      j = j - 1
sum(tw)  while App < A[j] AND j > 0
sum(tw)      A[j+1] = A[j]
sum(tw)      j--
(n-1)c      A[j+1] = App

```

Uso il For perchè in ogni caso devo ordinare tutti i numeri dell'array, parto da 2 perchè un numero da solo è ordinato, quindi è inutile analizzarlo, inoltre j sarebbe uguale a 0, e noi partiamo a contare da 1 gli indici dell'array.

### 2.1.2 Tempi d'esecuzione, caso migliore e peggiore

**Tempo di esecuzione** Faremo alcune approssimazioni dato che cerchiamo l'ordine di grandezza dei tempi di esecuzione:

- Non consideriamo l'ultima istruzione di controllo del For (quella che ci fa uscire dal ciclo)
- Non considero neanche l'ultima istruzione di controllo del While

Il For quindi richiederà  $n-1$  istruzioni, dove  $c$  è un generico tempo di esecuzione per ogni istruzione, dato che parte da 2 e non da 1.

Il while non ha un numero di volte fisso per cui è vero, dipende dall'input! Ci sarà un caso peggiore e uno migliore, scrivo quindi  $\sum_{i=2}^n tw_i$  per indicare il numero di volte in cui il While è vero, la sommatoria è inserita perchè devo sommare tutte le esecuzioni While per ogni  $i$ -esima esecuzione del ciclo For. Qui di seguito la spiegazione della sommatoria

$$tw_{i=2} + tw_{i=3} + tw_{i=4} + \dots + tw_{i=n}$$

$$\sum_{i=2}^n tw_i$$

Il tempo di esecuzione è quindi

$$t_{is}(n) = 4c(n-1) + 3c \sum_{i=2}^n tw_i$$

Dato che non è possibile definire in maniera univoca il numero di volte in cui il while verrà eseguito andiamo a determinare il caso migliore e quello peggiore.

**Caso migliore** Il vettore è già ordinato. Analizzando il codice dobbiamo verificare cosa può cambiare, in questo caso il While, quindi qual è il caso dove il while viene eseguito meno volte? Quando  $App < A[j]$  sempre, quindi  $tw_i = 0$  per ogni  $i$  e questo accade quando  $A[]$  è già ordinato.

$$t_m(n) = 4c(n-1) + 3c * 0 = 4c(n-1)$$

**Caso peggiore** Il while viene eseguito il maggior numero di volte per ogni  $i$ , cioè  $tw_i = j = i - 1$ . Questo si verifica quando  $A$  è ordinato al contrario.

$$T_p(n) = 4c(n-1) + 3c \sum_{i=2}^n (i-1)$$

Converto la sommatoria

$$\sum_{i=2}^n i - 1 = 1 + 2 + 3 + \dots + (n-1) = \sum_{i=1}^{n-1} i = \frac{(n-1)n}{2}$$

Inserisco nella formula

$$4c(n-1) + 3c\frac{(n-1)n}{2} \approx 4cn + 3c\frac{n^2}{2} \approx n^2$$

**Approssimazione caso migliore** Il caso migliore lo posso approssimare come  $n$ .

### 2.1.3 Confronto tra Selection e Insertion sort

Grazie alle approssimazioni possiamo confrontare i due algoritmi e notiamo subito che il caso migliore di Insertion è migliore di Selection Sort dato che è nel primo caso è  $n$ , mentre nel secondo è  $n^2$ .

Insertion Sort è quindi migliore di Selection Sort.

## 2.2 Nozioni per rappresentare i tempi di esecuzione

$$T(n) = O(n^2)$$

$O$  (o grande) indica il limite asintotico superiore del tempo di esecuzione (il caso peggiore), in altre parole indica il tempo massimo che posso aspettare per ricevere il risultato.

Mentre:

$$t(n) = \Omega(n)$$

Indica il limite inferiore del tempo di esecuzione (il caso migliore), quindi il tempo minimo che devo aspettare.

Nei casi dove questi due casi corrispondono si indicano con:

$$\Theta(n^2)$$

$\Theta$  indica che il tempo è uguale (approssimativamente) per tutti gli input.

### 2.2.1 Limiti asintotici

I limiti asintotici sono delle funzioni per cui sono sicuro che la funzione presa in considerazione  $f(n)$  è sempre minore del limiti asintotico. In questo caso dico che la funzione è asintoticamente limitata  $f(n) = O(n^2)$ . Le lettere  $O$ ,  $\Omega$ ,  $\Theta$ , indicano una costante moltiplicativa per cui posso moltiplicare la funzione e trova una funziona per la quale la mia funzione n non sarà mai maggiore (nel caso di  $O$ ), o minore (nel caso di  $\Omega$ ) della funzione che la limita asintoticamente. Questa costante indica tutto ciò che ho trascurato nel calcolo dei tempi, posso sceglierla a piacere per verificare che la funzione non violerà mia i limiti asintotici. (FORMALIZZARE QUESTA PARTE AGGIUNGENDO FORMULE - GUARDA APPUNTI IPAD)

$$O(g(n)) = \{f(n) : \exists k > 0, n_0 \geq 0 \text{ t.c.} \\ 0 \leq f(n) \leq k * g(n), \forall n \geq n_0\}$$

Questo ci porterà a fare delle approssimazioni come per esempio non considerare l'ultimo controllo del for o del while, questo produrrà delle situazioni che possono sembrare non sensate, per esempio potrà risultare che la condizione del while non viene mai eseguita, in realtà non è vero, perchè almeno 1 volta verrà eseguito, però per le approssimazioni che abbiamo scelto di fare non lo consideriamo.

#### Attenzione

1. Devo scegliere la funzione che solo per alcune costanti sia più grande/-piccola di quella confrontata ( $\exists k (t.c)$ ), altrimenti sto scegliendo un o (o-piccolo) dove la funzione è grande/piccola per ogni costante scelta ( $\forall$ ).
2. Non mi interessa se il il termine di ordine maggiore sia seguito da addizioni o sottrazioni
3. Di fronte a un tempo costante come  $\Omega$  indichiamo 1

### 2.2.2 Proprietà

$O$ ,  $\Omega$ ,  $\Theta$  hanno le seguenti proprietà:

- Sono Transitivi
- Simmetria vale solo per  $\Theta$
- Simmetria trasposta per  $O$  e  $\Omega$  - Es.  $2n = O(n^2)$   $n^2 = \Omega(2n)$

## 2.3 Esercizio ricerca elementi V2 in V1

**Richiesta** Dati 2 vettori V1 e V2, con n valori interni, quanti elementi di V2 compaiono in V1? Valutare quindi i tempi di esecuzione dell'algoritmo.

**Osservazioni** Dati i seguenti due vettori

$$\begin{aligned} V1 &= (7, 4, 4, 4, 12) \\ V2 &= (3, 7, 4, 15, 20) \end{aligned}$$

Gli elementi di V2 che compaiono in V1 sono 2, il 4 non devo contarli più volte!

Viceversa, se ci fosse stato il 4 più volte in V2 e anche 1 sola volta in V1, andava contato più volte.

### 2.3.1 Implementazione

```

    int confronta(V1[], V2[])
c*1      cont = 0
c*n      for i=0 to length(V2)
c*n      j=1
sum(c*twi) while (V2[i] != V1[j]) AND j <= length(V1)
sum(c*twi) j++;
c*n      if j <= length(V1)
c*tif      cont++
c*1      Return(cont)

```

Dove  $\text{sum}(c*twi)$  sarebbe  $\sum_{i=1}^n c * tw_i$

**Tempo algoritmo**

$$2c * 1 + 3c * n + c * t_{if} + 2c \sum_{i=1}^n tw_i$$

Posso portare fuori la c e il 2 dalla sommatoria dato che sono 2 costanti.

**Ricerca caso peggiore** Analizzo le due istruzioni variabili, cioè

- if
- while

Quale pesa di più? Il controllo dell'if viene eseguito ogni volta, l'incremento del conteggio non sempre, però conta comunque 1 istruzione, e comunque l'if viene sempre eseguito, mentre il while può essere rieseguito diverse volte, questo mi suggerisce che devo cercare un caso dove il while viene eseguito molte volte, dato che è potenzialmente molto più pesante dell'if.

In generale ci capiteranno sempre 2 quantità in contrasto, come in questo caso abbiamo l'if e il while, dovremo determinare la quantità più pesante.

Il caso peggiore è quindi quello in cui il while cicla il maggior numero di volte possibile, quando  $tw_i$  è max per ogni  $i$ , quindi quando nessun elemento di V2 è presente in V1.

### Tempo

$$\begin{aligned} tw_1 &= n, \quad tw_2 = n \quad \dots \quad tw_n = n \\ T_p(n) &= 2c + 3c * n + c * t_{if} + 2c \sum_{i=1}^n n \\ &= 2c + 3c * n + 0 + 2cn^2 \end{aligned}$$

Perchè  $\sum_{i=1}^n n = n + n + n + n + n \dots$  per  $n$  volte  $= n^2$

Da questo risultato mi rendo conto che l'ordine di grandezza è  $n^2$ , per esprimerlo in maniera formale scrivo:

$$= O(n^2)$$

**Ricerca caso migliore** Il caso migliore è quello dove il while non viene mai eseguito (0 esecuzioni del while ad ogni iterazione del for).

Il caso migliore NON è i 2 array sono uguali, perchè ci saranno delle iterazioni in cui il while verrà eseguito, il caso migliore è quando V2 contiene un solo elemento ripetuto  $n$  volte e lo stesso elemento è presente in V1[1].

$$\begin{aligned} V1 & 1,2,3,4 \\ V2 & 1,1,1,1 \end{aligned}$$

### Tempo

$$\begin{aligned} tw_i &= 0 \quad \forall i \rightarrow t_{if} = n \\ t_m(n) &= 2c + 3cn + cn + 2c \sum_{i=1}^n 0 \\ &= \Omega(n) \end{aligned}$$

In questo caso (opposto al precedente) while non viene mai eseguito e if n volte.

**Verifica caso medio** É ragionevole pensare che su molte esecuzioni il primo valore di V2 in V1 si trovi mediamente al centro.

T medio( $n$ )  $\rightarrow V_2[j]$  viene trovato sempre in  $V_1(\frac{n}{2}) \rightarrow tw_i = \frac{n}{2} \forall i$

$$\begin{aligned} &= 2c + 3cn + cn + 2c \sum_{i=1}^n \frac{cn}{2} = \\ &= 2c + 4cn + cn^2 = \Theta(n^2) \end{aligned}$$

**Riassumendo**

- Tempo peggiore -  $O(n^2)$
- Tempo migliore -  $\Omega(n)$
- Tempo medio -  $\Theta(n^2)$

## 2.4 Riassunto ordini di grandezza

Qui di seguito sono riportati gli ordini di grandezza in ordine crescente

- 1 (intesa come costante)
- $\log n$
- $n$
- $n \log n$
- $n^2$
- $n^3$
- $2^n$

## 2.5 Somma di due valori costituiti da bit

**Testo** Sommare due valori binari contenuti in due array e salvare il risultato in un terzo array.

**Struttura**

$$\begin{array}{c} A[1 \dots n] \\ B[1 \dots n] \\ C[1 \dots n+1] \end{array}$$

Dove i bit più significativi sono quelli a sinistra (quelli iniziali) e quelli meno significativi a destra.

**Considerazioni** Devo effettuare la somma bit a bit, quindi si configurano 3 casi

- Sommo 0 con 0 e ottengo 0
- Sommo 1 con 0 (o 0 con 1) e ottengo 1
- Sommo 1 con 1 e ottengo 1, ma devo ricordarmi del riporto!

Conviene quindi gestire ogni somma come una somma a 3 bit (bit A, bit B, bit di riporto).

**2.5.1 Implementazione**

```
void Somma(A[], B[])
c*1 riporto = 0;
    //parola chiave per indicare i-- nel for e' Downto
c*n for i = length(A) Downto 1
c*n     c[i+1] = A[i]+B[i]+riporto;
c*n     if c[i+1]<=1
c*tif         riporto = 0;
c*fif     else
c*fif         riporto = 1;
c*fif         c[i+1]=c[i+1]-2;
c*1 C[1]=riporto;
```

Alla fine riduco in due casi dove se la somma dei due bit mi restituisce 1 o 0 allora il riporto = 0, mentre se è 2 il riporto a 1 e tolgo 2 dalla somma, perchè:

- Se ho sommato 1 e 1 con riporto 0, ottengo 2 e ho riporto 1, togliendo 2 avrò 0 e in binario  $1 + 1 + 0 = 10$
- Se ho sommato 1 e 1 con riporto 1, ottengo 3 e ho riporto 1, togliendo 2 avrò 1 e in binario  $1 + 1 + 1 = 11$



### 2.5.2 Calcolo tempo

Come al solito  $t_{if}$  è  $t_{if}$  e indica quando l'if è vero e  $f_{if}$  è  $f_{if}$  e indica quando l'if è falso.

$$t(n) = 2c * 1 + 3c * n + 1c * t_{if} + 2c * f_{if}$$

**Caso migliore** Quando ho due vettori che sommati non danno mai riporto, quindi non esistono due bit a 1 nella stessa posizione  $i$ .

$$\begin{aligned} t_m(n) &= 2c + 3cn + c * n + 2c * 0 = \\ &= 4cn + 2c = \Omega(n) \end{aligned}$$

**Caso peggiore** Quando c'è sempre riporto, quindi quando:

$$\begin{aligned} A[n] &= B[n] = 1 \\ A[i] &\neq 0 \text{ e } B[i] \neq 0 \text{ per lo stesso } i \\ \forall 1 \leq i \leq n - 1 \end{aligned}$$

$$T_p(n) = 2c + 3cn + c * 0 + 2c * n = 5cn + 2c = O(n)$$

**Confronto due casi** Il caso migliore è effettivamente più veloce del peggiore dato che il migliore ha  $4cn$  operazioni, mentre il peggiore ha  $5cn$ , ma hanno lo stesso ordine di grandezza, quindi per valori grandi non ci sarà molta differenza.

In questo caso dato che il caso migliore e caso peggiore hanno lo stesso limite asintotico posso usare  $\Theta$  e dire che il tempo dell'algoritmo sarà:

$$t_{somma}(n) = \Theta(n)$$

**Tempo medio** Quando il limite asintotico del caso peggiore e caso migliore coincide, sicuramente il tempo medio avrà lo stesso limite asintotico, quindi non avrà molto senso calcolarlo, in questo caso per esempio ci aspettiamo che in metà dei bit avrò riporto e in metà dei bit no, posso scrivere la formula specifica, ma comunque otterrò sempre lo stesso limite asintotico, dato che se il limite superiore e inferiore coincidono per ordine di grandezza, se cerchiamo qualcosa in mezzo avrà necessariamente lo stesso ordine di grandezza.

## 2.6 Esercizio - Calcolo tempo codice già scritto

```

int f-y(n)
c    z=n;
c    t=0;
c log n while z>0
c log n     x= z MOD 2
c log n     z = z DIV 2
c log n     if x == 0
c tif*n         for i=1 to n
c tif*n             t=t+1
c    return(t)

```

### 2.6.1 Calcolo tempo istruzioni

Capiamo che il while viene eseguito  $\log n$  volte perchè dipende da  $z > 0$  e  $z$  viene diviso ogni volta per 2 (divisione intera) e questa è la tipica progressione logaritmica. Infatti questo non è un vero e proprio while, dato che il numero di istruzioni eseguite è determinato già all'inizio, potrebbe essere sostituito con un for.

#### Tempo di esecuzione generico

$$t(n) = 3c + 4c \log n + 2ct_{if}n$$

**Caso migliore**  $t_{if} = 0$ , cioè quando non entro mai nell'if e quindi quando ho sempre resto nella divisione intera di  $z$  per 2, ma questo quando si verifica? Si verifica quando dividendo per due un numero dispari, ottengo sempre un numero dispari. La divisione intera per due tenendo da parte il resto non è altro che la procedura per convertire un numero decimale in un numero binario, quindi ottengo sempre 1 quando sto convertendo un numero decimale che in binario è composto da solo 1 e questo si verifica quando ho un numero del tipo  $2^k - 1$ . Esempi validi sono 63, 127, 1023, ecc.

$$t_m(n) = 3c + 4c \log n + 0c = \Omega(\log n)$$

**Caso peggiore** If sempre vero e quindi  $n = 2^k$

$$t_{if} = \log n$$

$$T_p = 3c + 4c \log n + 2cn * \log n = O(n \log n)$$

In questo caso non posso usare  $\Theta$  perchè i limiti asintotici del caso migliore e caso peggiore sono diversi.

**Caso medio** Il caso medio è quello dove per metà dei bit ho riporto e per metà no, quindi è dove eseguo il for metà volta, quindi sarà  $\frac{n \log n}{2}$ .

## 2.6.2 Miglioramento Algoritmo

C'è un modo per migliorare questo algoritmo? Sì, il for è sostituibile con  $t=t+n$ .

Così facendo il caso peggiore (e quello medio) diventa:

$$O(n) = \log n$$

## 2.7 Esercizio for innestati

```

f_x(n)
c      r=0
c(n-1)  for i=1 to n-1
sum(n-i)    for j=i+1 to n
sum(sum(j))    for k=1 to j
                r=r+1
            return(r)

```

### 2.7.1 Calcolo tempo

In questo caso abbiamo 3 for annidati, con indici legati uno con l'altro.

In questi casi è necessario partire dal for più interno, il numero di volte per cui sarà eseguito sarà la sommatoria del for sopra stante, se ha più di 1 for, ci sarà una sommatoria per ogni for, per intenderci, il for più interno nel codice sopra riportato avrà la seguente sommatoria:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \left( \sum_{j=i+1}^n j \right)$$

Analizziamo questa formula:

- Il j più interno è il tempo di esecuzione del for più interno (for k=1 to j), dato che è un semplice incremento di variabile, quindi internamente va inserito il tempo di esecuzione del for più interno
- La sommatoria centrale riporta invece gli indici del for centrale, infatti parte da j = i+1 fino a n (come scritto nel for)
- Infine la sommatoria più esterna prende gli indici del primo for cioè parte da n fino ad arrivare a n-1

Questa formula rappresenta il numero di esecuzioni del for più interno.

**For centrale** In questo caso avrò una sola sommatoria  $\sum_1^{n-1} n - 1$

**For esterno** Come al solito in questo caso conto semplicemente quante volte viene eseguito guardando fino a dove arrivare il contatore, in questo caso n-1.

**Risoluzione formula**

$$\begin{aligned}
 t(n) &= c + c(n-1) + c \sum_{i=1}^{n-1} (n-i) + 2c \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n j + c \\
 &\approx 2c + c * n + c \sum_{i=1}^{n-1} i + 2c \dots = \\
 &= 2c + cn + c \frac{(n-1)(n)}{2} + 2c \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n j + c
 \end{aligned}$$

- Con l'approssimazione tolgo i -1 per esempio in  $c(n-1)$ , dato che non è rilevante.
- $\sum_{i=1}^{n-1} (n-i)$  se la leggo al contrario è come se stessi facendo  $n-1, n-2, n-3, \dots, n-n$  quindi la posso scrivere come  $\sum_{i=1}^{n-1} i$  e quindi convertirla con la solita formula della sommatoria
- Per la doppia sommatoria devo cercare di convertire prima di tutto quella più interna

La doppia sommatoria la gestisco nella seguente maniera:

- Devo convertire quella interna per scriverla in una forma che posso poi convertire in qualcosa contenente
- dato che ho  $j = i+1$  posso pensare di riscriverla come  $\sum_{j=1}^n j - (\sum_{j=1}^i j)$  e poi togliere tutte le  $i$  che sto trascurando (la sommatoria dopo il meno serve proprio a bilanciare la prima)
- Adesso posso convertire le due sommatorie come  $\frac{n(n+1)}{2} - \frac{i(i+1)}{2}$ , dato che nel secondo caso come indice in alto alla sommatoria ho  $i$
- Quindi ora ho convertito la prima sommatoria e tornando alla formula iniziale ho  $\sum_{i=1}^{n-1} (\frac{n(n+1)}{2} - \frac{i(i+1)}{2})$
- Ora posso fare delle approssimazioni, perchè tanto arriverò a scrivere un limite asintotico
- La prima parte è fissa dato che la sommatoria indica l'incremento di  $i$ , ma nel primo termine ho solo  $n$ , quindi avrò  $\approx \sum_{i=1}^{n-1} \frac{n^2}{2} - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{i(i+1)}{2}$
- La prima sommatoria la approssimo da  $i=1$  a  $n$  (anzichè  $n-1$ ), tanto il  $-1$  non influenzerà l'ordine di grandezza, quindi avrò  $\approx n * \frac{n^2}{2}$  mentre la seconda porto fuori il termine costante  $(\frac{1}{2})$ ,  $-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (i^2 + i)$
- Ora divido come prima i due termini in 2 sommatorie distinte  $\approx \frac{n^3}{2} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n i^2 + \sum_{i=1}^n i$  in entrambe le sommatorie il limite superiore  $n-1$  è stato approssimato a  $n$  per il solito discorso che  $-1$  non influenza l'ordine di grandezza
- La seconda sommatoria so come convertirla, mentre per la prima introduciamo una nuova formula (si trova in fondo a questo elenco), avrò quindi  $\approx \frac{n^3}{2} - \frac{1}{2} (\frac{n(n+1)(2n+1)}{6} + \frac{n(n+1)}{2})$
- Così facendo ho risolto entrambe le sommatorie e ho solo  $n$  nella formula!

### Conversione importante da ricordare

$$\sum_{i=1}^n i^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$$

**Conclusione risoluzione formula**    Alla fine quindi avrò

$$\approx \frac{n^3}{2} - \frac{1}{2} \left( \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} + \frac{n(n+1)}{2} \right)$$

Ora che ho solo  $n$  posso fare ulteriori approssimazioni per poter cercare un limite asintotico

$$\approx \frac{n^3}{2} - \frac{1}{2} \frac{2n^3}{6} - \frac{1}{4} n^2$$

Ho considerato solo gli ordini di grandezza maggiori, in questo modo posso dedurre che

$$\begin{aligned} t(n) &\simeq 2c + cn + \frac{cn^2}{2} + 2c \left( \frac{n^3}{2} - \frac{n^3}{6} - \frac{n^2}{4} \right) \\ &\simeq 2c + cn + cn^2 + 2cn^3 = \Theta(n^3) \end{aligned}$$

Ho tolto sia le frazioni che i termini che vengono sottratti perchè comunque sono più piccoli dato che il confronto è tra  $\frac{n^3}{2}$  e  $\frac{n^3}{6}$ , dato che viene diviso per 6 è più piccolo del primo,  $n^2$  è proprio di un ordine inferiore.

**Non c'è caso migliore o peggiore**    Questo perchè l'algoritmo ha un numero fisso di istruzioni eseguite dato che ci sono solo `for`, NON ci sono condizioni variabili come `if` o `while`, infatti scrivo  $\Theta$ .

### 2.7.2 Quando usare le sommatorie

Le sommatorie annidate una dentro l'altra sono da usare solo quando i `for` sono collegati da indici in comune (in questo caso  $k, j, i$  erano collegati), se ho due `for` che non sono collegati uso semplicemente  $n$  per indicare il numero di volte che vengono eseguiti, non userò la sommatoria.

### 2.7.3 Note per l'esame per le approssimazioni

Se sono palesi le approssimazioni possiamo anche non esplicitare cosa abbiamo fatto, ma se saltiamo molti passaggi o facciamo approssimazioni non palesi dobbiamo esplicitare cosa abbiamo fatto scrivendo due righe.

## 2.8 Esercizio - Verifica se la matrice data è simmetrica

## 2.8. ESERCIZIO - VERIFICA SE LA MATRICE DATA È SIMMETRICA 31

```
boolean Sim(M[][])
    i=2, simmetrica=TRUE;
    while i <= length(M) AND simmetrica==TRUE
        j=1
        while j<1 AND simmetrica
            if M[i,j] != M[j,i]
                simmetrica = FALSE;
            j++;
        i++;
    return(simmetrica);
```

### Tempo esecuzione

$$t(n) = 3c + 3ctw_1 + 3ctw_2 + ct_{if} \quad (2.1)$$

Sicuramente sarà il ciclo più interno a pesare di più, dato che

**Caso peggiore** Devo verificare qual è il ciclo peggiore, sicuramente è quello interno, dato che se viene eseguito tante volte verrà rieseguito  $n$  volte in base a quante volte eseguirò il primo while, il caso peggiore è quando la matrice è simmetrica.

$$t_{if} = 0 \quad M[i, j] = M[j, i] \quad \forall_{i,j} \dots \quad (2.2)$$

$M$  è simmetrica.

### N esecuzioni While

$$tw_1 = n - 1 \quad (2.3)$$

$$tw_{2,i} = \sum_{j=1}^{n-1} i = \frac{(n-1)n}{2} \quad (2.4)$$

Ricordiamoci che il caso peggiore dipende sempre dal numero di istruzioni eseguite, è legato da cosa deve fare l'algoritmo.

$$T_p(n) = 3c + 3c(n-1) + 3c \frac{(n-1)n}{2} + 0 = \quad (2.5)$$

$$\approx 3c + 3cn + 3cn^2 + 0 = O(n^2) \quad (2.6)$$

**Caso migliore** Quando entro 1 volta sono nei while e quando l'if è subito vero e setta `simmetrica=false`, il caso migliore quindi non è semplicemente quando la matrice non è simmetrica, ma è quando subito i primi due valori sono diversi, così mi accorgo subito che la matrice non è simmetrica.

$$t_m(n) = 3c + 3c + 3c + c = 10c = \Omega(1)$$

Notiamo che essendo Omega una costante, il caso migliore non dipende dalla dimensione dell'input, dato che è sempre il primo elemento che mi fa capire che la matrice non è simmetrica.

### 2.8.1 Come interrompo un ciclo?

Per interrompere un ciclo NON utilizzare `break` o `return`, ma utilizzare una variabile booleana come in questo caso.

**Caso medio** Mediamente mi accoreggerò a metà matrice che non è simmetrica, per questo il caso medio è

$$t_m \approx \frac{n^2}{4} = \Theta(n^2)$$

Dato che ho diviso per due il caso peggiore



# Capitolo 3

## Ricorsione

La programmazione ricorsiva è strettamente legata all'induzione matematica, si basa sul fatto che per risolvere un problema mi riconduco a un problema non ancora risolto, ma più semplice, fino ad arrivare a un caso base già risolto. I vantaggi della ricorsione sono due:

- Più semplice rispetto agli algoritmi iterativi (solitamente)
- La logica ricorsiva è più efficiente rispetto a quella iterativa

### 3.1 Fattoriale

#### 3.1.1 Iterativo

```
int Fatt(n)
    Ris=1
    For i=n downto 1
        Ris=Ris*i;
    return Ris;
```

#### 3.1.2 Ricorsivo

```
int Fatt(int n)
    if n==0
        return(1);
    else
        Ris=(Fatt(n-1));
        Tot = n*Ris;
        return(Tot);
```

## 3.2 Potenza ricorsiva

```
int Potenza (int A, int n)
c   if (n == 0)
c   tif   return(1)
      else
NO c fif   Ris=A*Potenza(A, n-1)
NO c fif       return(Ris)
```

### 3.2.1 Calcolo tempo di esecuzione

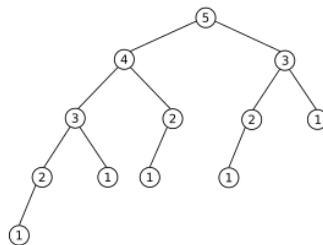
In questo non avendo cicli dobbiamo controllare le funzioni ricorsive, è sbagliato dire che la chiamata ricorsiva impiega  $c * f_{if}$ , perchè dipende da  $n$  non è un tempo di esecuzione costante! Vedremo più avanti come calcolare il tempo di esecuzione.

## 3.3 La ricorsione è sempre più efficiente rispetto all'iterazione?

Prendiamo l'esempio della sequenza di Fibonacci eseguita ricorsivamente.

```
int fibonacci(int n)
    if (n <= 1)
        return n;
    else
        return fibonacci(n-1) + fibonacci(n-2);
```

Se scomponiamo l'esecuzione di questa funzione noteremo che vengono rieseguiti più volte i calcoli per gli stessi numeri, dato che mi ritroverò più volte gli stessi numeri.



Notiamo infatti dall'albero che vengono calcolati più volte gli stessi numeri e questa è una grande inefficienza.

In questi casi quindi l'iterazione risulta migliore rispetto alla ricorsione.

## 3.4 Ricerca carattere in Array

Dato un Array trova tutte le occorrenze di una lettera data in input (in questo caso z).

Devo sempre ricondurmi all'affermazione ricorsiva, quindi partire da un caso, ricondurmi a uno più piccolo che però non mi dà ancora il risultato, ma che mi avvicina sempre di più al caso base.

In questo caso la penso nel seguente modo: Guarda  $A[n]$  se contiene z allora  $1 + \text{tutte le z in } A[n-1]$  altrimenti  $0 + \text{tutte le z in } A[n-1]$ .

Fino a ricondurmi al primo elemento dell'array, il caso base sarà proprio quello! Controllare quando ho un solo elemento se è z o no, se è z ritorno 1 se no ritorno 0.

### 3.4.1 Implementazione

```
int trova(char car, char A[], int pos)
    if pos == 1
        if A[1] == 'z'
            return(1)
        else
            return(0)
    else
        Ris=trova(char car, char A[], pos -1)
        if A[pos] == 'z'
            Ris++
        return(Ris)
```

Solitamente nelle funzioni ricorsive per scorrere un array abbiamo bisogno di due indici, per indicare la porzione di array che stiamo analizzando (es int h, int k), in questo caso il primo indice è fisso dato che devo scorrere dall'ultimo valore a scendere fino al primo, quindi sarebbe come avere  $h=1$  fisso e  $k=k-1$ , quindi h non lo considero.

Le varie chiamate ricorsive mi portano a scorrere tutti i valori e quando mi riconduco al caso base, la risoluzione di tutte le chiamate aperte mi porta a controllare mano a mano tutti gli indici dell'array restituendo mano a mano il contatore incrementato o meno a in base al fatto che ci sia z o meno.

## 3.5 Divide et Impera

Si tratta di un approccio di tipo ricorsivo che consiste in 3 fasi:

- Problema P è diviso in due o più sottoproblemi - DIVIDE
- Ogni sottoproblema è risolto ricorsivamente - IMPERA
- Le soluzioni ai sottoproblemi sono riunite a formare la soluzione completa - COMBINA

### 3.5.1 Ordinamento tramite Divide et Impera - Merge Sort

Problema P, ordina un vettore A di n elementi (usando Divide et Impera):

- Divide - Divido in 2 parti l'array da ordinare, ogni parte con  $\frac{n}{2}$  elementi, approssimando verso il basso nel caso il valore non fosse intero (n dispari)
- Impera - Ordina la prima metà, poi ordina la seconda metà
- Combina - Fonde (MERGE) in modo ordinato le due metà ordinate

**Merge sort è un algoritmo di ordinamento STABILE.**

**Definizione di algoritmo di ordinamento STABILE** Un algoritmo di ordinamento si dice stabile se elementi di uguale valore al termine dell'ordinamento mantengono tra di loro l'ordine che avevano inizialmente.

Quindi se ho per esempio [1, 5, 3, 2a, 7, 0, 2b], una volta ordinato avrò [0, 1, 2a, 2b, 3, 5, 7], i 2 anche se identici hanno preservato il loro ordine iniziale, quindi 2a si trova ancora prima di 2b.

Non è necessario che un algoritmo di ordinamento sia stabile per poter funzionare, ma questa caratteristica può essere utile per determinati utilizzi (strutture dati).

### 3.5.2 Esecuzione ordinamento

Dato che è necessario disegnare e usare diversi colori la spiegazione viene riportata scritta a mano, qui di seguito il link per la visualizzazione.

**Note importanti** Nel libro sembra che l'esecuzione dei sottopassi sia effettuata in maniera parallela, NON è così, viene ordinata prima la prima metà, poi le sotto metà della prima, fino ad arrivare ai casi base, poi si torna indietro a ritroso, non si ordinano parallelamente tutti i sotto array.

Nella spiegazione infatti gli ordinamenti sono stati messi a livelli di altezza diversi per sottolineare questo aspetto.

Ecco il PDF [Link al PDF](#).

### 3.5.3 Implementazione codice

```

void MergeSort (A[], int pin, int pfin)
    if pin < pfin
        m = (pin + pfin) DIV 2 //DIVIDE
        //divisione intera approssima verso il basso
        MergeSort(A[], pin, m) //IMPERA
        MergeSort(A[], n+1, pfin) //IMPERA
        Merge(A[], pin, m, pfin) //COMBINA

B[] //Array di appoggio per Merge

void Merge(A[], In, meta, fin2)
    I1=In
    I2=meta+1
    Ib=In
    while I1 <= meta AND I2 <= fine
        if A[I1]<=A[I2] //Maggiore uguale rende Merge stabile
            B[Ib] = A[I1]
            Ib++
            I1++
        else
            B[Ib] = A[I2]
            Ib++
            I2++
    while I1 <= meta
        B[Ib] = A[I1]
        Ib++
        I1++
    while I2 <= fine
        B[Ib] = A[I2]
        Ib++
        I2++
    Ib=In
    while Ib <= fine //ricopio l'array ordinato nell'array iniziale
        A[Ib]=B[Ib]
        Ib++

```

- pin e pfin sono rispettivamente l'indice iniziale e finale dell'array che sto analizzando (serve per dividere l'array per la divide)

- Li sommo e divido per 2 (divisione intera) per dividere l'Array e poi do in input la pin e la metà a una chiamata ricorsiva di MergeSort - DIVIDE
- Chiamo una funzione Merge (diversa da MergeSort) che ordina i sottoarray

### Merge

- Qua è come inserire indice inizio1, fine1, inizio2, fine2, ma dato che fine1 è la metà dell'array, e inizio2 è m+1, passo solo meta come parametro, ma il ragionamento in realtà è quello di passare gli indici di inizio e fine di 2 array
- if  $A[I1] \leq A[I2]$  rende Merge stabile perchè se sono uguali scelgo di ordinare prima  $A[I1]$  quindi l'elemento di sinistra, questo mantiene i due elementi com'erano ordinati inizialmente
- Dopo il primo while aggiungo 2 while perchè potrebbe essere che la prima parte è ordinata e ho finito gli elementi, ma nella seconda ci siano ancora elementi, servono quindi a continuare a copiare gli elementi rimasti in una delle due parti quando l'altra parte è già stata ordinata. Chiaramente verrà eseguito uno dei due while, mai tutti e due.
- Ultimo while serve a ricopiare tutto nell'array iniziale A (copia B in A)
- Quest'ultimo ciclo while in realtà è un for perchè la dimensione dell'array da copiare è fissa, so già quante istruzioni devo eseguire

**Osservazione, perchè uso B e non lavoro direttamente su A?** Si può fare un MergeSort che non usa array di appoggio, ma è molto più complicato da implementare perchè durante l'ordinamento del Merge mi cambierebbe l'ordine degli elementi nell'array dato che li sto ordinando, e questa complicazione è difficile da gestire.

### 3.5.4 Calcolo tempo Merge Sort

$In \longleftrightarrow Fin = n$

cioè la quantità di elementi compresi tra In e Fin nell'array

**Funzione Merge** In questa funzione ho 4 while

- W1 Confronta i 2 array
- W2 Ricopia i restanti della prima parte
- W3 Ricopia i restanti della seconda parte
- W4 - Ultimo ciclo while è in realtà un for che viene eseguito n volte

W1 confronta i 2 elementi, W2 e W3 non vengono mai eseguiti insieme, o eseguo l'uno o l'altro.

Se conto quante volte itero il primo e quante il secondo e terzo ottengo n perchè se per esempio ho 100 elementi e nel primo while ricopio 80 elementi in B dai confronti e me ne restano 20 nella seconda parte, i restanti 20 elementi saranno copiati nel terzo while. In pratica W1+W2+W3 è uguale a n iterazioni.

Il tempo della MERGE ci verrà quindi  $\Theta(n)$ , che è stato possibile calcolare senza troppi sforzi perchè è comunque una funzione iterativa, sapevamo già come fare.

**Tempo MergeSort** Questa è una parte ricorsiva.

Per prima cosa applichiamo un ragionamento che vale per tutti gli algoritmi divide et impera:

Il tempo di esecuzione di una Divide et Impera è dato da:

$$D(n) + I(n) + C(n)$$

Quindi la somma delle 3 fasi (Divide Impera Combina)

Consideriamo anche che **le parti Divide e Combina sono iterative, mentre Impera è ricorsiva.**

Nella merge sort:

- Divide è calcola M (metà)  $\Theta(1) = c$
- Combina è MERGE  $\Theta(n)$
- Divide + Combina è asintoticamente  $\Theta(n)$
- Impera le chiamate ricorsive sono 2 e gli vengono dati  $\frac{n}{2}$  elementi

### Equazione di ricorrenza della Merge Sort

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

Si chiama equazione di ricorrenza perchè  $T(n)$  compare anche a destra dell'equazione, in questo caso in  $2T(\frac{n}{2})$ . Per calcolare i tempi di esecuzione di un algoritmo ricorsivo generico abbiamo bisogno di risolvere queste equazioni di ricorrenza dove la nostra incognita (nel nostro caso i tempi di calcolo) si trova sia a destra e che sinistra dell'uguale.

**Come risolvere un'equazione di ricorrenza** Ci sono principalmente tre metodi:

- Metodo iterativo - Itero l'applicazione della ricorrenza volta per volta l'incognita fino a quando arrivo a un caso base
- Metodo per sostituzione - Ipotizzo quale possa essere la soluzione dell'equazione e poi verificarla con una dimostrazione
- Metodo principale o metodo dell'esperto - Funziona SOLO per i Divide et Impera, controlla se si verificano determinate condizioni (3) e in base alle condizioni ci restituisce i tempi di esecuzione

### Equazione generica per tutti gli algoritmi Divide et Impera

$$T(n) = \begin{cases} \Theta(1) & \text{caso base} \\ aT(\frac{n}{b}) + D(n) + C(n) \end{cases}$$

In generale negli algoritmi Divide et Impera  $a \geq 1$  e  $b > 1$ , questa differenza è molto importante, perchè **un Divide et Impera lo riconosco dal fatto che l'input è diviso in una frazione con un denominatore strettamente maggiore di 1!**, mentre  $A$  può anche essere 1, ci sono dei casi limite dove il sottoproblema è 1 solo (nel merge sono 2), l'importante per essere divide et impera è che la parte che consideriamo nella chiamata ricorsiva non è  $n$  - qualcosa, ma è  $\frac{n}{\text{qualcosa}}$ , qualcosa maggiore di 1.

La parte  $\frac{n}{b}$  può essere solitamente approssimata, per esempio nella Merge Sort se è pari ho la metà esatta, se è dispari invece approssimo dato che la divisione qua mi sembra intera, ma in alcuni casi (non comuni), non è così, devo verificare se il cambio del comportamento nelle due casistiche (per esempio pari e dispari) non mi cambi radicalmente il problema.



## 3.6 Metodi per calcolo tempo in algoritmi ricorsivi

Vedremo i 3 sopra citati

### 3.6.1 Metodo iterativo o dell'albero di ricorsione

Prende in input un'equazione di ricorrenza e iterativamente cerca di ricondursi al caso base.

**Esempio**

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

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

Genericamente a un passo  $k$  avrò:

$$k_n = k * 8 + T(n-k)$$

Se scelgo  $k = n - 1$  ottengo:

$$(n-1)8 + T(n + (n-1)) = (n-1) * 8 + T(1) = (n-1) * 8 + 6 = \Theta(n)$$

Genericamente il tempo di esecuzione sarà questo (tempo medio), potrebbe essere che il caso peggiore o migliore cambiano l'equazioni di ricorrenza.

### Altro esempio

Anche in questo caso link per la spiegazione scritta a mano: Ecco il PDF  
Link al PDF.

### 3.6.2 Metodo di sostituzione

Non molto utilizzato, consiste nell'ipotizzare un tempo di esecuzione e poi dimostrare per induzione che è quello.

Non ci sarà all'esame, serve solo sapere che esiste.

### 3.6.3 Teorema dell'esperto o Metodo principale

Questo è molto utile, dato che è abbastanza semplice da usare, ma si può applicare solo a Divide et Impera, funziona nella maggior parte dei casi Divide et Impera, in alcuni però non funziona, dato che per applicarlo devo sapere qualche regola, che in alcuni casi non viene rispettata.

#### Equazione di ricorrenza Divide et Impera

- Parte iterativa -  $D(n) + C(n) = F(n)$  Divide, Combina
- Parte ricorsiva -  $aT(\frac{n}{b})$  Impera

La parte più problematica è la parte ricorsiva, ma se noi scriviamo  $n^{\log_b a}$  non abbiamo il tempo di esecuzione della parte ricorsiva, ma abbiamo un'idea approssimata. Dobbiamo confrontare la parte iterativa e ricorsiva e capire quale pesa di più (o se asintoticamente hanno lo stesso peso).

#### Caso 1 - Parte ricorsiva pesa di più Se

$$F(n) = O(n^{(\log_b a) - \epsilon}), \quad \exists \epsilon > 0 \rightarrow T(n) = \Theta(n^{\log_b a})$$

Questo significa che se  $F(n)$  è limitato superiormente dal tempo di esecuzione della parte ricorsiva -  $\epsilon$  allora il tempo di esecuzione dell'algoritmo è quello della parte ricorsiva, devo trovare quindi almeno un  $\epsilon$  per cui si verifichi questa condizione.

#### Caso 2 - Parte ricorsiva e iterativa hanno lo stesso tempo

$$F(n) = \Theta(n^{\log_b a}) \rightarrow T(n) = \Theta(n^{\log_b a} \log n)$$

Questo caso è quello in cui i tempi sono gli stessi, infatti nell'equazioni si equivalgono e non è presente nessuna  $\epsilon$ , in questo caso basterà semplicemente scrivere il tempo esecuzione è il tempo della parte ricorsiva moltiplicata per un fattore  $\log n$ , quindi il tempo è  $n^{\log_b a} * \log n$ .

#### Caso 3 - Parte iterativa pesa di più

$$F(n) = \Omega(n^{(\log_b a) + \epsilon}) \quad \epsilon > 0$$

In questo caso non basta che si verifichi questa condizione, ma devo anche verificare che:

$$\text{se } aF(\frac{n}{b}) \leq k * F(n) \quad k < 1$$

Se è verificata anche questa condizione allora posso dire che:

$$\rightarrow T(n) = \Theta(f(n))$$

**Osservazione** Dato che il teorema dell'esperto funziona solo con Divide et Impera, e questa tipologia di algoritmi come caso base hanno  $\Theta(1)$ , posso anche sottointendere il caso base e scrivere solo il caso generale.

### 3.6.4 Esempio applicazione teorema dell'esperto su MergeSort

Ricordiamo che l'equazione di ricorrenza di MergeSort è la seguente:

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

Quindi abbiamo che la per la parte ricorsiva  $n^{\log_b a}$

- $a = 2$  cioè il numero di sottoproblemi in cui viene diviso il problema
- $b = 2$  cioè per quanto viene diviso l'input ( $\frac{n}{2}$ )

Quindi sostituendo abbiamo che:

$$n^{\log_b a} = n^{\log_2 2} = n^1 = n$$

E abbiamo che la parte iterativa è  $F(n) = \Theta(n)$ , quindi la parte ricorsiva e iterativa hanno lo stesso tempo di esecuzione, ci troviamo nel Caso 2, quindi abbiamo che:

$$T(n) = \Theta(n^{\log_b a} * n) = \Theta(n * \log n)$$

### 3.6.5 Altro esempio

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

Come detto prima sott'intendo il caso base  $\Theta(1)$

Qua abbiamo che  $a = 9$  e  $b = 3$  e  $F(n) = n$ . La parte ricorsiva sarà:

$$n^{\log_b a} = n^{\log_3 9} = n^2$$

Abbiamo quindi che  $F(n) = O(n^2)$  dato che la parte ricorsiva ha un tempo di esecuzione più grande quindi siamo nel caso 1, ma non basta dire questo, dobbiamo anche trovare un  $\epsilon$  tale per cui:

$$F(n) = O(n^{2-\epsilon}) \quad \epsilon > 0 \quad (es) \quad \epsilon = \frac{1}{2}$$

Notiamo che per quel valore di  $\epsilon$  il tempo resta asintoticamente identico, per questo possiamo dire che il tempo di esecuzione è:

$$T(n) = \Theta(n^{\log_b a}) = \Theta(n^2)$$

Cioè il tempo di esecuzione è determinato dalla parte ricorsiva.

### 3.6.6 Esercizio teorema dell'esperto

Anche in questo caso il link per il PDF scritto a mano, [Link](#)

### 3.6.7 Esercizi Divide et Impera

[Link al PDF](#) → [PDF](#).

Esercizi relativi a:

- Scrittura algoritmi in Divide et Impera
- Utilizzo del teorema dell'esperto per calcolare i tempi di esecuzione
- Simulazione esecuzione algoritmo di ordinamento (in questo caso MergeSort)

## 3.7 Esercizi esame (primo parziale o prima parte completo)

Tipologie di esercizi presenti all'esame:

- Simulare l'esecuzione di un algoritmo di ordinamento (uno fra Selection Sort, Insertion Sort, Merge Sort), dove si spiegano brevemente i passaggi più importanti, vanno indicati nello schema tutti i passaggi. NB NON mettere tutto in parallelo, mettere su livelli diversi in base al momento in cui vengono eseguite le istruzioni.
- Scrivere un algoritmo utilizzando il metodo Divide et Impera
- Calcolare il tempo di esecuzione di un algoritmo (iterativo o ricorsivo)
- Domanda di teoria

## 3.8 Quick Sort

Algoritmo di ordinamento Divide et Impera mediamente più rapido di MergeSort, dato che i tempi sono i seguenti:

$$\begin{array}{ll} \Theta(n \log n) & \text{Caso medio} \\ \mathcal{O}(n^2) & \text{Caso peggiore} \end{array}$$

Quick sort a differenza di merge sort, ha un caso peggiore, ed è un caso abbastanza lento dato che è dell'ordine  $n^2$ . I tempi di esecuzione asintotici

però nascondo delle costanti e le costanti di Quick sort sono più piccole di Merge sort, per questo è mediamente più veloce, oltretutto il caso peggiore è molto raro.

Tendenzialmente il caso peggiore può essere un problema quando l'algoritmo ha come caso di peggiore un caso che si presenta spesso.

Quick Sort si comporta molto male quando l'array è già ordinato o semi ordinato, però vedremo che c'è una tecnica per far sì che non ci sia un caso che lo metta in crisi, creando una versione randomizzata.

### 3.8.1 Differenze tra Merge Sort e Quick Sort

#### Note positive di Quick Sort

- Mergesort è un algoritmo di ordinamento non in loco dato che sfrutta delle variabili di appoggio che dipendono dalle dimensioni dell'input (quindi si occupa più spazio con input più grandi)
- Quick sort è un algoritmo di ordinamento in loco dato che ha delle variabili di appoggio, ma sono costanti, non dipendono dall'input (lo spazio occupato dalle variabili è sempre lo stesso), questo significa che l'algoritmo occupa poca memoria

#### Note negative di Quick Sort

- Il caso peggiore di Quick Sort è  $n^2$ , quindi peggiore di Merge, anche se vedremo che il caso peggiore è raro, la presenza di esso mi permette di garantire un tempo di esecuzione maggiore, rispetto a Merge
- Quick Sort non è stabile, quindi elementi con lo stesso valore possono avere un ordine di verso rispetto a quello iniziale alla fine dell'esecuzione

### 3.8.2 Logica Divide et Impera

Nel Quick sort c'è un ribaltamento della complessità delle parti dato che la divide è più complessa della combina.

**Divide** L'array è diviso in 2 parti (non necessariamente uguali, possono essere due parti con una quantità di valori molto diversa fra loro).

Per decidere come dividere l'array l'algoritmo prende un elemento come riferimento denominato PIVOT e considera i numeri a sinistra "Piccoli" e quelli a destra "Grandi".



Come Pivot scelgo il più semplice, che è il primo elemento, potrei anche scegliere un elemento non dell'array, ma conviene prendere un numero dell'array perchè se prendo un Pivot troppo piccolo o grande rischio di ricadere nel caso peggiore. Se scelgo il primo elemento dell'array sono sicuro che quello almeno è un valore dell'array e se sono fortunato ho una buona idea dei valori che ci sono nell'array.

Ordino a sinistra gli elementi uguali o più piccoli e a destra quelli uguali o più piccoli. NON viene specificato che quelli che erano a destra stanno a destra e viceversa, per questo motivo Quicksort non è stabile.

Questa fase di Divide viene chiamata **PARTITION**.

**Impera** Ricorsivamente ordina la prima parte e la seconda parte.

**Combina** Non fa niente, perchè dovrebbe affianca la prima parte con la seconda, ma l'algoritmo è in loco, quindi è già tutto ordinato e nell'array.

#### Nota sulle edizioni del libro di testo

- La prima e seconda edizione del libro riportano Quicksort con il partizionamento di Hoare (che è quello che faremo noi)
- Dalla terza in poi viene riportata quella di Lomuto (non si sa perchè)

### 3.8.3 Simulazione esecuzione

Anche in questo caso appunti a mano, Quicksort.

### 3.8.4 Implementazione

```

QuickSort(A[], Inizio, Fine)
    if Inizio < Fine
        Q = Partition(A[], Inizio, Fine)
        QuickSort(A[], Inizio, Q)
        QuickSort(A[], Q+1, Fine)

```

La combina non c'è perchè a fine Impera mi risulta tutto ordinato, else non c'è perchè se Inizio non è più j Fine significa che non devo fare più nulla.

```

Partition(A[], I, F)
    Pivot=A[I]
    sx=I-1
    dx=F+1
    while sx < dx
        do
            sx++
            while A[sx] < Pivot
                do
                    dx--
                    while A[dx] > Pivot
                        if sx < dx // controllo per scambio valori
                            app = A[sx]
                            A[sx] = A[dx]
                            A[dx] = app
    return(dx)

```

#### Osservazioni

- sx e dx partono fuori perchè così ad ogni iterazione io li faccio spostare, così facendo devo farli partire fuori perchè all'inizio dell'esecuzione così analizzeranno i primi valori, posso anche far partire dal primo e ultimo valore, ma la gestione degli spostamenti in questo caso risulterebbe più complessa
- Fare fermare gli indici degli array quando si accavallano o trovano il Pivot previene che essi sfornino i limiti dell'array

### 3.8.5 Scelta del Pivot

Come Pivot posso fare qualsiasi scelta, tranne nel caso in cui scelgo l'ultimo valore e quello è il maggiore di tutti perchè in quel caso il taglio del vettore mi produrrebbe 2 parti costituite da, 1 parte tutto ciò che sta a sinistra del Pivot compreso il Pivot (in questo caso tutto il vettore), dall'altra parte un vettore vuoto, e questo causa un loop delle chiamate ricorsive perchè in realtà non stanno dividendo il vettore, continua a passare lo stesso vettore.

**Soluzione** Se scelgo l'ultimo valore lo scambio con qualsiasi altro valore e lo tengo come Pivot, così non c'è possibilità che generi un loop.

### 3.8.6 Tempi di esecuzione Partition

La partition fa scorrere gli indici fino a quando non si accavallano, se per esempio scorrono tutti senza mai bloccarsi fino a quando si incontrano a metà hanno fatto  $n$  iterazioni, se per esempio scambiano ogni volta fanno  $\frac{n}{2} + \frac{n}{2} + \frac{n}{2}$  tutti e 3 i while, quindi alla fine fanno circa  $n$ .

Possiamo dire quindi che

$$T_{\text{Part}}(n) = \Theta(n)$$

### 3.8.7 Tempo di esecuzione Quicksort

$$T_{\text{QS}}(n) \begin{cases} \Theta(1) \\ n + 2T(Q) + T(n - Q) \end{cases}$$

L'array non viene diviso in 2 metà uguali, possiamo affermare comunque che è  $b + 2$  e quindi ho  $T(\frac{n}{2})$ ? Dobbiamo verificarlo.

Iniziamo dicendo che il tempo dipende dalla velocità di Partition  $n +$  la velocità di risoluzione di Quicksort in un array con  $Q$  elementi (prima parte) + la seconda parte che è  $T(n - Q)$ , solo che  $Q$  dipende dall'input.

Prendiamo due casi estremi per controllare il tempo di esecuzione.

**1 - Ipotizziamo che l'array viene sempre diviso bene a metà** Ipotesi poco realistica, ma che utilizziamo per verificare i tempi di esecuzione.

Qui i tempi sono:

$$T_{\text{QS}} = 2T(\frac{n}{2}) + n = \Theta(n \log n)$$

Dato che è esattamente il tempo di MergeSort.



**1 - Ipotizziamo che 1 elemento è da una parte e n-1 dall'altra** Cioè la divisione più sbilanciata.

In questo caso il tempo è:

$$T_{QS} = T(1) + T(n-1) + n = 1 + T(n-1) + n = T(n-1) + n$$

Risolverò  $T(n-1)$  scrivendo il suo albero.

Avrò la seguente equazione:

$$n + n + (n-1) + (n-2) + (n-3) + \dots + (2) = n + \left(\sum_{i=1}^n i\right) - 1 = n - 1 + \frac{n(n-1)}{2}$$

In questo caso quindi è circa  $n^2$ , per determinare se è il caso peggiore dovrei fare uno studio di funzione sull'equazione di ricorrenza, però intuitivamente, quando viene effettuata la divisione sbilanciata? Quando l'array è ordinato! Perchè il primo valore, che sceglierò come Pivot, sarà il più piccolo di tutti e quindi avrò le 2 parti sbilanciate dato che un array avrà 1 valore solo, il Pivot che è il più piccolo, e l'altro array contenente n-1 valori.

Se A è ordinato o ordinato al contrario sono nel caso in cui il taglio è sempre sbilanciato e quindi il caso peggiore, quindi avrò un tempo tendente a  $n^2$ .

Possiamo quindi dire che il tempo di esecuzione di Quick Sort è:

$$T_{Q_s}(n) \leq CQ^2$$

Minore o uguale perchè nel caso peggiore è proprio  $n^2$ .

### 3.8.8 Come ridurre di molto la probabilità che si scelga un Pivot pessimo

Si randomizza la scelta del Pivot, così anche se viene dato un array ordinato o un array con tutti i valori più piccoli nella prima parte ad ogni esecuzione di Partizion (quindi ad ogni chiamata ricorsiva) il Pivot viene scelto in maniera casuale:

```
Partition
  Pos=Random(I,F)
  Scambio(A[I], A{Pos})
```

Aggiungendo questa parte a Partition non esisterà più un input specifico che mi mette in crisi l'esecuzione dell'algoritmo, dato che ad ogni passo viene scelto casualmente il Pivot, lo scambio avviene perchè se per caso Random seleziona l'ultima posizione e l'ultimo valore è il più grande di tutti si genera

un loop, così facendo scambio il valore scelto con il primo ed elimino la possibilità che l'algoritmo possa andare in loop.

Così facendo ho ridotto di molto la probabilità che si presenti il caso peggiore.

Con varie dimostrazioni comunque notiamo che non basta che il taglio sia sbilanciato in alcuni tagli per aumentare così tanto il tempo, servirebbe che in ogni chiamata ricorsiva faccia male i tagli, ma l'algoritmo è randomizzato, ciò rende estremamente improbabile che questo accada. Mentre la versione non randomizzata risulta più sensibile agli input.

### 3.9 Esiste un algoritmo di ordinamento con tempo Theta $n^2$ ?

Gli algoritmi che possiamo fare sono infiniti, dobbiamo affermare in maniera molto pesante che un algoritmo non sia possibile da scrivere.

Per quanto riguarda i confronti non è possibile scrivere un algoritmo di ordinamento con un tempo inferiore a  $n \log n$ . Gli algoritmi sui confronti si basano sul farsi una serie di domande (confronti) per capire qual è l'ordine, quante domande devo fare per capire l'ordine? Se ho  $n$  numeri ho  $n!$  possibili ordinamenti, facendo un albero per verificare il numero di domande che mi faccio quando confronto i numeri ottengo che devo farmi almeno  $2^k$  domande per poter ordinare il numero e  $2^k > n!$ , quindi  $k$  deve essere  $\geq \log n!$ .

Ma questo logaritmo è grande o piccolo? Attraverso l'approssimazione di Stirling approssimiamo il fattoriale e troviamo che questo numero è  $\Theta(n \log nn)$ , ma quindi  $k > \log n! > \Omega(n \log n)$ . Questo dimostra che non è possibile far meno di  $n \log n$  domande utilizzando i confronti, quindi non è possibile fare meglio di Mergesort e Quicksort, posso ridurre le costanti nascoste, ma asintoticamente non posso fare meglio di così.

**Importanza di questa dimostrazione** Questa dimostrazione è importante perchè evidenzia la complessità di dimostrare che un algoritmo non si possa fare, devo trovare una caratteristica generale che vale per tutte le tipologie di algoritmi prese in considerazione, in questo caso considero il confronto.

## Counting sort

Counting sort è un algoritmo di ordinamento stabile che non si basa sui confronti, infatti riesce ad avere un tempo di esecuzione  $O(n)$ , ma funziona se il range di valori da ordinare sia  $1 \dots k$  con  $k = O(n)$ . Counting sort ha un tempo di esecuzione lineare solo se i numeri hanno delle specifiche caratteristiche, in caso contrario performa peggio di Quicksort e Mergesort.

Per essere precisi ha un tempo di esecuzione  $O(n + k)$ , infatti se ho 1000 numeri da ordinare, con un range di valori compreso da 1 a 1000 avrò un tempo di  $O(1000 + 1000)$  essendo  $n = 1000$ , avrò  $O(2n)$  che è ancora un tempo lineare, nel caso invece avessi 1000 valori, ma con un range molto più ampio, per esempio compreso da  $1 \dots 1.000.000$  mi ritrovo ad avere un tempo di esecuzione  $O(n + 1.000.000)$ , ed essendo  $n=1000$ , il tempo di esecuzione non sarà più lineare, in questo caso sarà meglio Quicksort o Mergesort.

### 3.9.1 Funzionamento

La posizione del numero dipende dal suo valore nel senso che se ho 100 valori e analizzo il 5 so che dovrò circa metterlo all'inizio.

Non si basa sui confronti, ma distribuisce i numeri all'interno dell'array.

**Implementazione** Counting sort utilizza 3 array d'appoggio:

- $A[1 \dots n]$
- $B[1 \dots n]$
- $C[1 \dots k]$

ed è composto da 3 fasi:

1. Azzera  $C[]$  -  $\Theta(k)$
2. Conto quante volte compare ogni elementi di  $A$ , memorizzandole in  $C$  -  $\Theta(n)$
3. Somma in  $C$  gli elementi da sinistra verso destra da  $C[2]$  a  $C[n]$  -  $\Theta(k)$
4. Scorri  $A$  dalla fine verso l'inizio e piazza in  $B$  i numeri sulla base dei valori in  $C$  -  $\Theta(n)$

In pratica l'algoritmo conta tutte le occorrenza dei numeri contenuti in A e salva il conteggio in C, poi somma da sinistra verso destra i vari indici, così facendo otterrà la posizione iniziale di ogni numero ordinato! Nella quarta fase inizierà a copiare i numeri da A nella posizione giusta in B (dalla fine verso l'inizio) e ogni volta che troverà un numero decrementerà il conteggio in C, così facendo poi quando troverà un'altra volta quel numero lo metterà a sinistra del numero precedentemente copiato, così facendo non ordino solo l'array, ma lo ordini stabilmente!

**Tempo di esecuzione** Sommando le varie fasi ottengo che:

$$T_{CS}(n, k) = \Theta(n) + \Theta(k) + \Theta(n) + \Theta(k) = \Theta(n) + \Theta(k) = \Theta(n + k)$$

### 3.9.2 Implementazione codice

```

CountingSort(A[], B[], C[], k)
    for i=1 to k
2k      C[i]=0
    for i=1 to length(A)
3n      Pos=A[i]
        C[Pos]++
    for i=2 to k
2k      C[i]=C[i]+C[i-1]
    for i= length(A) downto 1
5n      p1=A[i]
        p2=C[p1]
        B[p2]=A[i]
        C[p1]--

```

Notiamo nuovamente che il tempo è:

$$T_{CS}(n, k) = 4k + 8n = \Theta(n + k)$$

#### Riassumendo Countingsort

- Risulta più veloce di Quicksort solo per specifici input
- É stabile
- Riordinamento non in loco
- Dà quindi meno garanzie rispetto a Merge o Quick se non sappiamo che tipo di input stiamo trattando

## 3.10 Radix sort

Radix ci serve per capire perchè ci servono gli algoritmi stabili.  
Se devo ordinare per più campi come posso fare?

### Esempio

- Ordina per Cognome
- Ordina poi i gruppi con lo stesso Cognome per nome
- Ordina per età

Dovrei lanciare un algoritmo per ordinare tutto per cognome, poi per ogni sottogruppo dovrei lanciare ogni volta un algoritmo di ordinamento per ogni gruppo e sottogruppo, non c'è un modo più efficiente?

Se partissi a ordinare dal gruppo meno importante (nell'esempio età) e poi procedo a ritroso? Funziona! Mi trovo tutto ordinato facendo molti meno passaggi, funziona però se mantengono ad ogni passaggio l'ordinamento effettuato nel passo precedente e questa è una caratteristica degli algoritmi **stabili**, quindi questa tecnica funziona solo se utilizzo un algoritmo stabile.

### 3.10.1 Implementazione

```
Radix sort(AC[])  
    For r = Meno significativo to significativo  
        sort_stabile(A[], R)
```

Si tratta più di una pseudo implementazione per capirci, inoltre la significatività può essere data in input o scelta secondo diversi criteri. Evidenziamo l'utilità degli algoritmi stabili.

**Tempo esecuzione** Il tempo dipende principalmente dal tempo di esecuzione dell'algoritmo di ordinamento, se per esempio posso usare Counting allora il tempo sarà lineare, se invece non posso usarlo sceglierò Merge e quindi il tempo sarà  $n \log n$ . Posso scegliere qualsiasi algoritmo di ordinamento, basta che sia stabile.

# Capitolo 4

## Strutture dati

Il dato viene memorizzato fisicamente in bit 0/1, che possono corrispondere ad acceso/spento, magnetizzato/non magnetizzato, ecc.

Esistono diverse strutture dati perchè in base all'utilizzo (es. scrivo tanto e leggo poco oppure scrivo poche volte e cerco tante volte) serve creare una struttura ottimizzata per le mie necessità.

Chiaramente memorizzare i dati in un'unica riga di bit risulterebbe particolarmente scomodo e inefficiente, per questo i bit vengono aggregati nelle seguenti categorie:

- Tipi di dati (int, char, ecc.)
- Aggregazioni di tipi di dati (Array - insieme di dati uguali, Record - insieme di dati diversi)

### 4.1 ADT

Abstract Data Type ADT, è la sigla con cui vengono indicate le strutture dati.

#### 4.1.1 Operazioni base della struttura dati

- Insert(S, x)
- Delete(S, x)
- Search(S, k) - Usa k dato che nella ricerca ha senso mettere una chiave da cercare, non ha senso richiedere di cercare un dato dandogli il dato stesso

- Min/Max(S) - Minimo o Massimo sull'intera struttura dati
- Predecessor/Successor(S,k) - Elemento appena prima di k (in termini di valore)
- $x \rightarrow \text{nil/null}$  - In caso di mancata risposta (es. cerco elemento che non c'è) viene restituito null

S indica la struttura dati, mentre X, K indicano rispettivamente:

- x(elemento) - Indica un dato completo (es. temperatura)
- k(key) - Identificativo del dato

**Delete** In realtà è un'operazione complessa composta da una Search (ricerca)

**Search** Cerca il dato in un indice k e restituisce x (puntatore al dato), in generale infatti x sarà da intendersi come un puntatore a memoria.

**Update** Non è un'operazione base dato che è la composizione di una search, una delete e una insert, però per comodità viene utilizzata per evitare di scrivere ogni volta le tre operazioni.

**Operazioni e struttura dati** Quando introduco una struttura dati devo implementare e ottimizzare le operazioni di base.

## 4.2 Array

Allocazione statica di un'area di memoria dove ci sarà un'aggregazione di dati.

### 4.2.1 Perchè l'Array richiede che venga data la dimensione da allocare?

Perchè l'array ha necessità di riservare la memoria PRIMA che vengano salvati dei dati.

A volte me la cavo (es. salva le temperature dei mesi, alloco 31 valori e sono apposto), ma per situazioni dove il dato è variabile è un problema perchè:

- Se alloco tanta memoria per ogni variabile ci sarà sicuramente uno spreco per quelli piccoli e se quelli grandi sono pochi lo spreco sarà ancora maggiore
- Se alloco poca memoria non ci stanno i dati!

**Perchè usare gli array?** Il vantaggio dell'allocazione statica è che mi permette di sapere dove sono i dati attraverso indici, perchè in ogni casella avrò un indirizzo di memoria che la punta e se voglio avere la 100-esima casella, mi basterà sommare 100 caselle al primo indirizzo dell'array e questo è un grosso vantaggio.

### Riassumendo

- Svantaggi - Occupano più spazio di quanto richiesto
- Vantaggio - Tempo in quanto che ogni dato richiede lo stesso tempo di accesso dato che l'accesso è **diretto**

## 4.3 Liste Dinamiche

Una lista dinamica, organizza i dati in maniera dinamica, contrapposte agli Array, dato che essi sono statici, cioè prima del loro utilizzo viene allocata una parte di memoria ben definita e resta riservata per quella variabile staticamente (quindi è fisso).

La lista invece non ha questa necessità dato che quando ho bisogno di memoria ne richiedo l'allocazione, quindi la memoria allocata varierà durante l'esecuzione.

La lista dinamica è realizzata nel seguente modo:

Ho delle celle che contengono 2 valori, il valore memorizzato dalla cella e il puntatore della prossima cella. La prima cella è una testa che punta il primo valore, la seconda cella contiene il valore e il puntatore alla terza cella e così via.

Se cancello una cella modifico il puntatore precedente per farlo puntare a quella successiva a quella cancellata e così facendo risparmio spazio. Se voglio aggiungere valori aggiungo celle e puntatori.

Il problema è che il tempo di accesso ai dati sarà variabile, perchè se devo accedere al primo elemento lo trovo subito, ma se devo accedere all'ultimo devo scorrere tutti i dati uno ad uno fino ad arrivare all'ultimo. Nelle liste dinamiche l'accesso **non è diretto**.



### Riassumendo

- Vantaggi - Spazio occupato, dato che occupo solo ciò che mi serve e posso ridurre o aumentare a runtime lo spazio utilizzato
- Tempo - Dato che il tempo di accesso è variabile, in quanto l'accesso non è diretto.

## 4.4 Tipi di liste

- Lista dinamica semplice

### 4.4.1 Lista dinamica semplice

La lista dinamica semplice è composta da `head[L]` una testa che è un array contenente un puntatore al primo elemento della lista.

Un puntatore è un indirizzo di memoria (in formato esadecimale).

Le celle di memoria contengono  $n$  dati ( $n$  caselle), l'ultima casella solitamente denominata **next** contiene il puntatore alla prossima casella, l'ultimo **next** contiene null.

Chiamiamo  $P = \text{head}[L]$  il puntatore alla prima casella (indirizzo di memoria), per selezionare l'elemento tramite puntatore utilizzo la seguente scrittura:  $P.\text{variabile}$ .

Per spostarmi nella casella successiva scrivo  $P = P.\text{next}$ , così facendo  $P$  punta la seconda casella, se adesso quindi gli dirò  $P.\text{variabile}$ ,  $P$  punterà la variabile della seconda cella.

All'ultima cella  $P = P.\text{next}$  sarà uguale a null, devo stare attento in questo momento perchè se provo ad accedere ai dati significa che sto provando ad accedere a una casella null e questo genererà un brutto errore.

Le liste mal gestite possono creare altri errori molto ambigui, perchè se non cancello le caselle di memoria utilizzata e le libero, qualcun altro le può puntare e quando scorro la lista vado a prelevare dei dati che non ho scritto io, che spesso sono cose che se vengono stampate non hanno senso.

**Gestione liste** Uno svantaggio della lista è che devono essere gestite bene perchè la loro mal gestione può provare grossi errori e incoerenze.

**Osservazione scorrimento liste semplici** Le liste così strutturate posso scorrerle solo in avanti, non posso tornare indietro, quindi se sto cercando una casella da cancellare mi devono fermare un passo prima.

#### 4.4.2 Lista dinamica doppia o doppiamente concatenata

La lista dinamica doppia è strutturata come la lista semplice, ma nelle celle oltre al next ha anche il previous che è l'indirizzo della casella precedente, così posso spostarmi anche all'indietro. In questo modo la cancellazione è più semplice.

#### 4.4.3 Liste circolari

Qua l'ultimo P.next non è null, ma punta il primo elemento della lista così che la lista non finisca mai, ma continui a girare e previous di head punta l'ultimo valore. Sia le liste semplici che doppie possono essere trasformate in circolari. I tipi di liste restano quindi sempre 2:

- Semplice
- Doppia

### 4.5 Implementazione Operazioni Lista

#### 4.5.1 Search

```
pointer Search(L,k)
    P=head[L]
    while P.key != k AND P != null
        P = P.next
    return(P)
```

- L è l'indice della Lista
- P != null per evitare Null pointer exception
- return Null non è un problema, il problema è se facessi P.key con P=null, ma questo non può accadere per come abbiamo scritto il codice

**Caso migliore** k è nel primo elemento.  $T(n) = \Omega(1)$

**Caso peggiore**  $k \notin L$  dato che devo scorrere tutta la lista.  $T(n) = O(n)$

**Tempo di esecuzione uguale ad array** In questo caso il tempo di esecuzione è uguale agli array, ma se prendiamo per esempio la ricerca dicotomica vedremo che i tempi delle liste sono peggio perchè è più dispendioso per una lista posizionarmi a uno specifico indice richiesto.

### 4.5.2 Insert

```
Insert(L, x)
    x.Prev = null
    x.Next = head[L]
    if head[L] != null
        head[L].Prev = x
    head[L] = x
```

Nello pseudocodice non è indicato, ma nella realtà devo preoccuparmi di allocare dello spazio per la casella, calcolando quanto spazio mi serve, verificando quanto spazio occupano tutte le variabili della casella. Questo si fa con funzioni del tipo size.

**Dove mi conviene inserire l'elemento?** Mi conviene inserirlo all'inizio perchè se lo inserisco alla fine ogni volta richiedo n esecuzioni per scorrere tutta la lista, per questo inserisco l'elemento in testa.

**Casi particolari da controllare** All'inizio dell'implementazione mi conviene pensare la lista popolata, ma i casi particolari vanno trattati e sono:

- Prima casella - Ha previous = null
- Lista vuota - Ha subito next = null

Devo stare attento a come manipolo la next, perchè rischio di perdere il collegamento ai dati cancellando il next sbagliato o sovrascrivendolo e rischio di generare loop.

**Riassumendo** In una lista doppia mi è richiesto di cambiare 4 cambi, settare i la prev di x, la next di x va agganciata a next, head[L].prev va aggiornata, e la nuova head sarà x. L'If serve per controllare se la lista è vuota, dato che se è vuota il Prev non va settato, altrimenti head[L] sarà l'x appena aggiunto.

Assumiamo che x sia un puntatore valido, altrimenti dovremmo fare il test (anche per verificare che la sizeof sia andata a buon fine).

### 4.5.3 Delete

```

Delete(L,x)
    if x.prev != null
        (x.prev).next = x.next
    else
        head[L]=x.next
    if x.next != null
        (x.next).prev = x.prev
    /* Free(x) */

```

Assumiamo che la search dell'elemento da cercare sia stata già fatta.  
Io devo cancellare la casella data in input e sistemare i puntatori della casella prima e di quella successiva per agganciarli.

(x.Prev).next punta la next della casella prima.

(x.next).prev punta la prev della casella dopo.

Con queste due funzioni cancello la cella, ma la memoria di x resta allocata e non più raggiungibile quindi a seconda del linguaggio di programmazione devo preoccuparmi di liberare quella memoria.

Ora mi occupo dei casi particolari:

- Cancellazione del primo elemento
- Cancellazione dell'ultimo elemento

Nel secondo if non c'è bisogno dell'else perchè se  $x.next = null$  allora non devo fare nulla perchè è l'ultimo elemento della lista e quindi è giusto che  $x.next$  sia null.

Testando funziona anche se cancello l'unico elemento all'interno della lista.

Il tempo della cancellazione è costante, se non considero la ricerca, se considero la ricerca allora il tempo della cancellazione dipenderà da essa dato che la search ha tempo  $O(n)$ .

Questa cancellazione chiaramente non va bene per le liste semplici, perchè non ho previous.

Dovrei modificare l'algoritmo per ripartire da head e tornare alla casella prima oppure tenermi due puntatori che scorrono la lista e il secondo sta un passo indietro così quando trovo il valore da cancellare il puntatore di appoggio ha la casella precedente.

## 4.6 Esercizi

### 4.6.1 Data una lista in input invertirla

Due possibilità:

- Scambio prev/next
- Dal fondo all'inizio copio in altra lista

Il primo caso è un po' complesso perchè manipolare così tanti puntatori potrebbe generare dei problemi di celle che diventano irraggiungibili e non funziona con le liste semplici.

Mentre la seconda possibilità è più semplice.

```
Ribalta(L)
    p=head[L]
    head[L2] = p
    while p != null
        ListInsert(L2, p)
        p = p.next
    Return(head[L2])
```

Se viene richiesto all'esame scrivo l'algoritmo e scrivo il codice di ListInsert.

### 4.6.2 Ricerca palindroma in una lista doppia

```
boolean Palindroma(L1)
    P1=head[L1]
    P2=tail[L1]
    while P1.key == P2.key AND P1 != P2 AND P2.next != P1
        P1=P1.next
        P2=P2.prev
    if P1==P2 OR P2.next == P1
        return(TRUE)
    else
        return(FALSE)
```

All'esame potremo usare tail a meno che non sia esplicitamente vietato dal testo, basta esplicitare che si suppone che la lista ci dia oltre a head anche tail.

**Tempo** Dato che devo scorrere l'intera lista, metà da un puntatore e metà dall'altra, quindi il tempo è  $\Theta(n)$ .

## 4.7 Esercizi Lista ricorsivi

### 4.7.1 Conta quante volte è presente uno specifico elemento in una lista

```
int Conta (P, k)
if (P == null)
    return(0)
else
    Tot1 = Conta(P.next, k)
    if (P.key == k)
        Tot = 1
    else
        Tot = 0
    return Tot+Tot1
```

Si potrebbe anche fare Divide et Impera? Sì, ma sarebbe meno efficiente perchè comunque dovrei scansionare tutta la lista per capire la dimensione e poi fare le divisioni, non è sempre così, ma in questo caso non conviene.

### 4.7.2 Contare quante coppie di valori in posizione consecutiva sono presenti in una lista

Esempio 3,3,3,4,4 sono 3 coppie (3,3,3 conta per 2 perchè sono 2 coppie).

```
int Conta (P)
if P == null OR p.next == null
    return(0)
else
    if P.key == (P.next).key
        r=1
    else
        r=0
    r2=conta(p.next)
    return(r+r2)
```

Il caso base aggiuntivo serve perchè chiaramente se ho una lista di 1 elemento non ci saranno coppie, o comunque se sono arrivato ad avere un elemento non posso scansionare quello dopo perchè non esiste.

### 4.7.3 Ordinare una lista

Quali algoritmi posso implementare?

- Selection Sort - Sì
- Insertio Sort - Sì
- Merge Sort - Sì, ma è inefficiente perchè la divisione richiede molto tempo
- Quick Sort - Sì ed è efficiente, perchè creare due indici che scorrono uno verso destra e uno verso sinistra e scegliere il Pivot è semplice

## 4.8 Stack - Pile

Uno Stack (tradotto Pila) è una struttura di tipo LIFO (Last In First Out), quindi l'ultimo elemento inserito sarà il primo a uscire. La uso quando mi è comodo gestire una struttura dati in maniera LIFO, per esempio la gestione delle chiamate ricorsive dove solo quando ho una return del caso base inizio a svuotare lo stack, oppure quando il compilatore sta analizzando i begin e end, mano a mano che trovo begin metto una B sullo stack, quando trovo un end, tolgo la B dallo stack, fino ad avere tutto lo stack vuoto, se non è vuoto significa che il codice è scritto male, per esempio c'è un begin senza end, oppure se lo stack è vuoto e lo voglio svuotare ancora vuol dire che ci sono troppi end.

### 4.8.1 Operazioni

- Push(S,k) - Chiedo di inserire un elemento k nello stack S
- Pop(S) - Chiedo di togliere un elemento da S, non devo specificare quale perchè è per forza l'ultimo!
- Stackempty(S) (o isempty o emptysack) restituisce True se lo stack è vuoto e False altrimenti
- Top(S) - Restituisce il valore in cima allo stack senza toglierlo dallo stack (posso realizzarla facendo una Pop e poi una Push dello stesso elemento tolto)

Prima di fare la Pop è buona norma verificare se lo stack è vuoto, altrimenti non posso fare la Pop.

Corrispondenza con operazioni base delle strutture dati:

- Push  $\rightarrow$  Insert
- Pop  $\rightarrow$  Delete
- Search - In questo caso devo svuotare mano a mano lo stack e cercare l'elemento e poi reinserire tutto
- Min/Max - Devo svuotare tutto e mano a mano verificare elemento per elemento se è il minore

Chiaramente Search e Min/Max sono forzature, gli Stack non sono adatti per questo tipo di operazioni.

## 4.9 Realizzazione Stack

Che errori possono generarsi con gli stack?

- Stack Overflow - Tipicamente significa che ho finito la memoria, dato che lo stack è tipicamente una struttura dinamica se continuo ad allocare spazio per lo stack prima o poi lo finisco
- Stack Underflow - Sto chiedendo la Pop su uno stack vuoto, quindi voglio virtualmente scavare sotto lo stack

Posso farlo in maniera statica (Array) o dinamica (Liste).

### 4.9.1 Array

Dovrei stabilire a priori la memoria da utilizzare, quindi:

- Array di  $n$  celle
- $t[s]$  variabile che indica la posizione dell'ultimo elemento inserito (si tratta di un array di Stack quindi con  $t[s]$  indico l'ultimo elemento inserito dello stack  $s$ )
- Quando faccio una push controllo se l'array ha ancora spazio ( $ts \neq \text{length}(s)$ ) allora posso salvare il valore facendo  $t[s]++$ ,  $S[t[s]] = k$
- Per la Pop( $s$ )



**Push** Codice

```
Push(s,k)
    if t[s]==length(s)
        error("Overflow")
    else
        t[s]++
        S[t[s]]=k
```

**Pop** Codice

```
Pop(s)
    if t[s] == 0
        errore("underflow")
    else
        r=s[t[s]]
        t[s]-- //Se toglinessi questa riga di codice avrei la top
        return(r)
```

Con  $t[s]$ – dico allo stack di non guardare più l'ultima cella di memoria.

**Stackempty** Codice

```
Stackempty(s)
    if t[s] == 0
        return(TRUE)
    else
        return(FALSE)
```

**Osservazione variabile indice ultimo elemento  $t[s]$**  Grazie a questa variabile evitiamo ogni volta di scorrere l'array per arrivare all'ultimo elemento così facendo i tempi di esecuzione per tutte le funzioni sono costanti, altrimenti sarebbero  $n$ .

## 4.9.2 Liste dinamiche

- Lista semplice supporta tutte le operazioni
- Occupa solo lo spazio richiesto (non come l'array)
- Non richiede una stima iniziale
- Posso usare le head come puntamento all'ultimo valore dello stack

Le liste sono più adatte rispetto agli array per l'implementazione degli stack.

## Implementazione

### Push - Pop - Stackempty Codice

```

Push(s, x)
    x.next = head[s]
    head[s] = x

Pop(s)
    if head[s] == null
        error("underflow")
    else
        r = head[s]
        head[s] = head[s].next //se tolgo questa riga ho top
        return(r)

Stackempty(s)
    if head[s] == null
        return(true)
    else
        return(false)

```

Se lo facessi con Tail (inserimenti in coda) avrei bisogno di più tempo perchè quando faccio la Pop dovrei scorrere tutta la lista per poi assegnare Tail al penultimo elemento questo perchè essendo una lista semplice ho solo il next, così facendo avrei tempo n.

Potrei usare una lista doppia, ma useri più spazio. La scelta migliore è l'inserimento in testa tramite lista semplice.

## 4.10 Esercizi Stack

### 4.10.1 Cancellare da uno stack un elemento k dato in input

Utilizzando solo stack come strutture d'appoggio.

Intuitivamente mi viene da usare la Top per controllare e poi nel caso usao la Pop, ma è sbagliato perchè in ogni caso devo spostare l'elemento, poi se è k lo butto, se non è k lo salvo nello stack d'appoggio.

### Implementazione Codice

```

Cancella(s,k)
  while NOT(Stackempty(s))
    r=pop(s)
    if r != k
      push(sa, r) //sa e' lo stack d'appoggio
  while NOT(stackempty(sa))
    r = pop(sa)
    push(s,r)

```

**Tempo esecuzione**  $T(n) = 3t_{w_1} + 1t_{if} + 3t_{w_2} = 3n + 1t_{if} + 3t_{w_2}$

Dove  $t_{w_2} = t_{if}$ .

**Caso migliore**  $S$  contiene solo il valore di  $k$  ripetuto  $n$  volte

$$t_{if} = t_{w_2} = 0$$

$$t_m(n) = 3n = \Omega(n)$$

**Caso peggiore**  $k \notin S$  quindi  $t_{if} = t_{w_2} = t_{w_1} = n$

$$T_p(n) = 3n + n + 3n = 7n = O(n)$$

Dato che il tempo peggiore e migliore hanno asintoticamente lo stesso tempo di esecuzione

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

#### 4.10.2 Scrivere un algoritmo che salva 2 stack in un array solo

Lo posso fare facendo partire il primo stack dall'inizio dell'array e quando faccio una push incremento l'indice, mentre l'altro array lo faccio partire dalla fine e quando faccio la push decremento l'indice, per verificare se vado in overflow basta verificare che  $t[s1]+1 \neq t[s2]$  perchè in questo caso andrei a scrivere nell'altro stack.

Dividere in 2 l'array non porterebbe nessun vantaggio rispetto a fare 2 array distinti.

### 4.10.3 Copiare un stack S in S1 così da ottenerne 2 copie esatte dei dati, con lo stesso ordine

Come al solito come appoggio posso usare solo altri stack. Utilizzo uno stack di appoggio dove travaso il primo stack e poi ricopio lo stack d'appoggio nello stack S1 e nello stack di partenza S.

```
Duplica(s, s1)
    while not(stackempty(s))
        r=pop(s)
        push(sa,r)
    while not(stackempty(sa))
        r=pop(sa)
        push(s,r)
        push(s1,r)
```

### 4.10.4 Trova nello stack p un elemento k

```
boolean Trova(P, k)
    trovato=false
    while not(stackempty(p) AND trovato==false)
        r=pop(p)
        if r == k
            trovato=true
    return(trovato)
```

### 4.10.5 Verifichiamo che le parentesi di una stringa siano bilanciate (n aperte = n chiuse)

```
Check(s)
    i=1
    Err = false
    while not(Err) AND i <= length(s)
        if s[i] == '(' or '['
            push(P,s[i])
        else
            if s[i] == ')'
                if stackempty(P) OR top(P) != ')',
                    Err = true
            else
```

```

        Pop(P)
    if s[i] == ']'
        ...
        //controlli ]
    i++
    if not(stackempty(P))
        Err = true
    return(Err)

```

## 4.11 Queue - Coda

Si tratta di una struttura dati dinamica gestita con una politica di tipo FIFO (First IN First Out).

### Operazioni

- Enqueue(Q, X) - come la Push
- Dequeue(Q) - come la Pop
- QueueEmpty(Q) - come la Stackempty
- Top(Q) - Tendenzialmente non prevista

Top non è prevista perchè se tolgo un elemento e lo rimetto qua va a finire in fondo! Quindi implementarla non è banale come negli stack.

**Utilizzi della coda** La coda è molto utile per la gestione dei processi di un sistema operativo perchè io devo servire il primo che è arrivato, oltretutto se ho più processi da gestire posso creare una coda circolare dove per n tempo faccio andare un processo poi lo stoppo e lo rimetto in fondo alla coda e faccio andare il secondo, questo non è possibile nello stack.

**Sentinella** Per capire se ho fatto il giro di tutta la coda e quindi sono tornato allo stato iniziale posso inserire all'interno della coda un valore sentinella che quando viene letto segnala che sono alla fine della coda e quindi (in caso di coda circolare) ho passato tutta la coda e sto ricominciando da capo.

### 4.11.1 Implementazione

Posso implementare la coda sempre o Staticamente (Array) o Dinamicamente (Liste)

#### Array

- Ho bisogno di 2 indici, uno per la testa per prelevare e uno per la coda per inserire, altrimenti devo scorrere ogni volta l'array e richiede  $n$  tempo
- La cosa migliore è rendere circolare l'array
- Se  $\text{head}[q] = \text{tail}[q]$  la coda è vuota
- Devo sempre tenere una cella libera perchè se la coda è piena ho comunque  $\text{head}[q] = \text{tail}[q]$ , ma qua non è piena la coda, quindi tengo una casella libera, quando arrivo ad aver occupato tutto tranne quella dico che la coda è piena, per questo la coda di  $n$  celle contiene al massimo  $n-1$  elementi

```

Enqueue(Q, x)
    if h[Q] == t[Q]+1    (Mod n)
        Error(Overflow)
    else
        Q[t[Q]] = x
        t[Q]++          (Mod n)

```

Il Mod  $n$  è una notazione compatta del codice per dire che l'array è circolare, perchè prendiamo per esempio un array di 10 elementi, se arrivo al 10 e faccio  $n+1$  trovo 11 che non è uguale a head che sarebbe 1, in questo caso però essendo circolare è come se facessi  $(10+1)\text{Mod}(n)$  dove  $n=10$ , quindi mi trovo ad avere  $1=1$  ed è giusto.

### 4.11.2 Liste dinamiche

Mi serve avere un puntatore alla testa della lista e uno alla coda dove inserisco in coda e prelevo in testa, è sufficiente utilizzare una lista semoplice.

Non è efficiente inserire in testa e prelevare in coda perchè per riaggiornare il tail dovrei scorrere tutta la lista.

La lista doppia mi porterebbe ad avere un sacco di puntatori Prev che non userei mai.

Head verrà usata per la dequeue e per verificare se la coda è vuota, mentre il Tail mi servirà per l'enqueue.

### 4.11.3 Copia elementi da una coda Q1 a un'altra coda Q2

```
Copia(Q1, Q2)
    while not(QueueEmpty(Q1))
        r=Dequeue(Q1)
        Enqueue(Q2, r)
```

Questa implementazione però distrugge Q1, per evitare questo uso la seguente implementazione:

```
Copia(Q1, Q2)
    Enqueue(Q1, -1)
    do
        r=dequeue(Q1)
        if r != -1
            Enqueue(Q2, r)
            Enqueue(Q1, r)
    while not(r != 1)
```

Qua all'inizio dell'algoritmo inserisco un valore sentinella che mi dice che ho percorso tutta la lista in questo modo posso percorrere la lista e copiare gli elementi in Q2 e ricopiarli subito in Q1, quando arrivo a -1 mi fermo.

**Osservazione inversione elementi coda** Invertire una coda appoggiandosi solo a code richiede che svuoti tutta la coda tranne l'elemento in posizione n-1, poi lo copia in un'altra coda, poi svuoto l'elemento n-2 e lo metto in coda all'altra coda, ecc. e questo richiede  $n^2$ , invertire una coda usando solo code è piuttosto inefficiente.

### 4.11.4 Implementare una coda usando due pile

Quando faccio una Deque prelevo il primo elemento della pila, quando faccio un enqueue svuoto la prima pila dentro la seconda pila e tengo tutto così perchè se mi viene richiesta una dequeue ho già la seconda pila con in cima l'elemento da togliere dalla coda se, invece faccio enqueue lo metto sul primo stack.

Quando il secondo stack si svuota copio dentro il primo.

**Implementazione alternativa** La precedente implementazione è più efficiente di quella che proporremo adesso, ma il problema è che ci sono delle situazioni dove quando richiedo un elemento facendo dequeue devo aspettare

molto e io preferisco aspettare di più a mettermi in coda che tanto comunque dopo devo aspettare, rispetto ad aspettare di più per togliermi dalla coda. Ogni volta che faccio una enqueue sposto tutta la prima pila nella seconda pila, aggiungo l'elemento alla prima pila e ci ricopio dentro la seconda pila, così in cima avrò subito pronto l'elemento per la dequeue e in fondo c'è l'ultimo elemento inserito. Risulta mediamente meno efficiente, però soddisfa la richiesta di aspettare meno in fase di dequeue e di aspettare di più in fase di enqueue.

#### 4.11.5 Note per esame

Esercizi Stack e Code non so come siano implementate, posso usare solo i loro costrutti, sotto poi l'implementazione è con liste o array, ma NON lo so e quindi non posso usare puntatori, next, ecc. Mi posso appoggiare solo alle operazioni della struttura dati.

### 4.12 Alberi binari

Le liste possono essere organizzate in maniera differente, non per forza in maniera sequenziale, ma posso anche organizzarle in strutture ad albero, in questo modo posso ridurre di molto i tempi di ricerca, perchè con un controllo esclude metà albero.

Un Albero è un grafo non orientato, connesso e aciclico.

#### 4.12.1 Grafo

Un grafo è un insieme di nodi collegati tramite archi e può essere orientato (archi hanno un verso), non orientato

#### 4.12.2 Albero radicato

Un albero dove in cima ho solo un punto a cui sono collegati tutti gli archi è un albero radicato e il primo nodo è chiamato **root** (radice).

#### 4.12.3 Alberi binari

Sono alberi dove per ogni nodo ho collegato 2 elementi. Esistono anche i ternari, e ci sono strutture dati che prevedono il collegamento di n elementi, ma sono struttura particolari.



**Definizioni**

- Nodo antenato - Nodo che viene prima di un nodo  $x$
- Discendente - Nodo che viene dopo il nodo  $x$
- Sottoalbero - Albero che si ha dopo un certo nodo
- Il figlio di un nodo è il nodo immediatamente successivo a quello considerato, nell'albero binario si parla di figlio destro e sinistro
- Padre - Nodo immediatamente precedente a quello considerato (negli alberi binari 2 nodi possono avere lo stesso padre)
- Foglie - Nodo che sotto di sé non ha elementi
- I nodi che non sono ne foglie ne radice, sono i nodi interni
- Grado( $x$ ) - Numero di figli di un nodo  $x$ , NON il numero di figli possibili, ma quelli effettivi
- Profondità - Numero di livelli superiori che un nodo ha
- Altezza dell'albero, è la massima profondità ottenibili da tutti i nodi dell'albero

Radice è l'antenato principale e non è figlio di nessun nodo.

**Definizione informale albero binario** Un albero binario è una struttura in cui c'è un nodo a cui sono collegati al più due figli

**Definizione formale albero binario** Si tratta di una definizione ricorsiva.

Si tratta di una struttura ricorsiva con:

- Caso Base: Non contiene nodi
- Oppure 3 insiemi disgiunti:
  - 1 radice
  - 1 Albero binario a sinistra
  - 1 Albero binario a destra

Un albero senza nodi è un albero binario particolare (a livello pratico puntatore null).

**Albero pienamento binario** Un nodo ha 2 figli o non ha figli

**Albero binario completo** Ogni nodo ha 2 figli tranne le foglie che si trovano tutte allo stesso livello.

**Quanti nodi ci sono in un albero binario completo?** La radice ha  $2^0$  nodi, profondità 1 ha  $2^1$  nodi, ecc. ogni livello dell'albero aggiunge  $2^n$  nodi. Un albero completo con  $n$  nodi, ha come altezza  $\log_2 n$ .

## 4.13 Implementazione Albero Binario

Utilizzerò le liste e il primo puntatore sarà chiamato **Root[T]** e punterà a una cella con 3 campi:

- Left
- Right
- K
- Parent (Opzionale) - Campo che permette di risalire al nodo precedente

### 4.13.1 Stampare tutte le chiavi di un albero binario

Mi conviene appoggiarmi a uno stack dove quando inizio salvo il puntatore al primo nodo nello stack, poi faccio la pop e stampo la chiave, poi prendo il puntatore all'albero destro e lo metto nello stack, prendo quello sinistro e lo metto nello stack, poi faccio la pop di quello sinistro, stampo il valore e metto nello stack il sottoalbero destro e quello sinistro, fino a quando non arrivo alle foglie. Così facendo sto facendo una cosa simile a **Merge Sort**, cioè percorre mano mano i nodi e lascio in sospeso le varie metà.

Uso la ricorsione perchè le chiamate ricorsive si appoggiano a uno stack!

```
StampaRic(X)
    if x != null
        print(x.key) //anticipata
        StampaRic(x.left)
        //simmetrica
        StampaRic(x.right)
        //posticipata
```

A seconda di dove mettiamo la print possiamo ottenere:

- Stampa anticipata (Preorder) - Come nell'esempio
- Simmetrica (Inorder)
- Posticipata (Postorder)

Nello standard, l'albero di sinistra viene sempre stampato prima di quello di destra.

### 4.13.2 Alberi Binari di Ricerca

**Definizione** Un albero binario di ricerca è un albero binario  $tc$ :  
 $\forall x \in B$ :

- Se  $y \in$  sottoalbero radicato in  $\text{left}(x) \rightarrow \text{key}(y) \leq \text{key}(x)$
- Se  $y \in$  sottoalbero radicato in  $\text{right}(x) \rightarrow \text{key}(y) > \text{key}(x)$

In parole povere nel sottoalbero destro ci sono elementi più grandi di  $x$  e nel sinistro ci sono tutti gli elementi più piccoli o uguali e questa proprietà vale per tutti i nodi.

**Problema** Per un insieme di numeri ci sono diversi alberi di ricerca che posso scrivere, ma quali sono i migliori? Sono quelli più distribuiti perchè quando faccio la ricerca di un valore taglio più valori perchè se faccio un albero con un solo ramo il caso peggiore è  $O(n)$ .

Mentre su un albero ben bilanciato il tempo di ricerca peggiore è  $\log n$ .

Quindi quando ho un albero binario che è praticamente una lista ho dei tempi di ricerca peggiori.

Comunque a priori non ci preoccuperemo di bilanciare l'albero e compattarlo, verso la fine invece ci preoccuperemo anche di questo.

### 4.13.3 Vantaggi Albero Binario di Ricerca

Tramite la stampa simmetrica posso stampare tutti i valori in ordine! Dato che stampo albero  $sx$ ,  $root$ , albero  $dx$ .

### 4.13.4 Implementazione Ricerca

L'operazione più semplice dato che non devo scrivere nell'albero, lo percorro soltanto. Meglio avere comunque una funzione che mi restituisce il puntatore, così posso avere tutte le informazioni del dato richiesto.

```

SBT_Search(X, K)
  if x == nulla
    return(x)
  else
    if x.key == k
      return(x)
    else if x.key > k
      R = SBT_Search(x.left, K)
    else
      R = SBT_Search(x.right, k)
    return(R)

```

Il caso migliore è quando l'elemento cercato è la radice.

Il caso peggiore è quando per rendermi conto che l'elemento richiesto non è presente nell'albero devo percorrere l'albero. Cioè  $k \notin T$  e il tempo sarà  $T_p(n) = O(h)$  dove  $h = n$  al massimo, ma se l'albero è bilanciato avrò  $h = \log n$ .

**Ricerca del minimo** è l'elemento più a sinistra dell'albero che non ha figli a sinistra (può averne a destra).

```

SBT_min(x)
  if x == null
    return(x)
  while x.left != null
    x = x.left
  return(x)

```

**Ricerca del successore di un elemento x** Se l'albero destro di x è presente, il successore sarà sicuramente in quell'albero, se non c'è invece devo risalire fino a quando non ho che il nodo è un figlio sinistro, in quel caso il parent sarà il successore.

```

SBT_Successor(x)
  if right(x) != null
    R=SBT_min(x.right)
    return(R)
  else
    while x == Parent.right AND x.Parent != null
      x=x.Parent
    return(x.Parent)

```

Il tempo è  $\log h$  se l'albero è bilanciato, altrimenti è  $h$ , dipende sempre dall'altezza dell'albero.

### 4.13.5 Operazioni di Inserimento

Come facciamo ad aggiungere un valore in un albero binario di ricerca in modo da mantenerlo come tale?

La logica è quella di cercare il numero che voglio inserire e quando trovo un nodo dove vorrei scendere, ma non c'è nulla allora effettuo l'inserimento.

```

SBT_insert(T,Z)
    y=null,
    x=root[T]
    while x != null
        y=x
        if (z.key <= x.key)
            x=x.left
        else
            x=x.right
    if y == null //verifico se l'albero e' vuoto
        root[T] = Z
    else
        Z.Parent = y
        if Z.key <= y.key
            y.left = Z
        else
            y.right = Z

```

**Tempi di esecuzione** Come prima se l'albero è ben bilanciato  $T = \log h$ , altrimenti  $O(h)$ .

### 4.13.6 Cancellazione elementi da albero

Se l'elemento da cancellare è una foglia non ci sono problemi, il problema è che se è un nodo interno devo gestire i collegamenti che vengono a mancare.

Se cancello un nodo che ha un solo figlio, basta cancellare l'elemento e collegare il sotto albero con quello sopra e l'albero resta coerente.

**Cancellazione nodo con 2 figli** Devo mettere un numero che sia simile a quello appena tolto, il successore mantiene l'albero coerente! E il successore

è il minimo del sottoalbero di destra, e il minimo è una foglia oppure non ha figli a sinistra quindi rientra nella casistica dove è facile cancellarlo!

```

SBT_Delete(x)
    if x.left == x.right == null
        if x.Parent == null //Verifico se il valore
            Root[T] = null
        else
            if x == x.Parent.left
                x.Parent.left = null
            else
                x.Parent.right = null
    else if x.left == null XOR x.right = null
        // con XOR indico se solo uno dei due e' null
        Contrazione(T,x)
    else
        s=SBT_Successor(T,x)
        appoggio = s.key
        s.key = x.key
        x.key = appoggio
        SBT_Delete(s,T)
        //Chiamata ricorsiva per cancellare x
        //che pero' adesso e' al posto del successore
        //dato che li ho scambiati

Contrazione(T, x)
    if x.parent == null
        if x.left != null
            root[T] = x.left
        else
            root[T] = x.right
    else
        if x == x.parent.left AND x.left != null
            x.parent.left = x
            //seguono tutti gli if per i left e right
            //in base alla casistica

```

La chiamata ricorsiva è una finta ricorsione dato che in realtà effettua una sola chiamata perchè quando chiedo di cancellare s (che in realtà è x appena scambiato) so già che sarà una foglia o un nodo con solo un figlio, quindi andrà a finire in un caso base, così facendo non devo riscrivere il codice.

**Tempo** Come al solito dipende dall'altezza dell'albero  $h$ , se è bilanciato  $O(\log h)$  altrimenti  $O(h)$ .

#### 4.13.7 Alberi AVL

Sono alberi che implementano anche le funzionalità di bilanciamento, assegnano dei valori ai nodi che misurano il livello di sbilanciamento e quando lo sbilanciamento è troppo allora si interviene effettuando delle rotazioni più o meno complesse in base alla struttura dell'albero.

Questo viene fatto chiaramente al fine di mantenere il tempo delle operazioni logaritmico.