Modularizzazione

- Quando abbiamo a che fare con un problema complesso spesso lo suddividiamo in problemi più semplici che risolviamo separatamente, per poi combinare insieme le soluzioni dei sottoproblemi al fine di determinare la soluzione del problema di partenza.
- **Esempio:** La moltiplicazione di numeri con molte cifre viene suddivisa in moltiplicazioni cifra per cifra e i risultati di queste ultime vengono combinate insieme mediante addizioni.
- Questo procedimento è applicabile anche alla programmazione.
  - si suddivide un problema complesso in problemi di volta in volta più semplici
  - una volta individuati (sotto)problemi sufficientemente elementari si risolvono questi ultimi direttamente
  - si combinano le soluzioni dei sottoproblemi per ottenere la soluzione del problema di partenza

- Approccio top-down: si parte dall'alto, considerando il problema nella sua interezza e si procede verso il basso per raffinamenti successivi fino a ridurlo ad un insieme di sottoproblemi elementari
- Approccio bottom-up: ci si occupa prima di risolvere singole parti del problema, senza averne necessariamente una visione d'insieme, per poi risalire procedendo per aggiustamenti successivi fino ad ottenere la soluzione globale.
- I linguaggi di programmazione mettono a disposizione dei meccanismi di astrazione che favoriscono un approccio modulare

  Astrazione sui dati - il programmatore può definire nuovi tipi di dato specifici per il particolare problema (tipi di dato astratti)
  - collezioni di valori
  - operazioni con le quali operare su tali valori

  Astrazione funzionale - il programmatore può estendere le funzionalità del linguaggio definendo sottoprogrammi che risolvono (sotto)problemi specifici.
  - i sottoprogrammi sono di solito parametrici
  - possono essere (ri)usati alla stessa stregua delle operazioni built-in del linguaggio

Funzioni

- In C i sottoprogrammi si realizzano attraverso le funzioni.
- Una funzione può essere vista come una scatola nera:

$$\text{parametri di ingresso} \longrightarrow \boxed{\text{F}} \longrightarrow \text{valore calcolato}$$

  - risolve un sottoproblema specifico
  - attraverso i parametri e il risultato scambia informazioni con il `main` e con altre funzioni

Esempio:

$$x \longrightarrow \boxed{\text{abs}} \longrightarrow |x|$$

$$x, y \longrightarrow \boxed{\text{mcd}} \longrightarrow mcd(x, y)$$

$$b, e \longrightarrow \boxed{\text{exp}} \longrightarrow b^e$$

$$x_1, \ldots, x_n \longrightarrow \boxed{\text{sum}} \longrightarrow \sum_{i=1}^{n} x_i$$

Esempio: Definizione di abs in C

```
int abs(int x)
{
int ris;
if (x<0)
   ris = -x;
else
   ris = x;
return ris;  }
```

- Uso della funzione

```
main()
{
int x1, x2, z, w;
  ...
z = abs(x1);
  ...
printf("%d\n", w + abs(x2));
  ...
}
```

- Il linguaggio deve mettere a disposizione strumenti per
  - definire nuove operazioni astratte (funzioni)
  - usare le nuove operazioni definite
- Distinguiamo due momenti diversi:
  - la definizione della funzione
    definisce il codice che realizza l'operazione astratta
  - e la chiamata della funzione
    corrisponde all'utilizzo della funzione

- Ad una stessa definizione possono corrispondere diverse chiamate (come `z = abs(x1)` e `w + abs(x2)` nell'esempio precedente).
- Nella definizione della funzione, il codice fa riferimento agli argomenti o parametri formali della funzione (nell'esempio `x`)

  $\Longrightarrow$ un parametro formale non corrisponde ad un valore vero e proprio: è semplicemente un riferimento simbolico (ad un argomento della funzione)

Esempio:

```
int exp(int base, int esponente)
{
int ris = 1;
while (esponente > 0)
  {
    ris = ris * base;
    esponente = esponente - 1;
  }
return ris;
}
```

- I parametri formali sono base ed esponente

- Al momento della chiamata, alla funzione vengono forniti i valori degli argomenti, o parametri attuali, rispetto ai quali effettuare il calcolo

```
int exp(int base, int esponente)
{...}

main()  {
int b, e, r1, r2;
  ...
r1 = exp(2,5);
  ...
scanf("%d  %d", &b, &e);
r2 = exp(b, e);
  ... }
```

- Prima chiamata `exp(2,5)`
  - `2` è il parametro attuale corrispondente a `base`
  - `5` è il parametro attuale corrispondente a `esponente`
- Seconda chiamata `exp(b,e)`
  - `b` è il parametro attuale corrispondente a `base`
  - `e` è il parametro attuale corrispondente a `esponente`

Funzioni: definizione

Sintassi:

```
intestazione blocco
```

dove

- `blocco` è il corpo della funzione
- `intestazione` è l'intestazione della funzione ed ha la seguente forma:

  ```
  id-tipo identificatore (parametri-formali)
  ```

- `id-tipo` specifica il tipo del risultato calcolato dalla funzione
- `identificatore` specifica il nome della funzione ed è un qualsiasi identificatore C valido
- `parametri-formali` è una sequenza (eventualmente vuota) di dichiarazioni di parametro (tipo e nome) separate da virgola

Esempi: intestazioni di funzione

- ```
  int abs (int x)
  int MassimoComunDivisore(int a, int b)
  ```
- ```
  double Potenza(double x, double y)
  float media (int vet[], int lung)
  ```

Funzioni: chiamata (invocazione, attivazione)

Sintassi:

`identificatore` (`parametri-attuali`)

- `identificatore` è il nome della funzione
- `lista-parametri-attuali` è una lista di espressioni separate da virgola
- i parametri attuali devono corrispondere in numero e tipo ai parametri formali

Esempi: chiamate di funzioni

```
int mcd, x, y1, y2;
double exp, w, v, z;
  ...
mcd = MassimoComunDivisore(x+1, y1+y2);
exp = Potenza(z, 3.0);
  ...
exp = Potenza(z, Potenza(v,w));
```

Semantica (informale) di una chiamata di funzione

- Dentro il corpo di una funzione F compare una chiamata di un'altra funzione G
  - F viene detta funzione chiamante
  - G viene detta funzione chiamata

    Esempio: nel `main` c'è un assegnamento `x = abs(x);`

    $\Longrightarrow$ `main` è il chiamante, `abs` il chiamato
- Una chiamata di funzione è un'espressione, la cui valutazione avviene come segue:
  - viene sospesa l'esecuzione di F e viene "ceduto il controllo" a G, dopo aver opportunamente associato i parametri attuali ai parametri formali (passaggio dei parametri, fra poco . . .)
  - vengono eseguite le istruzioni di G, a partire dalla prima
  - l'esecuzione di G termina con l'esecuzione di un'istruzione speciale (istruzione `return`) che calcola il risultato della chiamata (è il valore dell'espressione corrispondente alla chiamata)
  - al termine dell'esecuzione di G il controllo ritorna a F, che prosegue l'esecuzione a partire dal punto in cui G era stata attivata

Valore di ritorno di una funzione: istruzione `return`

- **Esempio:** Funzione che restituisce il massimo tra due interi.

```
int max(int m, int n) {
   if (m >= n)
     return m;
   else
     return n;   }
```

- Chiamata di `max`, ad esempio da `main`:

```
main() {
  int i, j, massimo;
  scanf("%d%d", &i, &j);
  massimo = max(i,j);
  printf("massimo = %d\n", massimo);   }
```

- La funzione `main` tramite i parametri attuali comunica alla funzione `max` i valori sui quali calcolare la funzione (il valore delle variabili `i`,`j`).
- La funzione `max` tramite il valore di ritorno comunica il risultato al `main`.

- Nel corpo deve esserci l'istruzione `return espressione;` la cui esecuzione comporta:
  - il calcolo del valore di `espressione`: questo valore viene restituito al chiamante come risultato dell'esecuzione della funzione
  - la cessione del controllo alla funzione chiamante

Osservazioni

- in `return espressione`, il tipo di `espressione` deve essere lo stesso del tipo del risultato della funzione dichiarato nella definizione
- l'esecuzione di `return espressione` comporta la terminazione dell'esecuzione della funzione

  Esempio:

```
int max(int m, int n) {
 if (m >= n)
   return m;
 else
   return n;
 printf("pippo");   /* non viene mai eseguita */  }
```

Dichiarazioni di funzione (o prototipi)

- I parametri attuali nella chiamata di una funzione devono corrispondere in numero e tipo (in ordine) ai parametri formali.
- Dobbiamo permettere al compilatore di fare questo controllo
  $\Longrightarrow$ prima della chiamata deve essere nota l'intestazione
- Due possibilità:
  1. la funzione è stata definita prima
  2. la funzione è stata dichiarata prima

Sintassi della dichiarazione di funzione (o prototipo)

```
intestazione;
```

ovvero:

```
id-tipo identificatore (parametri-formali);
```

- c'e' un ";" finale al posto del blocco
- nella lista di parametri formali può anche mancare il nome dei parametri — interessa solo il tipo
- il compilatore usa la dichiarazione per controllare che l'attivazione sia corretta
- dopo deve esserci una definizione della funzione coerente con la dichiarazione

Ordine di dichiarazioni e funzioni

- Bisogna dichiarare o definire ogni funzione prima di usarla (chiamarla)
- È pratica comune specificare in quest'ordine:
  1. dichiarazioni (prototipi) di tutte le funzioni (tranne `main`)
  2. definizione di `main`
  3. definizioni delle funzioni
- In questo modo ogni funzione è stata dichiarata prima di essere usata
- L'ordine in cui mettiamo le definizioni non deve necessariamente corrispondere a quello delle dichiarazioni.

Esempio:

```
int max(int, int);

int foo(char, int);

main()  ...

int max(int m, int n)  ...    /* OK. definizione coerente
 con il prototipo */

int foo (int z, char c)  ...    /* NO! definizione non coerente
 con il prototipo */
```

Nella definzione di `foo` i parametri formali non sono nell'ordine specificato dal prototipo.

Passaggio dei parametri

- Abbiamo visto che le funzioni utilizzano parametri
  - permettono uno scambio di dati tra chiamante e chiamato
  - nell'intestazione/prototipo: lista di parametri formali (con tipo associato) – sono delle variabili
  - nell'attivazione: lista di parametri attuali — possono essere delle espressioni
- Al momento della chiamata ogni parametro formale viene inizializzato al valore del corrispondente parametro attuale.
- Il valore del parametro attuale viene copiato nella locazione di memoria del corrispondente parametro formale.
- Questo meccanismo di passaggio dei parametri viene comunemente detto passaggio per valore.

Esempio:

```
int succ (int);   /* prototipo di succ */
```

```
main()
{  int z, w;
   z = 10;
   w = succ(z);
   printf("%d", w);
}
```

```
int succ (int x)
   { x = x + 1;
     return x;
   }
```

L'effetto della chiamata `succ(z)` può essere simulato dall'esecuzione della seguente porzione di codice:

```
x = 10;        /* il parametro formale viene inizializzato con
                  il valore del parametro attuale */
x = x + 1;     /* esecuzione del corpo della funzione
return x;         succ */
```

- Chiamate diverse corrispondono ad inizializzazioni diverse delle variabili corrispondenti ai parametri formali

```
w = succ(20);          x = 20;
                  ⟹    x = x + 1;
                       return x;
```

- In questo caso il valore assegnato alla variabile `w` è `21`.

```
z = 10;
w = succ(z+3);          x = 13;
                  ⟹    x = x + 1;
                       return x;
```

- In questo caso il valore assegnato alla variabile `w` è `14`.
  - Se non vi è corrispondenza perfetta tra il tipo del parametro formale e quello del parametro attuale, viene effettuata una conversione implicita di tipo secondo le regole già viste.
  - Il passaggio dei parametri di tipo array non comporta la copia dei valori dell'array (fra poco ...)

Procedure

- Non sempre le operazioni astratte di cui abbiamo bisogno possono essere descritte in modo naturale come funzioni matematiche.

  Esempio: progettare un'interfaccia utente per la stampa di figure geometriche, in cui l'utente può scegliere:

  1. la forma della figura
  2. la dimensione
  3. il carattere di riempimento
  4. ...

- In questo caso il compito dell'operazione astratta non è (o non è soltanto) produrre un valore, ma è produrre effetti di altro tipo, tipicamente modifiche di stato.

  $\Longrightarrow$ in questi casi possiamo utilizzare procedure

  - le procedure sono un'astrazione delle istruzioni
  - le funzioni sono un'astrazione degli operatori

Le procedure in C

- Una procedura è una funzione avente come tipo del risultato il tipo speciale `void`.
- La definizione/dichiarazione di procedure e la loro chiamata è analoga al caso delle funzioni

  Esempio:

```
void emoticon (int n)
{  /* stampa n volte la sequenza -:) */
   int i;
   for (i=0; i<n; i++)
     {putchar('-');  putchar(':'); putchar(')'); putchar(' ');}
}

main()  {
   ...;
   emoticon(3);
   ...  }
```

- Le procedure non contengono di solito un'istruzione `return` (se la contengono è del tipo `return;` che non comporta il calcolo di alcun valore, ma solo la cessione del controllo al chiamante)

- La semantica di una chiamata di procedura P da una funzione/procedura F è analoga a quella della chiamata di funzione, ma una chiamata di procedura è un'istruzione
- In particolare, il passaggio dei parametri avviene per valore come nel caso delle funzioni
- il controllo viene restituito al chiamante al termine dell'esecuzione del blocco che costituisce il corpo della procedura (o in corrispondenza dell'esecuzione di un'istruzione del tipo `return;`)
- Il C non distingue tra funzioni e procedure (queste ultime sono casi particolari di funzioni)
  $\Longrightarrow$ concettualmente, però, è bene vedere le funzioni come astrazioni di operazioni e le procedure come astrazioni di istruzioni.

Esempio:

Procedura che stampa una cornice di asterischi di "altezza" parametrica

```
void stampaCornice(int altezza)
{
  int i;
  printf("**********************\n");
  for (i=1; i<=altezza; i++)
     printf("*                    *\n");
  printf("**********************\n");
  return;
}
```

- Come astrazione delle istruzioni, le procedure possono dover modificare lo stato.
  Esempio: Procedura `abs` che assegna ad una variabile intera il suo valore assoluto
  - il chiamante deve comunicare alla procedura la variabile in questione
  - la procedura deve analizzare il valore della variabile e, se necessario, effettuare il rimpiazzamento
- La seguente realizzazione della procedura non è corretta

```
void abs(int x)
{    if (x < 0)
        x = -x;   }
```

- Simuliamo il comportamento di una chiamata della procedura (come visto in precedenza)

```
int z = -5;
abs(z);        ⟹    x = -5;
                     if (x < 0) x = -x;
```

- La modifica del parametro formale non si ripercuote sul parametro attuale (si ricordi che il passaggio dei parametri è per valore).

Passaggio dei parametri per indirizzo

- Per ottenere l'effetto di modificare il valore dei parametri attuali, alcuni linguaggi (es. Pascal) prevedono un'ulteriore modalità di passaggio dei parametri, il passaggio per indirizzo
  - informalmente: il passaggio per indirizzo fa in modo che, al momento della chiamata, il parametro formale costituisca un modo alternativo per accedere al parametro attuale (che deve essere una variabile e non può essere una generica espressione)
  - durante l'esecuzione del corpo, ogni riferimento (e in particolare modifica) al parametro formale è di fatto un riferimento al parametro attuale.
- In C esiste solo il passaggio per valore, ma quello per indirizzo si può realizzare come segue:
  1. si utilizza un parametro formale di tipo puntatore
  2. all'interno del corpo della procedura ogni riferimento al parametro formale avviene attraverso l'operatore di dereferenziazione `*`
  3. al momento della chiamata, si utilizza come parametro attuale un indirizzo di una variabile (utilizzando, se necessario, l'operatore di indirizzo `&`).

Esempio: Riprendiamo l'esempio del valore assoluto.

```
void abs(int *x)
{
 if (*x < 0)
    *x = -(*x);
}
```

Nel chiamante si utilizzano chiamate del tipo `abs(&z)` per ottenere l'effetto di rimpiazzare il valore della variabile `z` con il suo valore assoluto.

```
int z = -5;
abs(&z);        ⟹    x = &z;
                      if (*x < 0) *x = -(*x);
```

N.B. Il passaggio dei parametri è sempre per valore, ma questa volta viene passato un valore puntatore che consente di accedere alla variabile del chiamante.Nell'esempio, l'assegnamento `*x = -(*x);` ha come effetto la modifica della variabile `z` del chiamante, in quanto il valore di `x` è `&z` e dunque `*x` è proprio `z`.

Esempio: Procedura per lo scambio di due variabili intere

```
void swap(int *x, int *y)
{
  int temp = *x;
  *x = *y;
  *y = temp;
}
```

Esempio di utilizzo: programma che legge due valori interi e li stampa ordinati.

```
main()   {
int a, b;
scanf("%d", &a);
scanf("%d", &b);
if (a > b) swap(&a, &b);
printf("Valore minimo: %d\n", a);
printf("Valore massimo: %d\n", b);   }
```

Parametri di tipo vettore

- Il meccanismo del passaggio per valore di un indirizzo consente il passaggio di vettori come parametri di funzioni/procedure.
- Quando si passa un vettore come parametro ad una funzione, in realtà si sta passando l'indirizzo dell'elemento di indice 0.
- Il parametro formale deve essere di tipo puntatore (al tipo degli elementi del vettore)
- di solito si passa anche la dimensione del vettore in un ulteriore parametro.

Esempio:

```
void stampaVettore(int *v, int dim)
{ int i;
  for (i = 0; i < dim; i++)
    printf("v[%d]: %d\n", i, v[i]);
}

main()
{ int vet[5] = {1, 2, 3, 4, 5};
  ...
  stampaVettore(vet, 5);    ...  }
```

- Per evidenziare che il parametro formale è un vettore (ovvero l'indirizzo dell'elemento di indice 0), si può utilizzare la notazione `nome-parametro[]` invece di `*nome-parametro`.
  Esempio: `void stampa(int v[], int dim) { ... }`
- Si può anche specificare la dimensione nel parametro, ma questa viene ignorata.
  Esempio: `void stampa(int v[5], int dim) { ... }`
- Come al solito, nel prototipo della funzione il nome del parametro (vettore) può anche mancare.
  Esempio: `void stampa(int [], int);`

- Il passaggio di un vettore è un passaggio per indirizzo.

  $\Longrightarrow$ La funzione può modificare gli elementi del vettore passato.

  Esempio: Lettura di un vettore.

```
void leggiVettore(int v[], int dim)
{
  int i;
  for (i = 0; i < dim; i++)
  {
    printf("Immettere l'elemento di indice %d: ", i);
    scanf("%d", &v[i]);
  }
}
```

Esempio: Programma che legge, inverte e stampa un vettore di interi

```
#include <stdio.h>
#define LUNG 5

void leggiVettore(int [], int);
void stampaVettore(int [], int);
void invertiVettore(int [], int);

main()
{
  int vett[LUNG];

  leggiVettore(vett, LUNG);
  printf("Vettore prima dell'inversione\n");
  stampaVettore(vett, LUNG);

  invertiVettore(vett, LUNG);
  printf("Vettore dopo l'inversione\n");
  stampaVettore(vett, LUNG);
}
```

La definizione della procedura `void invertiVettore(int [], int);` è lasciata per esercizio.

Passaggio di matrici come parametri

- Quando passiamo un vettore ad una funzione, passiamo in realtà il puntatore (costante) all'elemento di indice 0.

  $\Longrightarrow$ non serve specificare la dimensione nel par. formale.
- Quando passiamo una matrice ad una funzione, per poter accedere correttamente agli elementi, la funzione deve conoscere il numero di colonne della matrice.

  $\Longrightarrow$ Non possiamo specificare il parametro nella forma `mat[][]`, come per i vettori, ma dobbiamo specificare il numero di colonne.

  Esempio: `void stampa(int mat[][5], int righe){ }`
- Il motivo è semplice: per accedere ad un generico elemento della matrice, `mat[i][j]`, la funzione deve calcolare l'indirizzo di tale elemento `mat + offset`. Per calcolare correttamente `offset` è necessario sapere quante sono le colonne.
- L'indirizzo di `mat[i][j]` è infatti:

  `mat + (i · C · sizeof(int)) + (j · sizeof(int))`

  dove `C` è il numero di colonne (gli elementi in ciascuna riga).

Riassumendo:

- per calcolare l'indirizzo dell'elemento `mat[i][j]` è necessario conoscere:
  - il valore di `mat`, ovvero l'indirizzo del primo elemento della matrice
  - l'indice di riga `i` dell'elemento
  - l'indice di colonna `j` dell'elemento
  - il numero `C` di colonne della matrice
- In generale, in un parametro di tipo array vanno specificate tutte le dimensioni, tranne eventualmente la prima.
  1. vettore: non serve specificare il numero di elementi
  2. matrice: bisogna specificare il numero di colonne, ma non serve il numero di righe

Esercizio

Definire le funzioni/procedure utilizzate nel seguente programma e completare con gli opportuni parametri attuali la chiamata di `swap` in modo che il suo effetto sia di scambiare gli elementi minimo e massimo del vettore.

```
#include <stdio.h>
#define LUNG 10

void leggivet (int vet[], int dim);
void stampavet (int  vet[], int dim);
int indice_minimo (int vet[], int dim);
int indice_massimo (int vet[], int dim);
void swap (int *, int *);

main()
{
  int vettore[LUNG], pos_min, pos_max;

  leggivet(vettore, LUNG);
  pos_min = indice_minimo(vettore, LUNG);
  pos_max = indice_massimo(vettore, LUNG);
  swap (?, ?);   /* scambio degli elementi minimo e massimo */
  printf("Vettore dopo lo scambio dell'elemento minimo e massimo:\n");
  stampavet(vettore, LUNG);
}
```

Variabili locali

- Il blocco che costituisce il corpo di una funzione/procedura può contenere dichiarazioni di variabili.

  Esempio:

```
void leggiVettore(int v[], int dim)
{
  int i;              /* i E' UNA VARIABILE LOCALE */
  for (i = 0; i < dim; i++) { ... }
}
```

  - sono variabili proprie della funzione
  - hanno tempo di vita limitato alla durata della chiamata
  - più in generale: un identificatore dichiarato nel corpo di una funzione è detto locale alla funzione e non è visibile all'esterno della funzione (ad esempio nel `main`), ma solo nel corpo della stessa

- In realtà, ciò non è altro che un caso particolare di regole generali che governano la visibilità e il tempo di vita degli identificatori di un programma.

Struttura generale di un programma C

- parte direttiva
- parte dichiarativa globale che comprende:
  - dichiarazioni di costanti
  - dichiarazioni di tipi (li vedremo . . .)
  - dichiarazioni di variabili (variabili globali)
  - prototipi di funzioni/procedure
- il programma principale (`main`)
- le definizioni di funzioni/procedure

Esempio

```
#include <stdio.h>        /* parte direttiva */
#define LUNG 10

int i = 1;               /* variabili globali */
int j = 2;

int Q(int);              /* prototipi di funzioni e procedure */
void P(int *);

main()                  /* programma principale */
{
int x = 10;
char c = 'a';
x = Q(x);
P(&x);
}

int Q(int v) { ... }     /* definizioni di funzioni e procedure */
void P(int *z) { ... }
```

Blocchi

- il corpo di una funzione/procedura, cosi' come il corpo del programma principale, è un blocco.
- In C un blocco è costituito da
  - una parte dichiarativa (può non esserci)
  - una parte esecutiva (sequenza di istruzioni)
- Nel `main` o nel corpo delle funzioni possono comparire diversi blocchi, che possono essere
  - annidati: un blocco è una delle istruzioni di un altro blocco
  - paralleli: blocchi che fanno parte della medesima sequenza di istruzioni

```
{
   int x;
   x = 10;
   {
     int z;
     z = 20 ;
     ...
   }
   ...
}
```

```
{
   int x;
   x = 10;
   ...
}
{
   int z;
   z = 20;
   ...
}
```

- Anche la parte esecutiva del programma principale e di una funzione/procedura è un blocco
- Gli identificatori dichiarati nella parte dichiarativa di un blocco sono detti nomi locali del blocco e devono essere tutti diversi tra loro
  - nel caso di una funzione/procedura, fanno parte dei nomi locali anche gli identificatori utilizzati per i parametri formali

Esempio:

```
{
int x;   /* NO! identificatore x dichiarato   */
char x;  /* due volte nello stesso blocco     */
...
}

void p(int x, char y)
{
int x;      /* NO! identificatore x gia' usato per un parametro formale */
...
}
```

- In blocchi diversi possono essere utilizzati gli stessi identificatori

Esempio:

```
main()
{
int x;     /* x, y: variabili locali del main */
int y;
...
   {
     char x;    /* x: variabile locale del blocco annidato */
     ...
   }
...
}

void p(int x)
{
int y;          /*x,y: variabili locali della procedura p  */
...
}
```

- Un programma C può avere una struttura molto complessa a seguito dell'uso di funzioni, procedure e blocchi.
- È necessario definire regole precise per regolamentare l'uso dei nomi utilizzati all'interno di un programma.
- A questo scopo introduciamo alcune definizioni utili.

  Ambiente globale: è l'insieme di tutti gli elementi (nomi) dichiarati nella parte dichiarativa globale del programma

  Ambiente locale di una funzione: è l'insieme di tutti gli elementi (nomi) dichiarati nella parte dichiarativa della funzione e nella sua intestazione

  Ambiente locale di un blocco: è l'insieme di tutti gli elementi (nomi) dichiarati nella parte dichiarativa del blocco
- Quanto detto informalmente in precedenza può essere meglio precisato:

  $\Longrightarrow$ è possibile dichiarare più volte lo stesso identificatore (anche con significati diversi) purché in ambienti diversi
- Se ciò evita il proliferare di identificatori, causa il problema di stabilire il significato di un riferimento ad un identificatore in un generico punto del programma

Esempio: Riprendiamo l'esempio precedente

```
main()
{
int x;     /* x, y: variabili locali del main */
int y;
...
   {
     char x;    /* x: variabile locale del blocco annidato */
     ...
   }
...
}

void p(int x)
{
int y;         /*x,y: variabili locali della procedura p  */
...
}
```

- Se in un punto del programma viene eseguita l'istruzione `x = ...`, a quale delle tre dichiarazioni di `x` ci si riferisce?
- Dipende dal punto in cui si trova tale assegnamento e dalle regole di visibilità (o regole di scoping).

Regole di visibilità

- Gli identificatori presenti nell'ambiente globale sono visibili in tutte le funzioni e in tutti i blocchi del programma.
  Se un identificatore è definito in più punti (in blocchi e/o funzioni), la definizione valida è quella dell'ambiente più vicino al punto di utlizzo.
  N.B. Gli identificatori predefiniti del linguaggio si intendono parte dell'ambiente globale.
- Gli identificatori presenti nell'ambiente locale di una funzione sono visibili nel corpo della funzione (ivi compresi eventuali blocchi in esso contenuti).
  Se un identificatore è definito in più punti del corpo, la definizione valida è quella dell'ambiente più vicino al punto di utlizzo.
- Gli identificatori presenti nell'ambiente locale di un blocco sono visibili nella parte esecutiva del blocco (ivi compresi eventuali blocchi in essa contenuti).
  Se un identificatore è definito in più punti di un blocco, la definizione valida è quella dell'ambiente più vicino al punto di utlizzo.

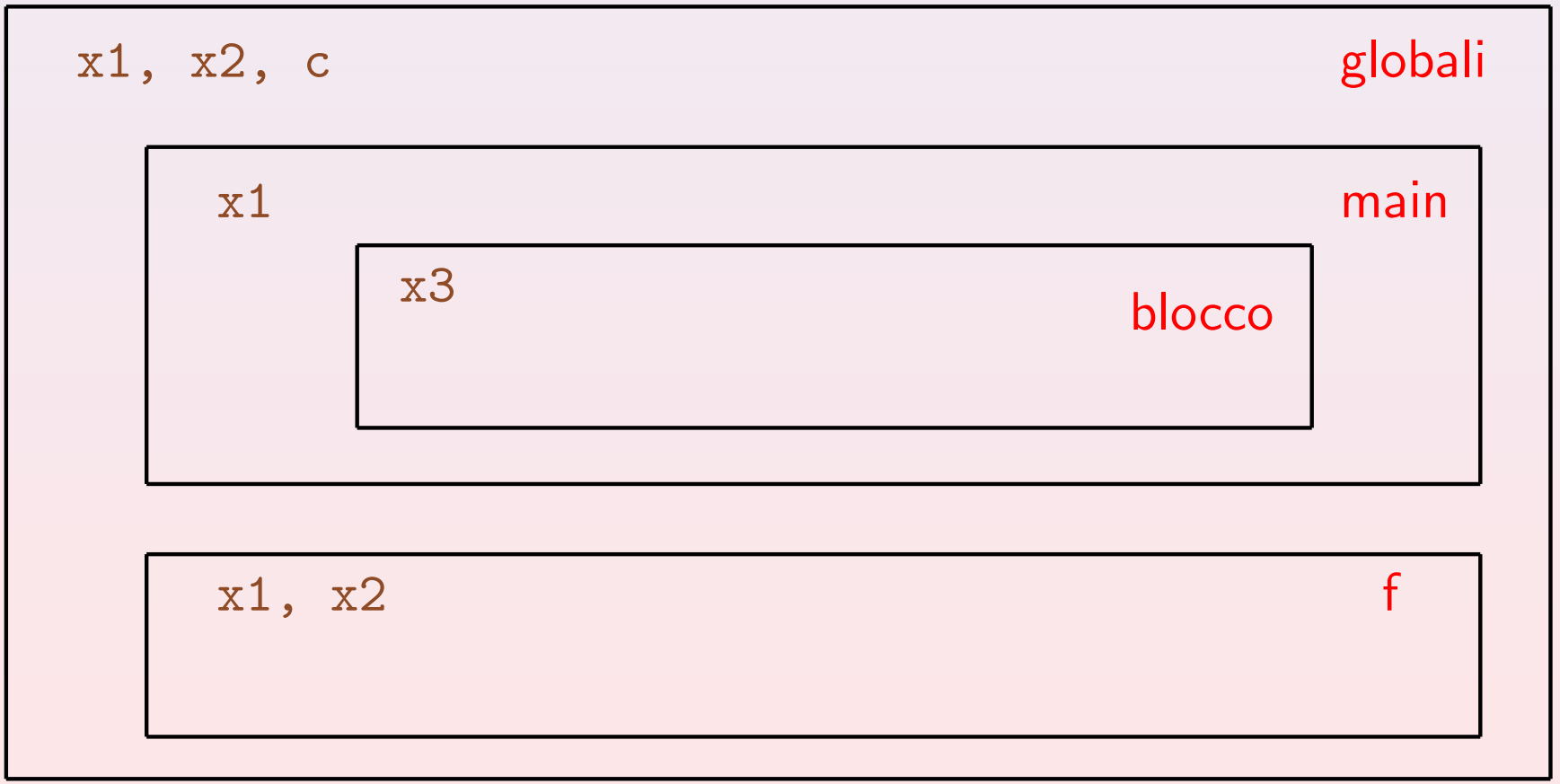
- Detto altrimenti, l'ambito di visibilità di un identificatore è determinato dalla posizione della sua dichiarazione:
  - gli identificatori dichiarati all'interno di un blocco hanno ambito di visibilità a livello di blocco
    $\Longrightarrow$ una variabile dichiarata in un blocco è visibile solo in quel blocco (compresi eventuali blocchi annidati)
  - gli identificatori dichiarati all'interno di una funzione (compresi quelli nell'intestazione) hanno ambito di visibilità a livello di funzione
    $\Longrightarrow$ una variabile dichiarata in una funzione è visibile solo nel corpo della funzione (compresi eventuali blocchi annidati)
  - gli identificatori dichiarati all'esterno delle funzioni e del main hanno ambito di visibilità a livello di programma
    $\Longrightarrow$ una variabile globale è visibile ovunque nel programma

Esempio:

```
int x1=10, x2=20;
char c='a';

int f(int);

main()
{
int x1=30;    /* nasconde la variabile globale x1 */
x2 = x1+x2;   /* x1 e' quella locale, x2 e' globale */
printf("x1=%d   x2=%d\n", x1, x2);   /* stampa x1=30  x2=50  */
  { int x3=50;
    x1=f(x3); /* x1 e' quella locale al primo blocco */
    printf("x1=%d   x2=%d\n", x1, x2);   /* stampa x1=150  x2=50 */
  }
}

int f(int x1)  /* nasconde la variabile globale x1 */
{ int x2;       /* nasconde la variabile globale x2 */
  x2 = x1 + 100;  /* x1 e' il parametro formale, x2 la var. locale */
  return x2;
}
```

Rappresentazione Grafica: Modello a contorni

- Si rappresenta ogni ambiente mediante un rettangolo con gli identificatori in esso contenuti.



Durata delle variabili

- Una variabile ha un suo tempo di vita.
  - viene creata (ovvero ad essa viene riservata uno spazio di memoria)
  - viene (o può essere) distrutta (ovvero viene rilasciato il corrispondente spazio di memoria).
- Si distinguono due classi di variabili:
  - variabili automatiche: vengono create ogni volta che si entra nel loro ambiente di visibilità e vengono distrutte all'uscita di tale ambiente
    - es. variabili locali di un blocco: vengono create all'ingresso del blocco { distrutte all'uscita dal blocco }
    - es. variabili locali di una funzione: vengono create al momento della chiamata e distrutte all'uscita
  - variabili statiche: vengono create una sola volta e vengono distrutte solo al termine dell'esecuzione del programma (non ne faremo uso ...)
- N.B. nel caso di funzioni/blocchi eseguiti più volte (es. funzione chiamata in punti diversi, blocco all'interno di un ciclo):

  le variabili automatiche corrispondenti possono essere associate di volta in volta a locazioni di memoria diverse, quindi
  il loro valore non persiste tra una esecuzione e la successiva

Gestione della memoria a tempo di esecuzione (run-time)

- Il codice macchina e i dati risiedono entrambi in memoria, ma in zone separate:
  - la memoria per il codice macchina è fissata a tempo di compilazione
  - la memoria per i dati (in particolare per le variabili automatiche) cresce e decresce dinamicamente durante l'esecuzione: viene gestita a pila
- Una pila (o stack) è una struttura dati con accesso LIFO: Last In First Out = l'ultimo entrato è il primo ad uscire (es.: pila di piatti da lavare).
- Il sistema gestisce in memoria la pila dei record di attivazione (RDA)
  - per ogni chiamata di funzione viene creato un nuovo RDA in cima alla pila
  - al termine della chiamata della funzione il RDA viene rimosso dalla pila
- Ogni RDA contiene:
  - le locazioni di memoria per i parametri formali (se presenti)
  - le locazioni di memoria per le variabili locali (se presenti)
  - altre informazioni che non analizziamo
- Anche gli ambienti locali dei blocchi vengono allocati/deallocati sulla pila.

Esempio:

```
int f(int);
main()
{
  int x, y, z;
  x=10;
  y=20;           /* blocco principale */                          PUNTO 1
  z = f(x);       /* prima chiamata di f */                        PUNTO 2
    {
    int x=50;     /* uscita da f e ingresso nel blocco annidato*/  PUNTO 3
    y=f(x);       /* seconda chiamata di f */                      PUNTO 4
    z=y;          /* uscita da f */                                PUNTO 5
    }
  ...             /* uscita dal blocco */                          PUNTO 6
}
int f(int a)
{
  int z;
  z = a + 1;
  return z;
}
```

Evoluzione della pila

x	10
y	20
z	?

▸ PUNTO 1

Evoluzione della pila

a	10
z	?

x	10
y	20
z	?

▸ PUNTO 2

Evoluzione della pila

x	50

x	10
y	20
z	11

▸ PUNTO 3

Evoluzione della pila

a	50
z	?

x	50

x	10
y	20
z	11

▸ PUNTO 4

Evoluzione della pila

x	50

x	10
y	51
z	11

PUNTO 5

Evoluzione della pila

x	10
y	51
z	51

▸ PUNTO 6

Variabili statiche: un esempio d'uso

- Una variabile statica, una volta creata, rimane in vita per tutto il tempo di esecuzione del programma.
  Esempio: `f(void) { static int x; ... }`
  - la variabile viene inizializzata alla prima attivazione della funzione
  - conserva il suo valore tra attivazioni successive
  - è locale, quindi visibile solo all'interno della funzione in cui è dichiarata

  Esempio: Funzione che ritorna il numero di volte che è stata attivata.

```
int fun1(void) {
   static int conta = 0;
       /* variabile locale statica visibile solo in fun1;
          contatore del numero di attivazioni di fun1    */
   .....
   conta++;
   return conta;
   }
```

Schemi di programma: ricerca e verifica

- Molti problemi riguardano la ricerca di elementi in intervalli o la verifica di proprietà.
- Sviluppiamo schemi di programma dimostrabilmente corretti che realizzano la ricerca e la verifica.
- La soluzione di problemi concreti consiste poi nella sostituzione di alcuni parametri degli schemi con valori specifici dei problemi in esame.
- Distinguiamo due tipi di ricerca: ricerca certa e ricerca incerta.
  - **ricerca certa**: si vuole determinare il minimo elemento di un intervallo [a,b) per il quale vale una certa proprietà $\mathcal{P}$, sapendo che almeno un elemento dell'intervallo soddisfa $\mathcal{P}$.
  - **ricerca incerta**: si vuole determinare, se esiste, il minimo elemento di un intervallo [a,b) per il quale vale una certa proprietà $\mathcal{P}$.

Ricerca certa

- Intervallo di ricerca: [a,b)
- Proprietà: $\mathcal{P}(\cdot)$
- Ipotesi di certezza: $\exists$ i $\in$ [a,b) . $\mathcal{P}$(i)
- Stato finale:
  x = min { i$\in$ [a,b) | $\mathcal{P}$(i)}.
- Lo schema generale per risolvere il problema è il seguente:

```
int x;
x=a;
while (!P(x))
  x=x+1;
```

- Nota: l'estremo destro dell'intervallo non serve.
- Si assume che la proprietà $\mathcal{P}$ sia esprimibile nel linguaggio.

- Proprietà invariante del ciclo:
  $x \in [a, b) \wedge (\forall\, j \in [a,x).\ \neg\, \mathcal{P}(j))$
- In altre parole, tutti gli elementi che precedono il valore corrente di x non soddisfano la proprietà $\mathcal{P}$.
- Se il ciclo termina, all'uscita dal ciclo vale la congiunzione
  $x \in [a, b) \wedge (\forall\, j \in [a,x).\ \neg\, \mathcal{P}(j)) \ \wedge\ \mathcal{P}(x)$
  che implica esattamente quanto espresso dallo stato finale:
  $x = \min\ \{\, i \in [a,b) \mid \mathcal{P}(i)\}$
- Osserviamo che l'invariante vale banalmente alla prima iterazione, con x=a.
  $a \in [a, b) \wedge (\forall\, j \in [a,a).\ \neg\, \mathcal{P}(j))$

- Verifichiamo che la proprietà
  $x \in [a, b) \wedge (\forall\, j \in [a,x).\ \neg\, \mathcal{P}(j))$
  è invariante per il ciclo:

```
x=a;
while (!P(x))
  x=x+1;
```

- Sia S uno stato in cui valgono le seguenti proprietà (x^S indica il valore di x in S)
  1. $x^S \in [a, b) \wedge (\forall\, j \in [a,x^S).\ \neg\, \mathcal{P}(j))$
  2. $\neg\, \mathcal{P}(x^S)$

  ovvero uno stato prima di una nuova iterazione del ciclo.
- 1. e 2. implicano ovviamente
  $(\forall\, j \in [a,x^S+1).\ \neg\, \mathcal{P}(j))$
- Se riusciamo anche a dimostrare che
  $x^S + 1 \in [a, b)$
  abbiamo dimostrato che la proprietà è invariante, dal momento che $x^S + 1$ è proprio il valore di x dopo la nuova iterazione.

- Sappiamo:
  $x^S \in [a, b)$
- Supponiamo per assurdo
  $x^S + 1 \notin [a, b)$ ovvero $x^S + 1 = b$ (*)
- Abbiamo appena dimostrato
  $(\forall\, j \in [a, x^S+1).\ \neg\, \mathcal{P}(j))$
  che insieme con (*) implica
  $(\forall\, j \in [a, b).\ \neg\, \mathcal{P}(j))$
- Ciò contraddice l'ipotesi di certezza
  $\exists\, i \in [a, b)\ .\ \mathcal{P}(i)$
- Dunque, dopo la nuova iterazione vale ancora la proprietà invariante.

Funzione di terminazione: Tra le tante . . . $b-x$

Ricerca certa: esempio 1

- Calcolare la radice intera di un numero naturale.
- Si può esprimere come problema di ricerca certa:
  $\lfloor\sqrt{N}\rfloor = \min\{x \in [0,N+1) \mid x^2 \leq N < (x+1)^2\}$
- Dunque l'estremo sinistro dell'intervallo di ricerca, a nello schema, in questo caso è 0, mentre l'estremo destro, b nello schema, è N.
- Infine la proprietà $\mathcal{P}(x)$ dello schema è $N < (x+1)^2$

```
int x;
x=0;
while ((x+1)*(x+1) <= N)
  x=x+1;
```

Ricerca certa: esempio 2

- Determinare la posizione della prima occorrenza di un dato elemento in un array, sapendo che tale elemento vi occorrre almeno una volta.
- Indichiamo con vet l'array e con DIM la sua dimensione
- Vogliamo determinare:
  $x = \min\{i \in [0,DIM) \mid vet[i] = el\}$
- Possiamo istanziare lo schema come segue:

```
int x;
x=0;
while (vet[x]!=el)
  x=x+1;
```

Ricerca Incerta

- Si vuole determinare, se esiste, il minimo elemento di un intervallo [a,b) per il quale vale una certa proprietà $\mathcal{P}$.
- Perché lo schema di ricerca certa non va bene?

```
x=a;
while (!P(x))
  x=x+1;
```

- Se l'elemento non c'è si vanno ad esaminare valori di x che sono al di fuori dell'intervallo di ricerca e per i quali la la proprietà $\mathcal{P}$ potrebbe addirittura non essere definita (errore a tempo di esecuzione).

  Esempio: Nel caso della ricerca incerta di un elemento in un array di dimensione `DIM` si andrebbero ad esaminare elementi del tipo `vet[x]` con `x > DIM`.

- Abbiamo bisogno di modificare lo schema in modo che l'analisi degli elementi avvenga solo all'interno dell'intervallo di ricerca e che la ricerca venga interrotta una volta esaurito l'intervallo (e non individuato alcun elemento).

Ricerca incerta

- Intervallo di ricerca: [a,b)
- Proprietà: $\mathcal{P}(\cdot)$
- Stato finale: $x = \min\{i \in [a,b) \mid \mathcal{P}(i)\}$ *min* b

  $\Longrightarrow$ dobbiamo stabilire quale valore calcolare se nessun elemento dell'intervallo soddisfa $\mathcal{P}$: una buona scelta è il valore b, che sicuramente non fa parte dell'intervallo.

Ricerca incerta

- Utilizziamo una variabile booleana `trovato` che fa da sentinella

  $\Longrightarrow$ impone l'uscita dal ciclo non appena si individua un elemento che soddisfa la proprietà
- in congiunzione con la sentinella, la guardia del ciclo assicura che l'intervallo di ricerca non sia esaurito

```
int trovato = FALSE; /* inizialmente false */
int x=a;
while (!trovato && x<b)
  if (P(x))
    trovato = TRUE; /*x soddisfa P */
  else
    x=x+1;
```

- Si suppone che le costanti `TRUE` e `FALSE` siano state definite opportunamente, ad esempio mediante le direttive

```
#define FALSE 0
#define TRUE 1
```

- Anche in questo caso possiamo stabilire una proprietà invariante del ciclo, questa volta un po' più complicata:

$$x \in [a,b] \ \wedge \ (\forall\, j \in [a,x).\ \neg\mathcal{P}(j)) \ \wedge \ trovato \Rightarrow \mathcal{P}(x)$$

- È facile vedere che i valori iniziali di x e trovato soddisfano banalmente l'invariante
- Inoltre, al termine del ciclo abbiamo due casi:
  1. trovato $=$ TRUE $\wedge$ x$<$b: l'invariante e questa condizione implicano $x \in [a,b) \ \wedge \ (\forall\, j \in [a,x).\ \neg\mathcal{P}(j)) \ \wedge \ \mathcal{P}(x)$
  2. trovato$=$FALSE $\wedge$ x $\geq$ b: l'invariante e questa condizione implicano $x = b \ \wedge \ (\forall\, j \in [a,b).\ \neg\mathcal{P}(j))$
- Dunque possiamo controllare l'esito della ricerca analizzando il valore di trovato

- La dimostrazione formale di invarianza della proprietà vista è lasciata per esercizio
- **Funzione di terminazione**: anche in questo caso qualcosa del tipo
  $$b - x$$
  sembra ragionevole.
- Il problema (formale) è che in un solo caso il valore di x non cresce (e dunque $b-x$ non decresce) strettamente.
- L'individuazione di una corretta funzione di terminazione è lasciata per esercizio.

Ricerca incerta: esempio

- Determinare la prima occorrenza di un elemento in un array.
- È un problema di ricerca incerta:
  $\min \{x \in [0,\text{DIM}) \mid \text{vet}[x] = \text{el}\}$ *min DIM*

```
int trovato = FALSE;
int x=0;
while (!trovato && x<DIM)
  if (vet[x]==el)
    trovato = TRUE;
  else
    x=x+1;
```

- Vi sono situazioni in cui la proprietà $\mathcal{P}$ della ricerca (certa o incerta) non è direttamente esprimibile nel linguaggio.

  Esempio: Determinare (se c'è) la posizione del primo elemento di un array di interi che è uguale alla somma degli elementi che lo precedono.
- Si tratta di un problema di ricerca incerta in cui
  1. l'intervallo [a,b] è [0,DIM]
  2. la proprietà $\mathcal{P}(x)$ è

$$vet[x] = \sum_{j=0}^{x-1} vet[j]$$

```
int trovato = FALSE;
int x=0;
while (!trovato && x<DIM)
  if (vet[x]==∑_{j=0}^{x-1} vet[j])
    trovato = TRUE;
  else
    x=x+1;
```

- In questi casi si utilizza la seguente tecnica:
  1. si rimpiazzano le espressioni "critiche" con variabili
  2. si impone l'uguaglianza tra le variabili cosi' introdotte e le corrispondenti espressioni "critiche", aggiungendo quanto necessario al corpo del ciclo per mantenere vere tali uguaglianze
- si noti che formalmente 2. corrisponde a rafforzare opportunamente l'invariante.
- Nell'esempio:

```
int trovato = FALSE;
int x=0;
int sommaPrecedenti = 0;
while (!trovato && x<DIM)
  if (vet[x]==sommaPrecedenti)
    trovato = TRUE;
  else
    { sommaPrecedenti = sommaPrecedenti + vet[x];
      x=x+1;      }
```

- Quale è l'invariante del ciclo cosi' ottenuto?

$$x \in [0,\ DIM] \wedge (\forall\ j \in [0,x).\ vet[j] \neq \sum_{k=0}^{j-1} vet[k]) \ \wedge$$

$$trovato \Rightarrow vet[x] = \sum_{k=0}^{x-1} vet[k] \wedge$$

$$sommaPrecedenti = \sum_{k=0}^{x-1} vet[k]$$

- L'ultimo congiunto rappresenta il significato della variabile introdotta per esprimere la proprietà di ricerca $\mathcal{P}$.

Verifica di una proprietà

- Vogliamo verificare che tutti gli elementi di un intervallo soddisfano una certa proprietà $\mathcal{P}$.
  1. Facciamo una ricerca incerta del minimo elemento dell'intervallo per il quale non vale la proprietà $\mathcal{P}$
  2. Se non troviamo tale minimo, la verifica ha esito positivo, altrimenti ha esito negativo.
- Lo schema generale per risolvere questo problema.

```
int trovato = FALSE;
int x=a;
while (!trovato && x<b)
  if (!P(x))
    trovato = TRUE;
  else
    x=x+1;
if (trovato)
  /* esito negativo */
else
  /* esito positivo */
```