Corso “Programmazione 1”
Capitolo 06: Gli Array

Docente: Marco Roveri - marco.roveri@unitn.it
Esercitatori: Stefano Berlato - stefano.berlato-1@unitn.it
Marco Robol - marco.robol@unitn.it

C.D.L.: Informatica (INF)
A.A.: 2022-2023
Luogo: DISI, Università di Trento
URL: https://bit.ly/2VgfYwJ

Ultimo aggiornamento: 17 ottobre 2022

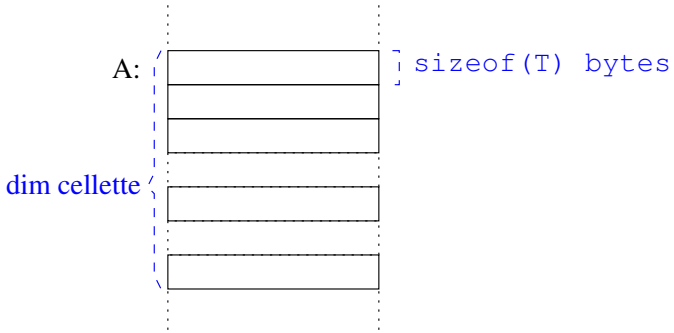
Terms of Use and Copyright

The material (text, figures) in these slides is authored mostly by Roberto Sebastiani, with contributions by Marco Roveri, Alessandro Armando, Enrico Giunchiglia e Sabrina Recla.

Outline

Tipi e Variabili Array

- Array: sequenza finita di elementi consecutivi dello stesso tipo.
- Il numero di elementi di un array (dimensione) è fissata a priori
- Per un array di tipo `T` e dimensione `dim`, il compilatore alloca `dim` cellette consecutive di **`sizeof`**`(T)` bytes (allocazione statica)
- Un array rappresenta l'indirizzo del primo elemento della sequenza



Definizione ed Inizializzazione di Array

- Sintassi definizione:
  - `tipo id[dim];`
  - `tipo id[dim]={lista_valori};`
  - `tipo id[]={lista_valori};`
- Esempi:

```
double a[25]; //array di 25 double
const int c=2;
char b[2*c]={'a','e','i','o'};  // dimensione 4
char d[]={'a','e','i','o','u'}; // dimensione 5
```

- La dimensione dell'array deve essere valutabile al momento della compilazione:
  - esplicitamente, tramite l'espressione costante `dim`
  - implicitamente, tramite la dimensione della lista di inizializzazione
- Se mancano elementi nella lista di inizializzazione, il corrispondente valore viene inizializzato allo zero del tipo T

Operazioni non lecite sugli array

- Sugli array non sono definite operazioni aritmetiche, di assegnamento, di input
- Le operazioni di confronto e di output sono definite, ma danno risultati imprevedibili

$\Longrightarrow$ per tutte queste operazioni è necessario scrivere funzioni ad-hoc

```
int a[4] = {1,2,3,4};
int b[4] = {1,2,3,4};
// a++;        // ERRORE IN COMPILAZIONE
// a=b;        // ERRORE IN COMPILAZIONE
// cin >> a;   // ERRORE IN COMPILAZIONE
cout << (a==b) << endl; // COMPILA, MA DA' FALSE
cout << (a<=b) << endl; // COMPILA, MA IMPREVEDIBILE
cout << a << endl;      // COMPILA, MA IMPREVEDIBILE
```

esempio di cui sopra, espanso:
{ ARRAY/array.cc }

Operazioni sugli array: selezione con indice

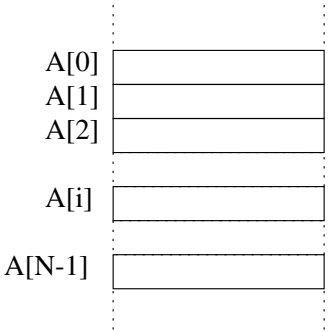
L'unica operazione definita sugli array è la selezione con indice (subscripting), ottenuta nella forma:

`identifier[expression]`

- `identifier` è il nome dell'array
- il valore di `expression`, è l'indice dell'elemento
  - è di tipo discreto (convertibile in intero)
- è un'espressione variabile!!
  Es: `v[100]` diversissimo da `v0,..,v99`, posso usare `v[i]`
- `identifier[expression]` è un'espressione dotata di indirizzo
  $\Longrightarrow$ può ricevere un input, essere assegnata, passata per riferimento, ecc.

```
cin >> a[i];
a[n+3]=3*2;
scambia(a[i],a[i+1]);
```

Range degli array



- Gli elementi di un array di dimensione N sono numerati da 0 a N-1
- Esempio: se `i` vale `3`, `a[i]=7` assegna il quarto elemento di `a` a 7

Esempi: uso di array e range

- lettura di un valore, stampa in ordine inverso:
  { `ARRAY/array2_mia.cc` }
- ... con errore sul range (problema tipico):
  { `ARRAY/array2_errata.cc` }
- `g++ -fsanitize=bounds -fsanitize=bounds-strict` può aiutare ad identificare a run-time la maggior parte dei casi di errore di array subscripting out of bounds!

Esempi: inizializzazione di array e range

- inizializzazione:
  { `ARRAY/array3.cc` }
- ... (errore: il range di un array inizia da 0):
  { `ARRAY/array3_err.cc` }
- ... senza esplicitazione della dimensione:
  { `ARRAY/array3_bis.cc` }
- inizializzazione a zero di default:
  { `ARRAY/array4.cc` }
- inizializzazione a tutti zero di default:
  { `ARRAY/array4_bis.cc` }
- vettore non inizializzato:
  { `ARRAY/array5.cc` }

Attenzione: Uscita dal range di un array

In C++, l'operatore "`[]`" permette di "uscire" dal range `0...dim-1` di un'array!

```
int A[dim]; int i=0;
A[i-1];   // cella sizeof(int) bytes prima di A[0]
A[i+dim]; // cella sizeof(int) bytes dopo A[dim-1]
```

$\Longrightarrow$ Effetti potenzialmente catastrofici in caso di errore

$\Longrightarrow$ È responsabilità del programmatore garantire che un operazione di subscripting non esca mai dal range di un'array!

- Esempio:
  errore, fuori range: catastrofico: va a sovrascrivere una variabile ma non rivelato!
  (usare `-fno-stack-protector`):
  { `ARRAY/array3_errato.cc` }

Funzione con parametri di tipo array

- Una funzione può avere un parametro formale del tipo "array di T"
  - Es: `float sum(float v[],int n) {...}`
  - tipicamente si omette la dimensione ("`float v[]`", non "`float v[dim]`")
  - tipicamente associato al numero di elementi effettivamente utilizzati (dimensione virtuale)
- Il corrispondente parametro attuale è un array di oggetti di tipo `T`
  - Es:

```
float a[DIM]; int n;
(...)
x = sum(a,n);
```

- Nel passaggio, gli elementi dell'array non vengono copiati
  - N.B. viene copiato solo l'indirizzo del primo elemento
  - Equivalente a passare gli elementi dell'array per riferimento
  - È possibile impedire di modificarli usando la parola chiave **`const`**

Nota

Con allocazione statica di array, tipicamente si definiscono array sufficientemente grandi, e poi se ne usa di volta in volta solo una parte.

Passaggio di parametri array costanti

- È possibile definire passaggi di array in sola lettura (passaggio di array costante)
  - Sintassi: `(const tipo identificatore [], ...)`
  - Es: `int print(const int v[],...) (...) {...}`
- Passaggio di array: il contenuto dell'array non viene duplicato
  $\Longrightarrow$ evito possibile spreco di tempo CPU e memoria
- Non permette di modificare gli elementi di `v`!
  - Es: `v[3] = 5; //ERRORE!`
  - $\Longrightarrow$ passaggio di informazione solo dalla chiamante alla chiamata
  - $\Longrightarrow$ solo un input alla funzione
- Usato per passare array in input alla funzione
  - efficiente (no spreco di CPU e memoria)
  - evita errori
  - permette di individuare facilmente gli input della funzione

Esempi

- passaggio di vettori, i/o di vettori, norma 1, somma, concatenazione di vettori: { ARRAY/leggimanipolaarray.cc }

Nota

Se `arr` è un parametro di tipo array di `Type` di una funzione
$\Longrightarrow$ **`sizeof`**`(arr)` = **`sizeof`**`(Type *)`.

```
void addElement(int arr[], int &d, const int x, const int p, const int N) {
  cout << "Array␣of␣size:␣" << sizeof(arr)/sizeof(int) << endl;
  // Su macchina a 64bit stampa 2 indipendentemente da size di array passato!
  cout << "============================" << endl;
  cout << "Adding␣" << x << "␣at␣position␣" << p << endl;
  if (p >= 0 && p <= d && d < N) {
    for(int i = d; i > p; i--)
      arr[i] = arr[i-1];
    arr[p] = x;
    d++;
  }
}
// ARRAY/sizeof.cc
```

Array e funzioni ricorsive

- E frequente effettuare operazioni ricorsive su array
  - Tipicamente il parametro di ricorsione definisce il range dei sotto-array correntemente analizzati
- somma di array 1 :
  { `ARRAY/array_rec1_nocomment.cc` }
- ..., chiamate tracciate:
  { `ARRAY/array_rec1.cc` }
- somma di array 2 :
  { `ARRAY/array_rec2_nocomment.cc` }
- ..., chiamate tracciate:
  { `ARRAY/array_rec2.cc` }
- somma di array 3 :
  { `ARRAY/array_rec3_nocomment.cc` }
- ..., chiamate tracciate:
  { `ARRAY/array_rec3.cc` }

Esercizi proposti

Vedere file `ESERCIZI_PROPOSTI.txt`

Problema: ricerca di un elemento in un array

Quanti passi richiede in media il cercare un elemento in un array di N elementi?

- Con un array generico:
  - $\approx N/2$ se l'elemento è presente, $\approx N$ se non è presente

  $\Longrightarrow$ $O(N)$ (un numero proporzionale ad N)
  - ES: $N = 1.000.000 \Longrightarrow \leq 1.000.000$ passi
  - Ricerca lineare:
    { `SORT/linear_search.cc` }
- Su un array ordinato:
  - $\leq \lceil log_2(N) \rceil$ se l'elemento è presente, $\lceil log_2(N) \rceil$ se non è presente

  $\Longrightarrow$ $O(log_2(N))$ (un numero proporzionale al logaritmo di N)
  - ES: $N = 1.000.000 \Longrightarrow \leq 20$ passi
  - Ricerca binaria:
    { `SORT/binary_search.cc` }
  - ... versione ricorsiva:
    { `SORT/binary_search_rec.cc` }

$\Longrightarrow$ In molte applicazioni, è vitale mantenere un array ordinato

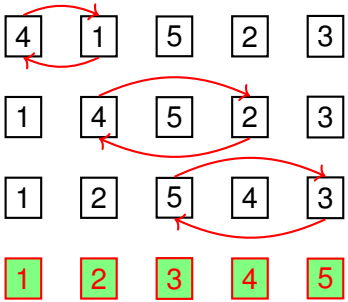
Metodi di ordinamento

Moltissimi metodi di ordinamento

- Selection sort
- Insertion sort
- Bubble sort
- Quick sort
- ...

Ordinamento per selezione: Selection Sort

- Cerco elemento più piccolo dell'array e lo scambio con il primo elemento dell'array.
- Cerco il secondo elemento più piccolo dell'array e lo scambio con il secondo elemento dell'array.
- Proseguo in questo modo fintanto che l'array non è ordinato.



Selection sort:
{ SORT/selection_sort.cc }

Ordinamento per selezione: Selection Sort

```
void selectionsort(int A[], int N) {
  for (int i = 0; i < N - 1; i++) {
    int min = i;
    for(int j = i + 1; j < N; j++) // cerco elemento piu'
                                   // piccolo nella parte di
                                   // array ancora da ordinare
       if (A[j] < A[min]) min = j;
    swap(A[i], A[min]); // scambio elemento trovato
                        // con elemento dell'array
                        // ancora da ordinare
  }
}
```

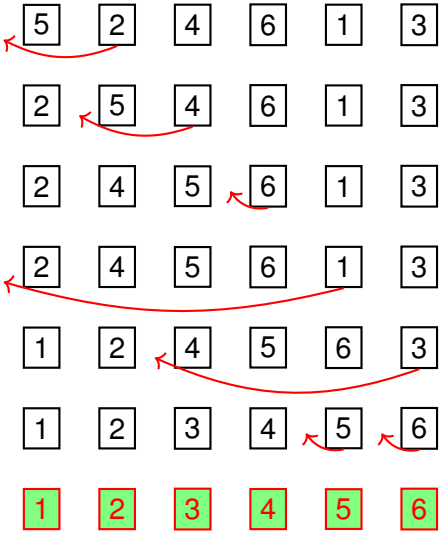
Ordinamento per selezione: Selection Sort

Selection sort

- Relativamente semplice:
- $O(N^2)$ passi in media
- ES: $N = 1.000.000 \Longrightarrow \leq 1.000.000.000.000 = 10^{12}$ passi (!)

Ordinamento per inserzione: Insertion Sort

- È il metodo usato dai giocatori di carte per ordinare in mano le carte.
- Considero un elemento per volta e lo inserisco al proprio posto tra quelli già considerati (mantenendo questi ultimi ordinati).
  - L'elemento considerato viene inserito nel posto rimasto vacante in seguito allo spostamento di un posto a destra degli elementi più grandi.



Insertion sort:
{ SORT/insertion_sort.cc }

Ordinamento per inserzione : Insertion sort

```
void insertsort( int A[], int N) {
   for(int i = N-1; i > 0; i--)  // porto elemento
                                 // piu' piccolo in A[0]
       if (A[i] < A[i-1]) swap(A[i], A[i-1]);
   for(int i = 2; i <= N-1; i++) {
      int j = i;
      int v = A[i];
      while( v < A[j-1] ) {
         A[j] = A[j-1]; j--;
      }
      A[j] = v;
   }
 }
```

Ordinamento per inserzione: Insertion Sort

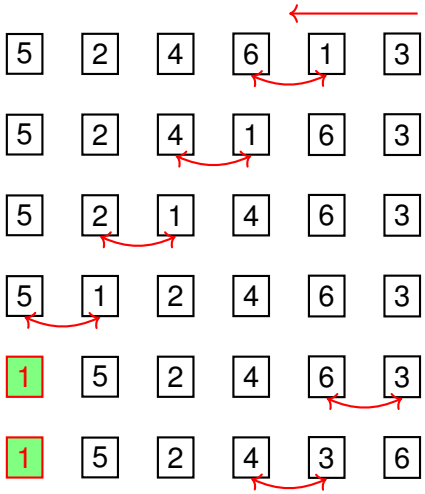
Insertion sort

- Relativamente semplice:
- $O(N^2)$ passi in media
- ES: $N = 1.000.000 \Longrightarrow \leq 1.000.000.000.000 = 10^{12}$ passi (!)

Ordinamento a bolle: Bubble Sort

- Si basa su scambi di elementi adiacenti se necessari, fino a quando non è più richiesto alcuno scambio e l'array risulta ordinato.

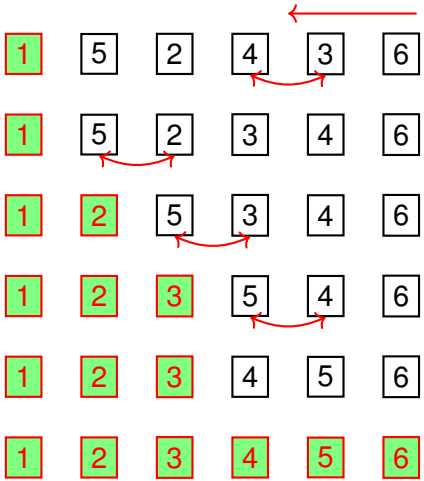
bubble sort:
{ SORT/bubblesort_nocomment.cc }



Ordinamento a bolle: Bubble Sort

- Si basa su scambi di elementi adiacenti se necessari, fino a quando non è più richiesto alcuno scambio e l'array risulta ordinato.

bubble sort:
{ SORT/bubblesort_nocomment.cc }



Metodi di ordinamento: Bubblesort

Bubblesort

- Relativamente semplice:
- $O(N^2)$ passi in media
- ES: $N = 1.000.000 \Longrightarrow \leq 1.000.000.000.000 = 10^{12}$ passi (!)

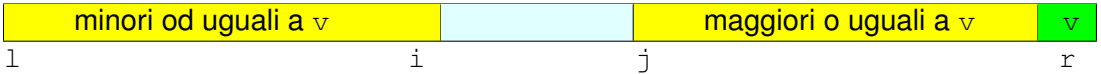
- bubblesort semplice:
  { `SORT/bubblesort_nocomment.cc` }
- ... con passi tracciati:
  { `SORT/bubblesort.cc` }
- bubblesort ottimizzato:
  { `SORT/bubblesort_opt.cc` }

Ordinamento QuickSort

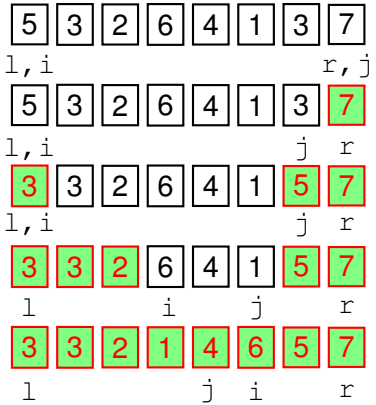
- È un algoritmo di ordinamento del tipo divide et impera.
- Si basa su un processo di partizionamento dell'array in modo che le seguenti tre condizioni siano verificate:
  - Per qualche valore di `i`, l'elemento `A[i]` si trova al posto giusto.
  - Tutti gli elementi `A[0],...,A[i-1]` sono minori od uguali ad `A[i]`.
  - Tutti gli elementi `A[i+1],...,A[N-1]` sono maggiori od uguali ad `A[i]`.
- L'array è ordinato partizionando ed applicando ricorsivamente il metodo ai sotto array.

Ordinamento QuickSort (II)

- Scegliamo arbitrariamente un elemento (e.g. `A[r]`), che chiameremo pivot (o elemento di partizionamento).
- Scandiamo l'array dall'estremità sinistra fino a quando non troviamo un elemento `A[i] <= A[r]`.
- Scandiamo l'array dall'estremità destra fino a che non troviamo un elemento `A[j] >= A[r]`.
- Scambiamo `A[i]` e `A[j]`, e iteriamo.
- Procedendo in questo modo si arriva ad una situazione in cui tutti gli elementi a sinistra di `i` sono minori di `A[r]`, mentre quelli a destra di `j` sono maggiori di `A[r]`.



Ordinamento QuickSort (III)



- Partizioniamo a partire da `A[0] = 5`.
- Gli elementi dell'array precedenti ad `A[i]` sono minori od uguali a `5`.
- Gli elementi dopo `A[j]` sono maggiori od uguali a `5`.
- Ripartizioniamo i sotto array da `l` a `i-1`, e da `i+1` a `r`.

Algoritmo QuickSort: (IV)

```
int partition(int A[],
              int l, int r) {
  int i = l-1, j = r, v = A[r];
  while (true) {
    while (A[++i] < v);
    while (v < A[--j])
       if (j == l) break;
    if (i >= j) break;
    swap(A[i],A[j]);
  }
  swap(A[i],A[r]);
  return(i);
}
```

```
void quicksort(int A[], int N) {
  quicksort_aux(A, 0, N-1);
}

void quicksort_aux(int A[],
                   int l,
                   int r) {
   if  (r <= l) return;
   int i = partition(A, l, r);
   quicksort_aux(A, l, i-1);
   quicksort_aux(A, i+1, r);
}
```

Metodi di ordinamento: Quicksort

Quicksort

- Complesso
- $O(N \cdot log_2(N))$ passi in media
- ES: $N = 1.000.000 \Longrightarrow \leq 20.000.000 = 2 * 10^7$ passi

- quicksort semplice:
  { `SORT/quicksort_nocomment.cc` }
- ... con passi tracciati:
  { `SORT/quicksort.cc` }
- quicksort, con randomizzazione:
  { `SORT/quicksort_rand.cc` }

Nota

Quicksort algoritmo intrinsecamente ricorsivo!

Algoritmo di ordinamento: Shell Sort

- La lentezza dell'algoritmo Insertion Sort risiede nel fatto che le operazioni di scambio avvengono solo tra elementi contigui.
  - Esempio: se l'elemento più piccolo è in fondo all'array, occorrono N scambi per posizionarlo al posto giusto.
- Per migliorare questo algoritmo è stato pensato l'algoritmo Shell Sort.
- L'idea è quella di organizzare l'array in modo che esso soddisfi la proprietà per cui gli elementi aventi tra loro distanza `h` costituiscono una sequenza ordinata, indipendentemente dall'elemento di partenza.
  - Se si applica l'algoritmo con una sequenza di `h` che termina con `1`, si ottiene un file ordinato.

```
void ShellSort(int A[],
               int l, int r)
  int h;
  for(h = 1; h <= (r-1)/9;
             h = 3*h+1);
  for( ; h > 0; h /= 3)
   for(int i = l+h;
         i <= r; i++) {
     int j = i;
     int v = A[i];
     while((j >= l + h) &&
           (v < A[j-h])) {
       A[j] = a[j-h];
       j = j - h;
     }
     A[j] = v;
   }
}
```

Metodi di ordinamento: Shell Sort

Shell Sort

- L'implementazione proposta $O(N^{3/2})$ passi in media
- ES: $N = 1.000.000 \Longrightarrow \leq 1.000.000.000 = 10^9$ passi (!)
- Usando sequenze particolari di `h` si possono ottenere prestazioni diverse (e.g. $O(N \cdot log_2(N)^2)$.

Metodi di ordinamento: Algoritmi a confronto

Algoritmo	$O(..)$
Selection sort	$O(N^2)$
Insertion sort	$O(N^2)$
Bubblesort sort	$O(N^2)$
Quick sort	$O(N \cdot log_2(N))$
Shell sort	$O(N^{3/2})$
Merge sort*	$O(N \cdot log_2(N))$

* Da cercare e implementare come esercizio

Algoritmi di sorting a confronto:
{ SORT/sorting_all.cpp }

Altre operazioni su array ordinati

Fusione ordinata di due array ordinati (merging)

- ES: *merge*([1 3 4 8], [2 3 5 6]) $\implies$ [1 2 3 3 4 5 6 8]
- $O(N_1 + N_2)$
- merging:
  { `SORT/merge.cc` }

Inserimento di un elemento in un array ordinato

- ES: *insert*, 5, [1 3 4 8]) $\implies$ [1 3 4 5 8]
- $O(N)$
- Equivalente a *merge*([5], [1 3 4 8])

Esercizi proposti

Vedere file `ESERCIZI_PROPOSTI.txt`

Array multidimensionali

- In C++ è possibile dichiarare array i cui elementi siano a loro volta degli array, generando degli array multidimensionali (matrici)
- Sintassi:

```
tipo id[dim1][dim2]...[dimN];
tipo id[dim1][dim2]...[dimN]={lista_valori};
tipo id[][dim2]...[dimN]={lista_valori};
```

$\Longrightarrow$ un array multidimensionale $dim_1 \cdot ... \cdot dim_n$ può essere pensato come un array di dim_1 array multidimensionali $dim_2 \cdot ... \cdot dim_n$

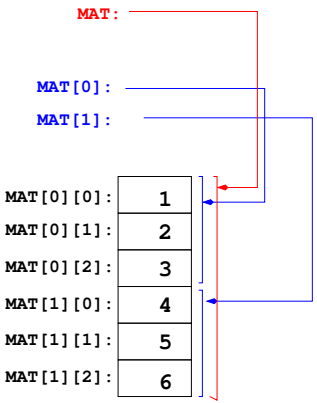
- Esempio:

```
int MAT[2][3];
int MAT[2][3] = {{1, 2, 3}, {4, 5, 6}};
int MAT[][3]  = {{1, 2, 3}, {4, 5, 6}};
```

- Le dimensioni devono essere valutabili durante la compilazione
- Elementi mancanti in inizializzazione (se presente) vengono sostituiti da zeri

Struttura di un array bidimensionale (statico)

```
int MAT[2][3] = {{1,2,3},{4,5,6}};
```



Esempio matrice statica:

{ MATRICI/matrix_sta.cc }

Esempi: inizializzazione di array bidimensionali

- con inizializzazione:
  { `MATRICI/def_mat1.cc` }
- con inizializzazione parziale:
  { `MATRICI/def_mat2.cc` }
- con inizializzazione parziale (2):
  { `MATRICI/def_mat3.cc` }
- con inizializzazione, senza specifica prima dimensione:
  { `MATRICI/def_mat4.cc` }
- inizializzazione: errore:
  { `MATRICI/def_mat5.cc` }

Esempi: passaggio di array bidimensionali a funzioni

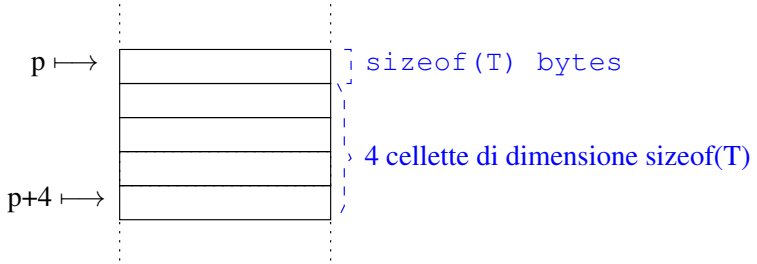
- solo una dimensione fissa, utilizzate in parte:
  { `MATRICI/matrix3.cc` }
- Err: (è necessario passare la dimensione):
  { `MATRICI/matrix3_err.cc` }

Aritmetica di Puntatori ed Indirizzi (richiamo)

Gli indirizzi e i puntatori hanno un'aritmetica:
se `p` è di tipo `*T` e `i` è un intero, allora:

- `p+i` è di tipo `*T` ed è l'indirizzo di un oggetto di tipo `T` che si trova in memoria dopo `i` posizioni di dimensione **`sizeof`**`(T)`
- analogo discorso vale per `p++, ++p, p--, --p, p+=i`, ecc.

$\Longrightarrow$ `i` viene implicitamente moltiplicato per **`sizeof`**`(T)`

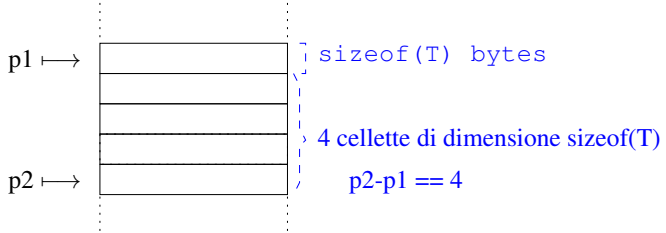


Aritmetica di Puntatori ed Indirizzi (richiamo) II

se `p1, p2` sono di tipo `*T`, allora:

- `p2-p1` è un intero ed è il numero di posizioni di dimensione **`sizeof`**`(T)` per cui `p1` precede `p2` (negativo se `p2` precede `p1`)
- si possono applicare operatori di confronto `p1<p2`, `p1>=p2`,ecc.

$\Longrightarrow$ `p2-p1` viene implicitamente diviso per **`sizeof`**`(T)`

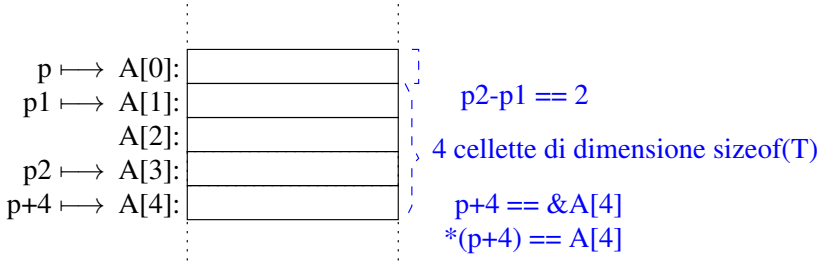


Esempio di operazioni aritmetiche su puntatori (richiamo):

{ `ARRAY_PUNT/aritmetica_punt.cc` }

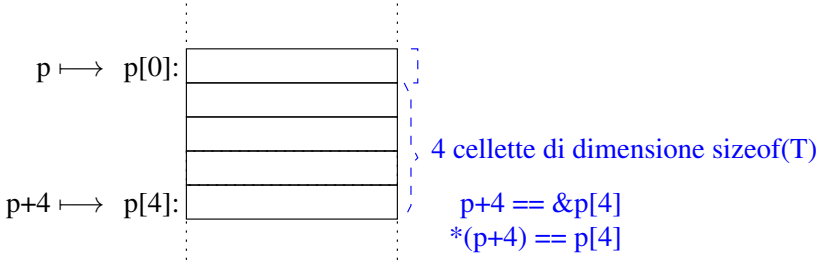
Puntatori ad elementi di un array

- Se un puntatore `p` punta al primo elemento di un array `A`, l'espressione `p+i` è l'indirizzo dell'i-esimo elemento dell'array `A`
  $\Longrightarrow$ valgono `p+i == &(A[i])` e `*(p+i) == A[i]`
- Se due puntatori dello stesso tipo `p1,p2` puntano ad elementi di uno stesso array, `p2-p1` denota il numero di elementi compresi tra `p1` e `p2` (`p2-p1` negativo se `p2` precede `p1`)



Array e puntatori

- Il nome di un array è (implicitamente equivalente a) una costante puntatore al primo elemento dell'array stesso
- se `p` è il nome di puntatore o di un array, le espressioni `&p[i]` e `p+i` sono equivalenti, come lo sono `p[i]` e `*(p+i)`



Esempi

- relazione tra array e puntatori:
  { `ARRAY_PUNT/punt_vett.cc` }
- idem, con doppio avanzamento:
  { `ARRAY_PUNT/punt_vett1.cc` }
- scansione array con puntatori:
  { `ARRAY_PUNT/scansione_array.cc` }
- ..., variante:
  { `ARRAY_PUNT/scansione_array2.cc` }

Passaggio di Array tramite Puntatore

- Nelle chiamate di funzioni viene passato solo l'indirizzo alla prima locazione dell'array,

$\Longrightarrow$ un parametro formale array può essere specificato usando indifferentemente la notazione degli array o dei puntatori

- Le seguenti scritture sono equivalenti (array semplici):

```
int f(int arr[dim]);
int f(int arr[]);
int f(const int *arr);
```

- Le seguenti scritture sono equivalenti (array multi-dimensionali):

```
int f(int arr[dim1][dim2]...[dimN]);
int f(int arr[][dim2]...[dimN]);
int f(const int *arr[dim2]...[dimN]);
```

Esempi

- array passati come tali (richiamo):
  { `ARRAY_PUNT/concatena_array.cc` }
- ... passati come puntatori:
  { `ARRAY_PUNT/concatena_array1.cc` }
- ... passati e manipolati come puntatori:
  { `ARRAY_PUNT/concatena_array2.cc` }
- passaggio con par. attuale puntatore, par. formale array:
  { `ARRAY_PUNT/concatena_array3.cc` }

Restituzione di un Array

Problema importante

Una funzione può restituire un array (allocato staticamente)?

- Sì, ma solo se è allocato staticamente esternamente alla funzione!
  (es. parametro formale, array globale)
- No, se è allocato staticamente internamente alla funzione!

- corretta, restituisce array parametro formale:
  { `ARRAY_PUNT/restituzione_array.cc` }
- corretta, restituisce array globale:
  { `ARRAY_PUNT/restituzione_array1.cc` }
- compila, ma fa disastri:
  { `ARRAY_PUNT/err_restituzione_array2.cc` }

Esercizi proposti

Vedere file `ESERCIZI_PROPOSTI.txt`