AA 2014-2015

19. Semantica dei linguaggi di programmazione e runtime support

Semantica e supporto a run time

- Le differenze fra i linguaggi di programmazione si riflettono in differenze nelle corrispondenti implementazioni
- Tutte le caratteristiche importanti per progettare un interprete o un supporto a tempo di esecuzione si possono ricavare analizzando la semantica operazionale del linguaggio

La nostra visione: semantiche “eseguibili”

- OCaml come metalinguaggio per esprimere la semantica dei linguaggi di programmazione
  - semantiche eseguibili che ci permettono di analizzare e valutare tutte le caratteristiche dei diversi paradigmi di programmazione e dei loro meccanismo di implementazione

E i dati?

A cosa servono?

- *Livello di progetto*: organizzano l'informazione
  - tipi diversi per concetti diversi
  - meccanismi espliciti dei linguaggi per l'astrazione sui dati (ad esempio classi e oggetti)

- *Livello di programma*: identificano e prevengono errori
  - i tipi sono controllabili automaticamente
  - costituiscono un "controllo dimensionale"
    - ✓ l'espressione **3+"pippo"** deve essere sbagliata

- *Livello di implementazione*: permettono alcune ottimizzazioni
  - bool richiede meno bit di real
  - strumenti per fornire informazioni necessarie alla macchina astratta per allocare spazio di memoria

Dati: classificazione

- ***Denotabili***: se possono essere associati ad un nome
- ***Esprimibili***: se possono essere il risultato della valutazione di una espressione complessa (diversa dal semplice nome)
- ***Memorizzabili***: se possono essere memorizzati in una variabile

Esempio: le funzioni in ML (puro)

- Denotabili
  - let plus (x, y) = x + y
- Esprimibili
  - let plus = function(x: int) -> function(y:int) -> x + y
- Memorizzabili
  - NO

Tipi

- Un tipo è una collezione di valori dotata di un insieme di operazioni per manipolare tali valori
  - la distinzione tra collezioni di valori che sono tipi o non sono tipi è una nozione che dipende dal linguaggio di programmazione

Sistema di tipi

- I linguaggi moderni prevedono di associare tipi con i valori manipolati dai costrutti linguistici
- ***Sistema di tipi***: il complesso delle informazioni che regolano i tipi nel linguaggio di programmazione
  - tipi predefiniti
  - meccanismi per definire e associare un tipo ai costrutti
  - regole per definire equivalenza, compatibilità e inferenza

Sistema di tipi

- Un sistema di tipi per un linguaggio è detto ***type safe*** quando nessun programma può violare le distinzioni tra i tipi del linguaggio
  - nessun programma durante l'esecuzione può generare un errore che derivi da una violazione di tipo

Type checking

- Strumento che assicura che un programma segue le regole di compatibilità dei tipo
- Un linguaggio è **strongly typed** se evita l'uso non conforme ai tipi richiesti delle operazioni del linguaggi
- Un linguaggio è ***statically typed*** se è *strongly typed* e il controllo dei tipi viene fatto staticamente
- Un linguaggio è ***dynamically typed*** se il controllo dei tipi viene fatto a run time

Regole di type checking

- ***Regole di tipo*** definiscono quando un costrutto del linguaggio soddisfa i requisti di tipo

$$\frac{tenv \triangleright ehrs \Rightarrow tval \quad tenv[tval\,/\,x] \triangleright ebody \Rightarrow t}{tenv \triangleright \text{Let x = erhs in ebody} \Rightarrow t}$$

Inferenza di tipo

- **Type inference:** il meccanismo di inferenza di tipi consente di dedurre il tipo associato a un programma senza bisogno di dichiarazioni esplicite
- OCaml

```
# let revPair (x, y) = (y, x);;
val revPair : 'a * 'b -> 'b * 'a = <fun>
```

Come opera l'inferenza?


```
# let f x = 2 + x ;;
val f : int -> int = <fun>
```

1. Quale è il tipo di f?
2. L'operatore + ha due tipi
   int → int → int,
   real → real → real,
3. La costante 2 è di tipo int
4. Questo ci permette di concludere che + : int → int → int
5. Dal contesto di uso deriviamo che x: int
6. In conclusione f(x: int) = 2 + x ha tipo int → int

L'ALGORITMO EFFETTIVO DI ML È PIÙ COMPLESSO

Storia più articolata

- L'algoritmo di inferenza di tipo è stato introdotto da Haskell Curry e Robert Feys per il lambda calcolo tipato semplice nel 1958
- Nel 1969, Roger Hindley ha esteso l'algoritmo dimostrando che restituisce il tipo più generale
- Nel 1978 Robert Milner introduce in modo indipendente un algoritmo, denominato W, per il linguaggio ML; l'algoritmo è in seguito dimostrato essere equivalente a quello proposto da Hindley
- Nel 1982 Luis Damas dimostra la completezza dell'algoritmo per ML

Inferenza di tipo e type checking

- Java, C, and C++, C# utilizzano un meccanismo di type checking
  - le annotazioni di tipo sono espliciti
- ML, OCaml, F#, Haskell utilizzano l'inferenza di tipo (ma lo usano anche C# 3.0 e Visual Basic .Net 9.0)
  - Il compilatore determina il tipo più generale (*the most general type)*

Statico vs dinamico

- JavaScript: controllo di tipo dinamico

```
js> var f= 3;
js> f(2);
typein:3: TypeError: f is not a function
js>
```

- ML: controllo di tipo statico

  f(x) f : A → B <fun> e x : A

Controlli statici e dinamici

- ***Controllo dinamico***: la macchina astratta deve controllare che ogni operazione sia applicata a operandi del tipo corretto
  - overhead in esecuzione
- ***Controllo statico***: i controlli vengono effettuati dal compilatore prima della generazione del codice
  - efficienza dovuta all'analisi statica
  - prezzo da pagare: progettazione del linguaggio e compilazione più lenta

Ancora statico vs. dinamico

- Consideriamo il seguente frammento di programma (ML-like)

```
let x = 1 in
  if (0 = 1) then x = "errore"
  else x = 5
```

- Il frammento non causa alcun errore per l'uso scorretto della variabile x
- il sistema di tipi di ML invece lo segnala come non corretto

Decidibilità

- Esiste un metodo generale per stabilire se un programma determina un errore di tipo?

```
int X;
P; //invocazione della procedura P
X = "errore";
```

- Se esistesse, lo potremmo applicare al nostro semplice programma…
- …e ciò implicherebbe poter decidere della "terminazione" di P, che NON è decidibile

Linguaggi e tipi

- **OCaml**: *strongly typed* e la maggior parte dei controlli è statica
- **Java**: *strongly typed* ma con controlli a run-time
- **C** difficilmente fa controlli a run-time
- I linguaggi di scripting moderni (**Python, JavaScript**) sono fortementi tipati con controllo dinamico

Polimorfismo

- Idea di base è fare in modo che una operazione possa essere applicata a un insieme di tipi
- OCaml supporta il polimorfismo parametrico staticamente mediante un meccanismo per l'inferenza di tipo
- Polimorfismo di sottotipo: una variabile X di tipo T può essere usata in tutti quei contesti nei quali è previsto un tipo T' derivato da T
  - C++, Java, Eiffel, C#

Analisi

- Polimorfismo paramerico (ML)
  - uno stesso algoritmo (codice) può avere molti tipi (basta rimpiazzare le variabili di tipo)
    - ✓se f: t→t allora f: int→int, f: bool→bool, ...
- Polimorfismo da sottotipo
  - uno stesso simbolo può fare riferimento a algoritmi differenti
  - la scelta dell'algoritmo effettivo da eseguire è determinata dal contesto dei tipi
  - tipi associati ai nomi possono essere differenti
    - ✓+ ha tipo int*int→int, real*real→real

Tipi di dato di sistema e di programma

- In una macchina astratta (e in una semantica) si possono vedere due classi di tipi di dato (o domini semantici)
  - i *tipi di dato di sistema*
    - ✓definiscono lo stato e le strutture dati utilizzate nella simulazione di costrutti di controllo
  - i *tipi di dato di programma*
    - ✓domini corrispondenti ai tipi primitivi del linguaggio e ai tipi che l'utente può definire (se il linguaggio lo consente)
- Tratteremo insieme le due classi anche se il componente "dati" del linguaggio comprende ovviamente solo i tipi di dato di programma

Cos'è un tipo di dato e cosa vogliamo sapere di lui

- Un TD è una collezione di valori
  - rappresentati da opportune strutture dati e un insieme di operazioni per manipolarli
- Come sempre ci interessano due livelli
  - semantica
  - implementazione

I descrittori di dato

- Obiettivo: rappresentare una collezione di valori utilizzando quanto ci viene fornito da un linguaggio macchina
  - un po' di tipi numerici, caratteri
  - sequenze di celle di memoria
- Qualunque valore della collezione è alla fine una stringa di bit
- Problema: per poter riconoscere il valore e interpretare correttamente la stringa di bit
  - è necessario (in via di principio) associare alla stringa un'altra struttura che contiene la descrizione del tipo (*descrittore di dato*), che viene usato ogniqualvolta si applica al dato un'operazione
    - ✓ per controllare che il tipo del dato sia quello previsto dall'operazione (type checking "dinamico")
    - ✓ per selezionare l'operatore giusto per eventuali operazioni overloaded

Tipi a tempo di compilazione e a tempo di esecuzione

1. Se l'informazione sui tipi è conosciuta completamente "a tempo di compilazione" (OCaml)
   1. si possono eliminare i descrittori di dato
   2. il type checking è effettuato totalmente dal compilatore (type checking statico)
2. Se l'informazione sui tipi è nota solo "a tempo di esecuzione" (JavaScript)
   1. sono necessari i descrittori per tutti i tipi di dato
   2. il type checking è effettuato totalmente a tempo di esecuzione (type checking dinamico)
3. Se l'informazione sui tipi è conosciuta solo parzialmente "a tempo di compilazione" (Java)
   1. i descrittori di dato contengono solo l'informazione "dinamica"
   2. il type checking è effettuato in parte dal compilatore e in parte dal supporto a tempo di esecuzione

Tipi scalari

Tipi scalari (esempi)

- Booleani
  - val: true, false
  - op: or, and, not, condizionali
  - repr: un byte
  - note: C non ha un tipo bool
- Caratteri
  - val: a,A,b,B, …, è,é,ë, ; , ‘, …
  - op: uguaglianza; code/decode; dipendenti dal ling.
  - repr: un byte (ASCII) o due byte (UNICODE)

Tipi scalari (esempi)

- Interi
  - val: 0,1,-1,2,-2,…,maxint
  - op: +, -, *, mod, div, …
  - repr: alcuni byte (2 o 4); complemento a due
  - note: interi e interi lunghi (anche 8 byte); limitati problemi nella portabilità quando la lunghezza non è specificata nella definizione del linguaggio
- Reali
  - val: valori razionali in un certo intervallo
  - op: +, -, *, /, …
  - repr: alcuni byte (4); virgola mobile
  - note: reali e reali lunghi (8 byte); gravi problemi di portabilità quando la lunghezza non è specificata nella definizione del linguaggio

Tipi scalari (esempi)

- Il tipo `void`
  - ha un solo valore
  - nessuna operazione
  - serve per definire il tipo di operazioni che modificano lo stato senza restituire alcun valore

```
void f (…) {…}
```

  - il valore restituito da f di tipo `void` è sempre il solito (e dunque non interessa)

Tipi compositi

- Record
  - collezione di campi (field), ciascuno di un (diverso) tipo
  - un campo è selezionato col suo nome
- Record varianti
  - record dove solo alcuni campi (mutuamente esclusivi) sono attivi a un dato istante
- Array
  - funzione da un tipo indice (scalare) ad un altro tipo
  - array di caratteri sono chiamati stringhe; operazioni speciali
- Insieme
  - sottoinsieme di un tipo base
- Puntatore
  - riferimento (*reference*) ad un oggetto di un altro tipo

Record

- Introdotti per manipolare in modo unitario dati di tipo eterogeneo
- C, C++, CommonLisp, Ada, Pascal, Algol68
- Java: non ha tipi record, sussunti dalle classi
- Esempio in C

```
struct studente {
    char nome[20];
    int matricola; };
```

- Selezione di campo

```
studente s;
s.matricola = 343536;
```

- Record possono essere annidati
- Memorizzabili, esprimibili e denotabili
  - ✓ Pascal non ha modo di esprimere “un valore record costante”
  - ✓ C lo può fare, ma solo nell’inizializzazione (initializer)
  - ✓ uguaglianza generalmente non definita (contra: Ada)

Record: implementazione

- Memorizzazione sequenziale dei campi
- Allineamento alla parola (16/32/64 bit)
  - spreco di memoria
- Pudding o packed record
  - disallineamento
  - accesso più costoso

Record: implementazione


```
struct x_
{
   char a;      // 1 byte
   int b;       // 4 byte
   short c;     // 2 byte
   char d;      // 1 byte
};
```

L'allineamento alla parola determina uno spreco di occupazione di memoria

Record: implementazione


```
// effettivo “memory layout” (C COMPILER)
struct x_{
char a;          // 1 byte
char _pad0[3]; // padding 'b' su 4 byte
int b;           // 4 byte
short c;         // 2 byte
char d;          // 1 byte
char _pad1[1]; // padding sizeof(x_)
                 // multiplo di 4
}
```

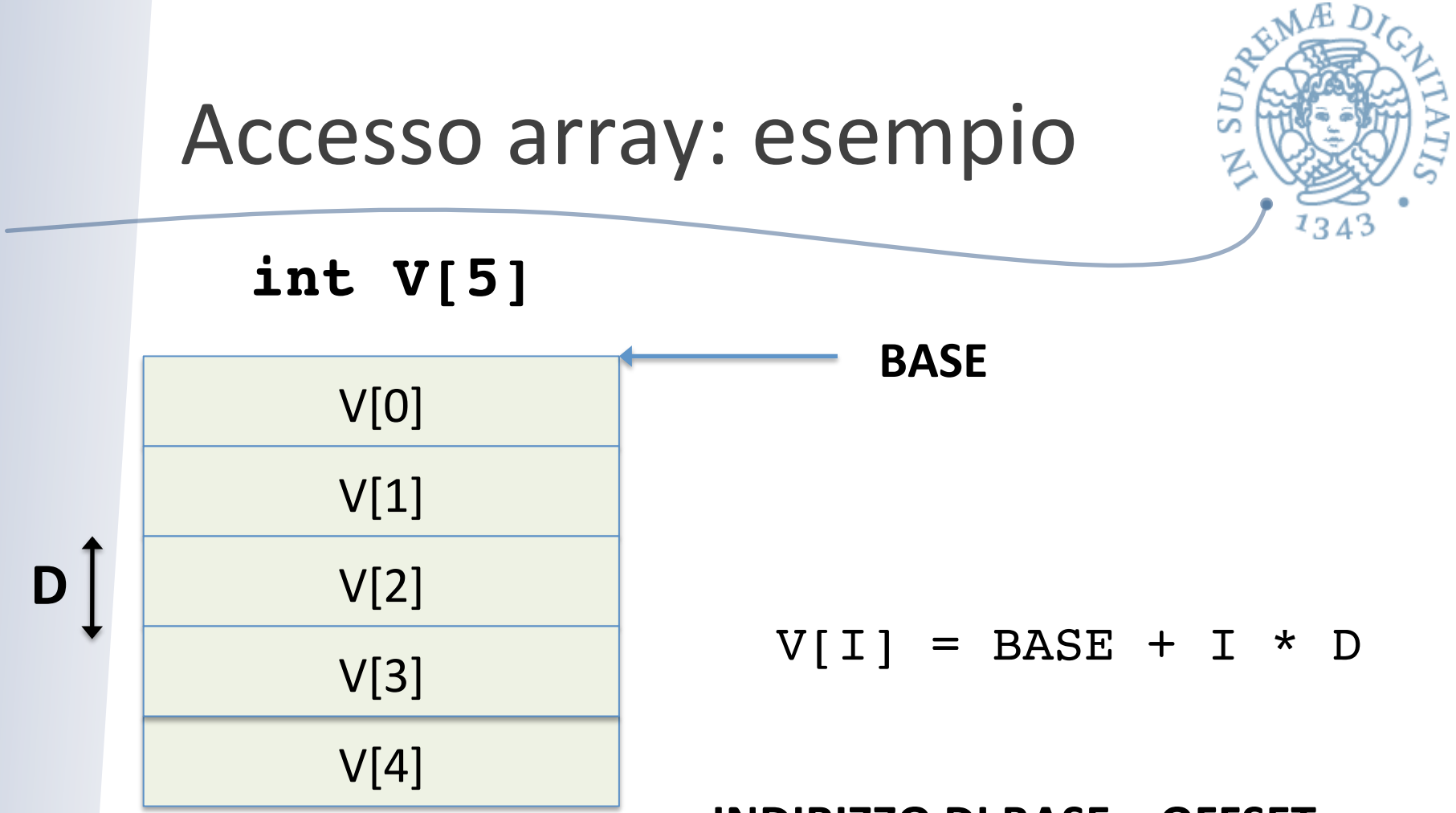
Array

- Collezioni di dati omogenei
  - funzione da un tipo indice al tipo degli elementi
  - indice: in genere discreto
  - elemento: “qualsiasi tipo” (raramente un tipo funzionale)
- Dichiarazioni
  - C: int vet[30]; tipo indice tra 0 e 29
- Array multidimensionali
- Principale operazione permessa
  - selezione di un elemento: vet[3], mat[10,’c’]
  - attenzione: la modifica non è un’operazione sull’array, ma sulla locazione modificabile che memorizza un (elemento di) array

Array: implementazione

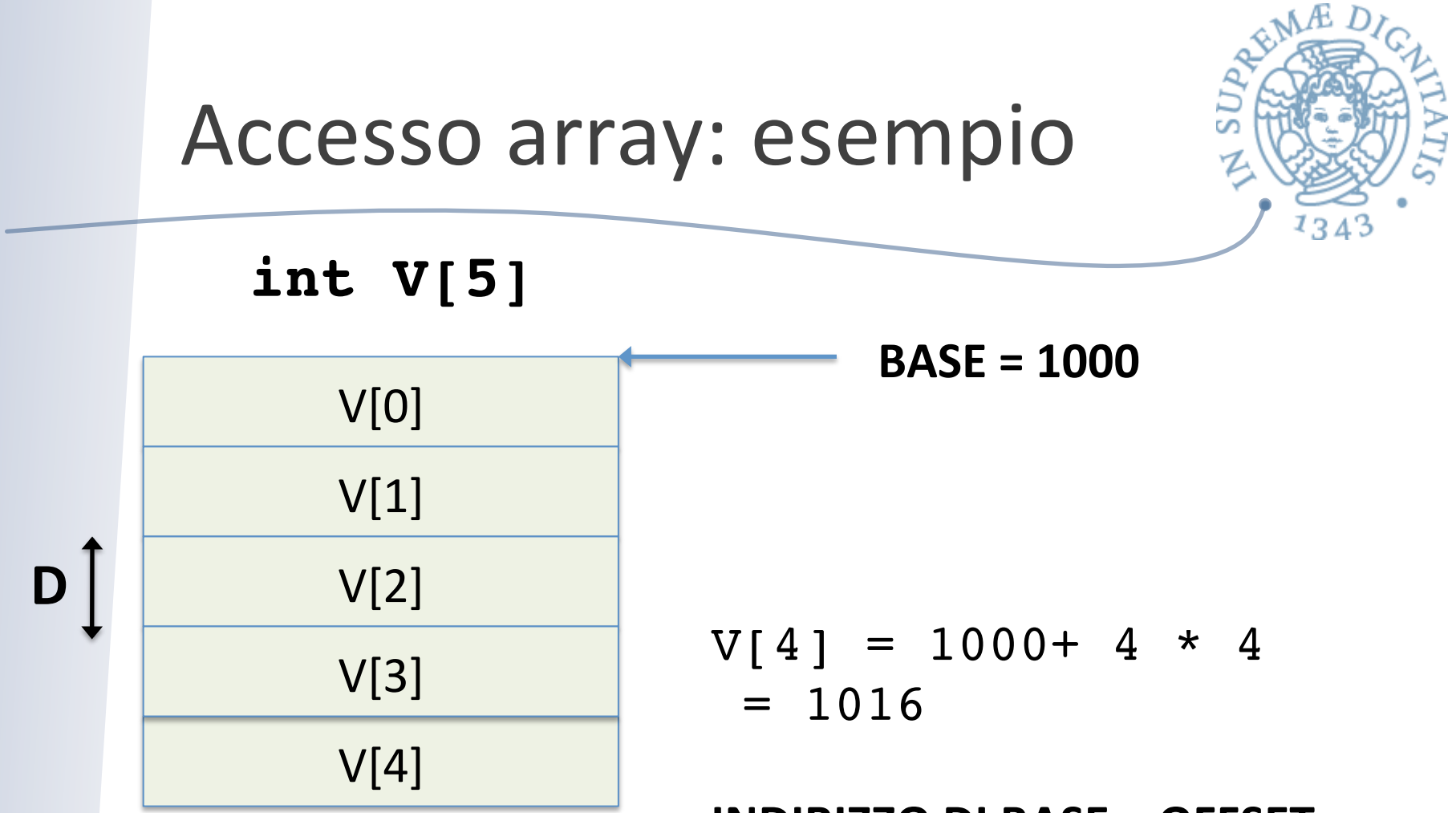
- Elementi memorizzati in locazioni contigue:
  - ordine di riga: V[1,1];V[1,2];…;V[1,10];V[2,1];…
    - ✓ maggiormente usato;
  - ordine di colonna: V[1,1];V[2,1];V[3,1];…;V[10,1];V[1,2];…
- Formula di accesso (caso lineare)
  - vettore V[N] of elem_type
  - V[I] = base + c*I,
    dove c e' la dimensione per memorizzare un elem_type
- Un formula di accesso (più articolata) può essere stabilita anche per gli array multidimensionali (dettagli nel libro di testo)

Accesso array: esempio



D dimensione in byte del tipo di base

Accesso array: esempio



D dimensione in byte del tipo di base = 4 byte

Il caso del C

- Il C non prevede controlli a runtime sulla correttezza degli indici di array
- Esempio: un array di 20 elementi di dimensione 2 byte allocato all'indirizzo 1000, l'ultima cella valida (indice 19) è allocata all'indirizzo 1038
- Se il programma, per errore, tenta di accedere il vettore all'indice 40, il runtime non rileverà l'errore e fornirà un accesso scorretto alla locazione di memoria 1080

Puntatori

- Valori : riferimenti; costante **`null`** (**`nil`**)
- Operazioni
  - creazione
    - ✓ funzioni di libreria che alloca e restituisce un puntatore (e.g., **`malloc`**)
  - dereferenziazione
    - ✓ accesso al dato "puntato": **`*p`**
  - test di uguaglianza
    - ✓ in specie test di uguaglianza con **`null`**

Array e puntatori in C

- Array e puntatori sono intercambiabili in C (!!)

```
int n;
int *a;       // puntatore a interi
int b[10];    // array di 10 interi
…
a = b;         // a punta all'elemento iniziale di b
n = a[3];      // n ha il valore del terzo elemento di b
n = *(a+3);    // idem
n = b[3];      // idem
n = *(b+3);    // idem
```

- Ma `a[3] = a[3]+1;`

  modificherà anche `b[3]` (è la stessa cosa!)

Tipi di dato di sistema

Pila non modificabile: interfaccia


```
# module type PILA =
    sig
      type 'a stack
      val emptystack : int * 'a -> 'a stack
      val push : 'a * 'a stack -> 'a stack
      val pop : 'a stack -> 'a stack
      val top : 'a stack -> 'a
      val empty : 'a stack -> bool
      val lungh : 'a stack -> int
      exception Emptystack
      exception Fullstack
    end
```

Pila non modificabile: semantica


```
# module SemPila: PILA =
  struct
        type 'a stack = Empty of int | Push of 'a stack * 'a (*tipo algebrico *)
        exception Emptystack
        exception Fullstack
        let emptystack (n, x) = Empty(n)
        let rec max = function
              | Empty n -> n
              | Push(p,a) -> max p
        let rec lungh = function
                 | Empty n -> 0
                 | Push(p,a) -> 1 + lungh(p)
        let push (a, p) = if lungh(p) = max(p) then raise Fullstack else Push(p,a)
        let pop = function
            | Push(p,a) -> p
            | Empty n -> raise Emptystack
        let top = function
           | Push(p,a) -> a
           | Empty n -> raise Emptystack
        let empty = function
           | Push(p,a) -> false
           | Empty n -> true
  end
```

Semantica algebrica


```
'a stack = Empty of int | Push of 'a stack * 'a
emptystack (n, x) = Empty(n)
lungh(Empty n) = 0
lungh(Push(p,a)) = 1 + lungh(p)
push(a,p) = Push(p,a)
pop(Push(p,a)) = p
top(Push(p,a)) = a
empty(Empty n) = true
empty(Push(p,a)) = false
```

Semantica "isomorfa" a una specifica in stile algebrico

Semantica delle operazioni definita da insiemi di equazioni fra termini

Il tipo di dato è un'algebra (iniziale)

Pila non modificabile: implementazione


```
# module ImpPila: PILA =
  struct
    type 'a stack = Pila of ('a array) * int
    exception Emptystack
    exception Fullstack
    let emptystack (nm,x) = Pila(Array.create nm x, -1)
    let push(x, Pila(s,n)) = if n = (Array.length(s) - 1) then
                    raise Fullstack else
                    (Array.set s (n +1) x;
                    Pila(s, n +1))
    let top(Pila(s,n)) = if n = -1 then raise Emptystack
                              else Array.get s n
    let pop(Pila(s,n)) = if n = -1 then raise Emptystack
                              else Pila(s, n -1)
    let empty(Pila(s,n)) = if n = -1 then true else false
    let lungh(Pila(s,n)) = n
  end
```

Pila non modificabile: implementazione

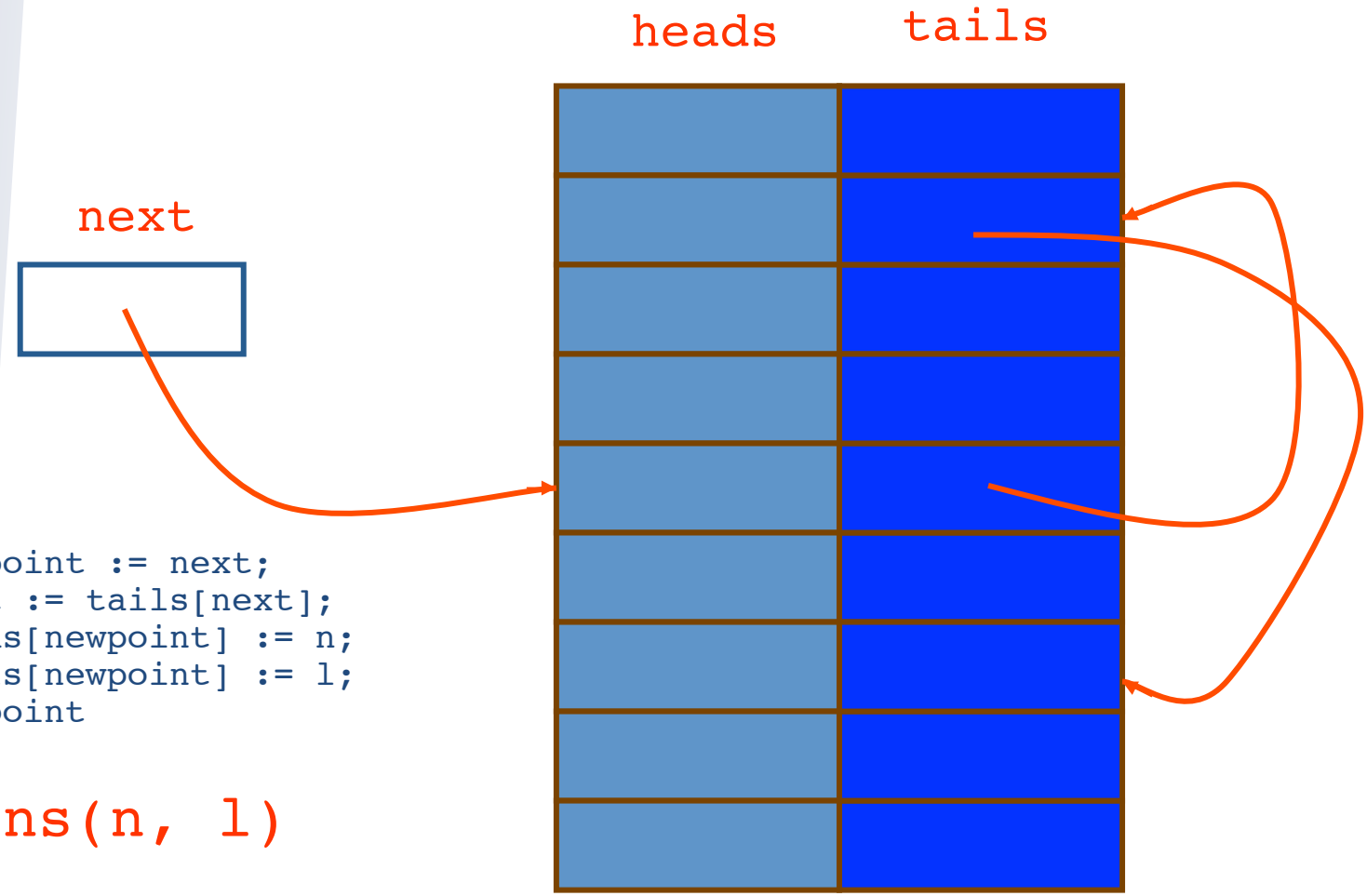

```
# module ImpPila: PILA =
  struct
    type 'a stack = Pila of ('a array) * int
    ..........
  end
```

- Il componente principale dell'implementazione è un array
  - (astrazione della) memoria fisica in una implementazione in linguaggio macchina
- Classica implementazione sequenziale
  - utilizzata anche per altri tipi di dato simili alle pile (code)

Lista (non polimorfa): interfaccia


```
# module type LISTAINT =
    sig
      type intlist
      val emptylist :  intlist
      val cons : int * intlist -> intlist
      val tail : intlist -> intlist
      val head : intlist -> int
      val empty : intlist -> bool
      val length : intlist -> int
      exception Emptylist
    end
```

Heap, lista libera, allocazione



Lista: implementazione a heap


```
# module ImpListaInt: LISTAINT =
  struct
     type intlist = int
     let heapsize = 100
     let heads = Array.create heapsize 0
     let tails = Array.create heapsize  0
     let next = ref(0)
     let emptyheap =
         let index = ref(0) in
           while !index < heapsize do
             Array.set tails !index (!index + 1); index := !index + 1
           done;
         Array.set tails (heapsize - 1) (-1); next := 0
     exception Fullheap
     exception Emptylist
     let emptylist = -1
     let empty l = if l = -1 then true else false
     let cons (n, l) = if !next = -1 then raise Fullheap else
         (let newpoint = !next in  next := Array.get tails !next;
           Array.set heads newpoint n; Array.set tails newpoint l; newpoint)
     let tail l = if empty l then raise Emptylist else Array.get tails l
     let head l = if empty l then raise Emptylist else Array.get heads l
     let rec length l = if l = -1 then 0 else 1 + length (tail l)
  end
```

Pila modificabile: interfaccia


```
# module type MPILA =
  sig
    type 'a stack
    val emptystack : int * 'a -> 'a stack
    val push : 'a * 'a stack -> unit
    val pop : 'a stack -> unit
    val top : 'a stack -> 'a
    val empty : 'a stack -> bool
    val lungh : 'a stack -> int
    val svuota : 'a stack -> unit
    val access : 'a stack * int -> 'a
    exception Emptystack
    exception Fullstack
    exception Wrongaccess
  end
```

Pila modificabile: semantica


```
# module SemMPila: MPILA =
  struct
    type 'a stack = ('a SemPila.stack) ref
    exception Emptystack
    exception Fullstack
    exception Wrongaccess
    let emptystack (n, a) = ref(SemPila.emptystack(n, a) )
    let lungh x = SemPila.lungh(!x)
    let push (a, p) = p :=  SemPila.push(a, !p)
    let pop x =  x := SemPila.pop(!x)
    let top x = SemPila.top(!x)
    let empty x = SemPila.empty !x
    let rec svuota x =  if empty(x) then () else (pop x; svuota x)
    let rec faccess (x, n) =
       if n = 0 then SemPila.top(x) else faccess(SemPila.pop(x), n-1)
    let access (x, n) = let nofpops = lungh(x) - 1 - n in
       if nofpops < 0 then raise Wrongaccess else faccess(!x, nofpops)
  end
```

Pila modificabile: implementazione


```
module ImpMPila: MPILA =
  struct
   type 'x stack = ('x array) * int ref
   exception Emptystack
   exception Fullstack
   exception Wrongaccess
   let emptystack(nm,(x: 'a)) = ((Array.create nm x, ref(-1)): 'a stack)
   let push(x,((s,n): 'x stack)) = if !n = (Array.length(s) - 1) then
                  raise Fullstack else (Array.set s (!n +1) x; n := !n +1)
   let top(((s,n): 'x stack)) = if !n = -1 then raise Emptystack
                           else Array.get s !n
   let pop(((s,n): 'x stack)) = if !n = -1 then raise Emptystack
                           else n:= !n -1
   let empty(((s,n): 'x stack)) = if !n = -1 then true else false
   let lungh( (s,n): 'x stack) = !n
   let svuota (((s,n): 'x stack)) = n := -1
   let access (((s,n): 'x stack), k) =
    (*          if not(k > !n) then   *)
         Array.get s k
    (*          else raise Wrongaccess  *)
 end
```

Programmi come dati

- La caratteristica fondamentale della macchina di Von Neumann
  - i programmi sono un particolare tipo di dato rappresentato nella memoria della macchina

  permette, in linea di principio, che, oltre all'interprete, un qualunque programma possa operare su di essi
- Possibile sempre in linguaggio macchina
- Possibile nei linguaggi ad alto livello
  - se la rappresentazione dei programmi è visibile nel linguaggio
  - e il linguaggio fornisce operazioni per manipolarla
- Di tutti i linguaggi che abbiamo nominato, gli unici che hanno questa caratteristica sono LISP e PROLOG
  - un programma LISP è rappresentato come S-espressione
  - un programma PROLOG è rappresentato da un insieme di termini

Metaprogrammazione

- Un metaprogramma è un programma che opera su altri programmi
- Esempi: interpreti, analizzatori, debugger, ottimizzatori, compilatori, etc.
- La metaprogrammazione è utile soprattutto per definire, nel linguaggio stesso,
  - strumenti di supporto allo sviluppo
  - estensioni del linguaggio

Definizione di tipi di dato

- La programmazione di applicazioni consiste in gran parte nella definizione di “nuovi tipi di dato”
- Un qualunque tipo di dato può essere definito in qualunque linguaggio
  - anche in linguaggio macchina
- Gli aspetti importanti
  - quanto costa?
  - esiste il tipo?
  - il tipo è astratto?

Quanto costa?, 1

- Il costo della simulazione di un "nuovo tipo di dato" dipende dal repertorio di strutture dati primitive fornite dal linguaggio
  - in linguaggio macchina, le sequenze di celle di memoria
  - in FORTRAN e ALGOL'60, gli array
  - in PASCAL e C, le strutture allocate dinamicamente e i puntatori
  - in LISP, le s-espressioni
  - in ML e Prolog, le liste ed i termini
  - in C^{++} e Java, gli oggetti

Quanto costa?, 2

- È utile poter disporre di
  - strutture dati statiche sequenziali, come gli array e i record
  - un meccanismo per creare strutture dinamiche
    - ✓tipo di dato dinamico (lista, termine, s-espressione)
    - ✓allocazione esplicita con puntatori (à la Pascal-C, oggetti)

Esiste il tipo?

- Anche se abbiamo realizzato una implementazione delle liste (con heap, lista libera, etc.) in FORTRAN o ALGOL
  - non abbiamo veramente a disposizione il tipo
- Poichè i tipi non sono denotabili
  - non possiamo “dichiarare” oggetti di tipo lista
- Stessa situazione in LISP e Prolog
- In PASCAL, ML, Java i tipi sono denotabili, anche se con meccanismi diversi
  - dichiarazioni di tipo
  - dichiarazioni di classe

Dichiarazioni di classe

- Il meccanismo di C++ e Java (anche OCaml)
- Il tipo è la classe
  - parametrico, con relazioni di sottotipo
- I valori del nuovo tipo (oggetti) sono creati con un'operazione di istanziazione della classe
  - non con una dichiarazione
- La parte struttura dati degli oggetti è costituita da un insieme di variabili istanza (o field) allocati sullo heap

Il tipo è astratto?

- Un tipo astratto è un insieme di valori
  - di cui non si conosce la rappresentazione (implementazione)
  - che possono essere manipolati solo con le operazioni associate
- Sono tipi astratti tutti i tipi primitivi forniti dal linguaggio
  - la loro rappresentazione effettiva non ci è nota e non è comunque accessibile se non con le operazioni primitive
- Per realizzare tipi di dato astratti servono
  - un meccanismo che permette di dare un nome al nuovo tipo (dichiarazione di tipo o di classe)
  - un meccanismo di "protezione" o information hiding che renda la rappresentazione visibile soltanto alle operazioni primitive
    - ✓ variabili d'istanza private in una classe
    - ✓ moduli e interfacce in C e ML