# CONTROLLO DI SEQUENZA: ESPRESSIONI E COMANDI



## Di cosa parleremo

- espressioni pure (senza blocchi e funzioni)
  - regola di valutazione, operazioni strette e non strette
- un frammento di linguaggio funzionale
  - semantica operazionale
  - interprete iterativo
- comandi puri (senza blocchi e sottoprogrammi)
  - semantica dell'assegnamento
- un frammento di linguaggio imperativo
  - semantica operazionale
  - interprete iterativo

## Espressioni in sintassi astratta

- alberi etichettati
  - nodi
    - ✓ applicazioni di funzioni (operazioni primitive)
    - ✓ i cui operandi sono i sottoalberi
  - foglie
    - ✓ costanti o variabili (riferimenti a dati)
- il più semplice meccanismo per comporre operazioni
  - preso direttamente dalla matematica
- solo *espressioni pure*, che non contengono
  - definizioni di funzione (λ-astrazione)
  - applicazioni di funzione
  - introduzione di nuovi nomi (blocco)
- l'unico problema semantico interessante che riguarda la valutazione delle espressioni pure è quello della *regola di valutazione*

3

## Le operazioni come funzioni

- le operazioni primitive sono in generale *funzioni parziali*
  - indefinite per alcuni valori degli input
    - ✓ errori "hardware"
      - overflow, divisione per zero
    - ✓ errori rilevati dal supporto a run time
      - errori di tipo a run time, accessi errati ad array, accessi a variabili non inizializzate, esaurimento memoria libera
  - nei linguaggi moderni tutti questi casi provocano il sollevamento di una eccezione
    - ✓ che può essere catturata ed eventualmente gestita
- alcune operazioni primitive sono *funzioni non strette*
  - una funzione è non stretta sul suo i-esimo operando, se ha un valore definito quando viene applicata ad una n-upla di valori, di cui l'i-esimo è indefinito

4

# Espressioni: regole di valutazione


- regola interna
  - prima di applicare l'operatore, si valutano tutti i sottoalberi (sottoespressioni)
- regola esterna
  - è l'operatore che richiede la valutazione dei sottoalberi, se necessario
- le due regole di valutazione possono dare semantiche diverse
  - se qualcuna delle sottoespressioni ha valore "indefinito"
    - ✓ errore, non terminazione, sollevamento di una eccezione, ...
  - e l'operatore è non stretto
    - ✓ può calcolare un valore senza aver bisogno del valore di tutti gli operandi
    - ✓ quindi, può essere definito anche se qualcuno degli operandi è indefinito
- esempi di tipiche operazioni primitive non strette
  - Condizionale
    - ✓ If true then C1 else C2
  - or, and
    - ✓ True or E
- è molto utile avere la possibilità di definire funzioni (astrazioni procedurali) non strette
  - sarà un problema risolto con tecniche opportune di passaggio dei parametri (passaggio per nome)

5

# Una operazione non stretta: il condizionale


`if x = 0 then y else y/x`

- in sintassi astratta

`ifthenelse(=(x,0), y, /(y,x))`

- usando la regola interna, valuto tutti e tre gli operandi
  - se `x` vale 0, la valutazione del terzo operando dà origine ad un errore
  - l'intera espressione ha valore indefinito
- usando la regola esterna, valuto solo il primo operando
  - se `x` vale 0, valuto il secondo operando
  - il terzo operando non viene valutato e l'intera espressione ha un valore definito

6

# Una operazione non stretta: l'or

`true or "expr1"`

- in sintassi astratta

`or(true, "expr1")`

- usando la regola interna, valuto tutti e due gli operandi
  - se la valutazione del secondo operando dà origine ad un errore, l'intera espressione ha valore indefinito
  - in ogni caso, la valutazione di `"expr1"` è inutile!
- usando la regola esterna, valuto il primo operando
  - se questo vale `true`, non devo fare altro, ed il risultato è `true` qualunque sia il valore (anche indefinito) di `"expr1"`
  - altrimenti viene valutato `"expr1"`

7

# Regola esterna vs. regola interna

- la regola esterna
  - è sempre corretta
  - è più complessa da implementare, perché ogni operazione deve avere la propria "politica"
  - è necessaria in pochi casi, per le operazioni primitive
    - ✓ sono poche le operazioni primitive non strette
- la regola interna
  - non è in generale corretta per le operazioni non strette
  - è banale da implementare
- la soluzione più ragionevole
  - regola interna per la maggior parte delle operazioni
  - regola esterna per le poche primitive non strette

8

# Frammento funzionale: sintassi

```
type ide = string
type exp =
      | Eint of int
      | Ebool of bool
      | Den of ide
      | Prod of exp * exp
      | Sum of exp * exp
      | Diff of exp * exp
      | Eq of exp * exp
      | Minus of exp
      | Iszero of exp
      | Or of exp * exp
      | And of exp * exp
      | Not of exp
      | Ifthenelse of exp * exp * exp
```

9

# Domini semantici

```
type eval =
    | Int of int
        | Bool of bool
        | Unbound
```

- l'implementazione funzionale dell'ambiente

```
module Funenv:ENV =
   struct
        type 't env = string -> 't
        let emptyenv(x) = function y -> x
        let applyenv(x,y) = x y
        let bind((r: 'a env) , (l:string),  (e:'a)) =
          function lu -> if lu = l then e else applyenv(r,lu)
        ...
   end
```

10

# Type checking

```
let typecheck (x, y) = match x with
      | "int" ->   (match y with
        |  Int(u) -> true
        | _ -> false)
      | "bool" ->   (match y with
        |  Bool(u) -> true
        | _ -> false)
      | _ -> failwith ("not a valid
  type")
```

11

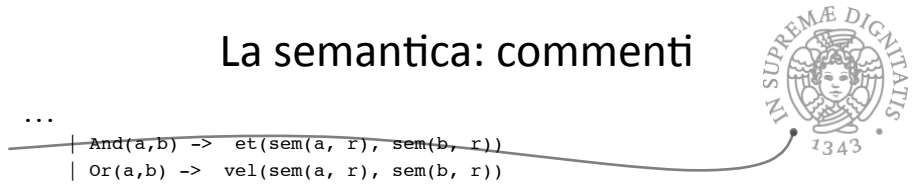
# La semantica operazionale

```
let rec sem ((e:exp), (r:eval env)) =
    match e with
      | Eint(n) -> Int(n)
      | Ebool(b) -> Bool(b)
      | Den(i) -> applyenv(r,i)
      | Iszero(a) -> iszero(sem(a, r))
      | Eq(a,b) -> equ(sem(a, r), sem(b, r))
      | Prod(a,b) ->  mult(sem(a, r), sem(b, r))
      | Sum(a,b) ->  plus(sem(a, r), sem(b, r))
      | Diff(a,b)  ->  diff(sem(a, r), sem(b, r))
      | Minus(a) ->  minus(sem(a, r))
      | And(a,b) ->  et(sem(a, r), sem(b, r))
      | Or(a,b) ->  vel(sem(a, r), sem(b, r))
      | Not(a) -> non((sem a r))
      | Ifthenelse(a,b,c) -> let g = sem(a, r) in
           if typecheck("bool",g) then
              (if g = Bool(true) then sem(b, r) else sem(c, r))
           else failwith ("nonboolean guard")
val sem : exp * eval Funenv.env -> eval = <fun>
```

Assumendo note le operazioni primitive

12

# La semantica: commenti



```
...
    | And(a,b) ->  et(sem(a, r), sem(b, r))
    | Or(a,b) ->  vel(sem(a, r), sem(b, r))
```

- And e Or interpretati come funzioni strette

```
...
      | Ifthenelse(a,b,c) -> let g = sem(a, r) in
          if typecheck("bool",g) then
             (if g = Bool(true) then sem(b, r) else sem(c, r))
          else failwith ("nonboolean guard")
```

- condizionale interpretato (ovviamente!) come funzione non stretta



# Operazioni primitive: parte 1

```
let minus x = if typecheck("int",x) then  (match x with  Int(y) -> Int(-y) )
        else  failwith ("type error")

let iszero x = if typecheck("int",x) then (match x with  Int(y) -> Bool(y=0) )
        else  failwith ("type error")

let equ (x,y) = if typecheck("int",x) & typecheck("int",y)
      then (match (x,y) with  (Int(u), Int(w)) -> Bool(u = w))
      else failwith ("type error")

let plus (x,y) = if typecheck("int",x) & typecheck("int",y)
      then  (match (x,y) with  (Int(u), Int(w)) -> Int(u+w))
      else failwith ("type error")
```

# Operazioni primitive: parte 2

```
let diff (x,y) = if typecheck("int",x) & typecheck("int",y)
      then  (match (x,y) with  (Int(u), Int(w)) -> Int(u-w))
      else failwith ("type error")

let mult (x,y) = if typecheck("int",x) & typecheck("int",y)
      then  (match (x,y) with  (Int(u), Int(w)) -> Int(u*w))
      else failwith ("type error")

let et (x,y) = if typecheck("bool",x) & typecheck("bool",y)
      then  (match (x,y) with  (Bool(u), Bool(w)) -> Bool(u & w))
      else failwith ("type error")

let vel (x,y) = if typecheck("bool",x) & typecheck("bool",y)
      then  (match (x,y) with  (Bool(u), Bool(w)) -> Bool(u or w))
      else failwith ("type error")

let non x = if typecheck("bool",x)
      then (match x with  Bool(y) -> Bool(not y) )
      else failwith ("type error")
```



# Cosa abbiamo ottenuto?

La semantica operazionale e' un interprete

```
let rec sem ((e:exp), (r:eval env)) =
      match e with
      .......
      | Prod(a,b) ->  mult(sem(a, r), sem(b, r))
      .......
      | Ifthenelse(a,b,c) -> let g = sem(a, r) in
            if typecheck("bool",g) then
               (if g = Bool(true) then sem(b, r) else sem(c, r))
            else failwith ("nonboolean guard")
val sem : exp * eval Funenv.env -> eval = <fun>
```

- definito in modo ricorsivo
  - utilizzando la ricorsione del metalinguaggio (linguaggio di implementazione)
- eliminando la ricorsione dall'interprete
  - ne otteniamo una versione più a basso livello
  - più vicina ad una "vera" implementazione

# Eliminare la ricorsione

```
let rec sem ((e:exp), (r:eval env)) =
      match e with
      .......
      | Prod(a,b) ->  mult(sem(a, r), sem(b, r))
      .......
      | Ifthenelse(a,b,c) -> let g = sem(a, r) in
            if typecheck("bool",g) then
               (if g = Bool(true) then sem(b, r) else sem(c, r))
            else failwith ("nonboolean guard")
```

- la ricorsione può essere rimpiazzata con l'iterazione
  - in generale sono necessarie delle pile
  - a meno di definizioni ricorsive con una struttura molto semplice (tail recursion)
- la struttura ricorsiva di sem ripropone quella del dominio sintattico delle espressioni (composizionalità)
  - il dominio delle espressioni non è tail recursive
    `type exp = .... | Prod of exp * exp | ...`
  - per eliminare la ricorsione servono delle pile

17

# Come eliminiamo la ricorsione

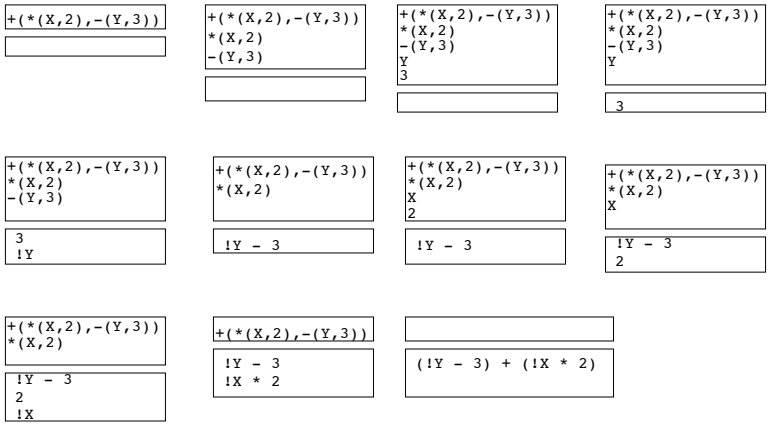
- la funzione ricorsiva sem ha due argomenti
  - l'espressione
  - l'ambiente

  e calcola un risultato
  - un eval
- l'ambiente non viene mai modificato nelle chiamate ricorsive
- l'informazione da memorizzare in opportune pile per simulare la ricorsione è dunque
  - la (sotto)-espressione
  - il valore (eval) calcolato per la sotto-espressione
- una pila di espressioni etichettate
  - ad ogni istante, contiene l'informazione su "quello che deve ancora essere valutato"
  - `continuation`
- una pila di eval
  - ad ogni istante, contiene i risultati temporanei
  - `tempstack`
- vediamo l'algoritmo su un esempio
  - colori come etichette
  - sintassi "normale"

18

# La valutazione di una espressione

+(*(X,2),-(Y,3))






# Stack-based Virtual Machine

- Consideriamo l'espressione 2 * 3 + 4 *5
- In notazione postfix: 2 3 * 4 * 5 +
- Possiamo interpretare la notazione post fix come le istruzioni di una macchina virtuale a stack

# 2 3 * 4 5 * +

**Control Stack**

- 2 3 * 4 5 * +
- 3 * 4 5 * +
- * 4 5 * +
- 4 5 * +
- 5 * +
- * +
- +

**Stack Temporanee**

- 2
- 2 3
- 6
- 6 4
- 6 4 5
- 6 20
- 26



# Stack Machine

- Interprete iterativo: stack machine
  - una pila di espressioni etichettate (continuation stack)
    - ✓ad ogni istante, contiene l'informazione su "quello che deve ancora essere valutato"
  - una pila di eval (tempstack)
    - ✓ad ogni istante, contiene i risultati temporanei

# Le strutture dell'interprete iterativo

```
let cframesize = 20
let tframesize = 20

type labeledconstruct =
   | Expr1 of exp
   | Expr2 of exp

let (continuation: labeledconstruct stack) =
     emptystack(cframesize,Expr1(Eint(0)))

let (tempstack: eval stack) =
     emptystack(tframesize,Unbound)
```



# L'interprete iterativo

```
let sem ((e:exp), (rho:eval env)) =
  push(Expr1(e), continuation);
  while not(empty(continuation)) do
     (match top(continuation) with
      |Expr1(x) ->
      (pop(continuation); push(Expr2(x),continuation);
      (match x with
        | Iszero(a) -> push(Expr1(a),continuation)
        | Eq(a,b) -> push(Expr1(a),continuation); push(Expr1(b),continuation)
        | Prod(a,b) ->  push(Expr1(a),continuation); push(Expr1(b),continuation)
        | Sum(a,b) -> push(Expr1(a),continuation); push(Expr1(b),continuation)
        | Diff(a,b) ->  push(Expr1(a),continuation); push(Expr1(b),continuation)
        | Minus(a) ->  push(Expr1(a),continuation)
        | And(a,b) ->  push(Expr1(a),continuation); push(Expr1(b),continuation)
        | Or(a,b) ->  push(Expr1(a),continuation); push(Expr1(b),continuation)
        | Not(a) -> push(Expr1(a),continuation)
        | Ifthenelse(a,b,c) -> push(Expr1(a),continuation)
        | _ -> ()))
```

# L'interprete iterativo

```
      |Expr2(x) ->
         (pop(continuation); (match x with
            | Eint(n) ->  push(Int(n),tempstack)
           | Ebool(b) -> push(Bool(b),tempstack)
           | Den(i) ->   push(applyenv(rho,i),tempstack)
            | Iszero(a) -> let arg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(iszero(arg),tempstack)
           | Eq(a,b) -> let firstarg=top(tempstack) in pop(tempstack);
                let sndarg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(equ(firstarg,sndarg),tempstack)
            | Prod(a,b) -> let firstarg=top(tempstack) in pop(tempstack);
                let sndarg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(mult(firstarg,sndarg),tempstack)
           | Sum(a,b) -> let firstarg=top(tempstack) in pop(tempstack);
                let sndarg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(plus(firstarg,sndarg),tempstack)
            | Diff(a,b)  -> let firstarg=top(tempstack) in pop(tempstack);
                let sndarg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(diff(firstarg,sndarg),tempstack)
           | Minus(a) -> let arg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(minus(arg),tempstack)
           | And(a,b) -> let firstarg=top(tempstack) in pop(tempstack);
                let sndarg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(et(firstarg,sndarg),tempstack)
           | Or(a,b) -> let firstarg=top(tempstack) in pop(tempstack);
                let sndarg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(vel(firstarg,sndarg),tempstack)
           | Not(a) -> let arg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(non(arg),tempstack)
           | Ifthenelse(a,b,c) -> let arg=top(tempstack) in pop(tempstack);
                       if typecheck("bool",arg) then
                        (if arg = Bool(true) then push(Expr1(b),continuation)
                        else push(Expr1(c),continuation))
                       else failwith ("type error"))))
      done;
      let valore= top(tempstack) in pop(tempstack); valore;;
val sem : exp * eval Funenv.env -> eval = <fun>
```



# Cosa abbiamo imparato

- Una tecnica generale usata nei back-end dei compilatori nella fase di generazione del codice per ottenere un codice maggiormente efficiente.

# Effetti laterali, comandi ed espressioni pure


- assumiamo che continuino ad esistere le espressioni
  - diverse dai comandi perché la loro semantica
    - ✓ non modifica lo store (non produce effetti laterali) e restituisce un valore (eval)
- tale approccio non è quello di C
  - in cui quasi ogni costrutto può restituire un valore e modificare lo stato
- la distinzione (semantica) tra espressioni e comandi è difficile da mantenere se si permette che comandi possano occorrere all'interno di espressioni (Java, ML), soprattutto in presenza di "operazioni definite dal programmatore" (funzioni)
- nel linguaggio didattico, forzeremo questa distinzione
  - permettendo "effetti laterali" solo in alcuni costrutti
  - che avranno una semantica diversa

27

# Un frammento di linguaggio imperativo: domini sintattici


```
type ide = string
type exp =
          | Eint of int
          | Ebool of bool
          | Den of ide
          | Prod of exp * exp
          | Sum of exp * exp
          | Diff of exp * exp
          | Eq of exp * exp
          | Minus of exp
          | Iszero of exp
          | Or of exp * exp
          | And of exp * exp
          | Not of exp
          | Ifthenelse of exp * exp * exp
          | Val of exp

type com =
          | Assign of exp * exp
          | Cifthenelse of exp * com list * com list
          | While of exp * com list
```

28

# Domini semantici


- Informazioni di stato: oltre all'ambiente, la memoria
- ai domini semantici dei valori si aggiungono le locazioni
  - che decidiamo non essere nè esprimibili nè memorizzabili
- tre domini distinti: eval, dval, mval
  - con operazioni di "conversione"
  - esiste una funzione di valutazione semantica (semden) che calcola un dval invece che un eval



# Il dominio store


- simile all'ambiente (polimorfo)

```
module type STORE =
   sig
     type 't store
     type loc
     val emptystore : 't -> 't store
     val allocate : 't store  * 't -> loc * 't store
     val update : 't store  * loc * 't -> 't store
     val applystore : 't store * loc -> 't
   end
module Funstore:STORE =
   struct
     type loc = int
     type 't store = loc -> 't
     let (newloc,initloc) = let count = ref(-1) in
          (fun () -> count := !count +1; !count),
          (fun () -> count := -1)
     let emptystore(x) = initloc(); function y -> x
     let applystore(x,y) = x y
     let allocate((r: 'a store) ,  (e:'a)) = let l = newloc() in
          (l, function lu -> if lu = l then e else applystore(r,lu))
     let update((r: 'a store) , (l:loc),  (e:'a)) =
          function lu -> if lu = l then e else applystore(r,lu)
   end
```

# I domini dei valori

```
exception Nonstorable
exception Nonexpressible
type eval =          | Int of int
           | Bool of bool
           | Novalue
type dval =          | Dint of int
           | Dbool of bool
           | Unbound
           | Dloc of loc
type mval = | Mint of int
           | Mbool of bool
           | Undefined
let evaltomval e = match e with
           | Int n -> Mint n
           | Bool n -> Mbool n
           | _ -> raise Nonstorable
let mvaltoeval m = match m with
           | Mint n -> Int n
           | Mbool n -> Bool n
           | _ -> Novalue
let evaltodval e = match e with
           | Int n -> Dint n
           | Bool n -> Dbool n
           | Novalue -> Unbound
let dvaltoeval e = match e with
           | Dint n -> Int n
           | Dbool n -> Bool n
           | Dloc n -> raise Nonexpressible
           | Unbound -> Novalue
```



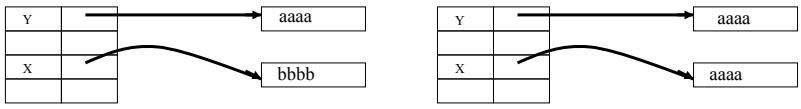
# Semantica operazionale: espressioni

```
let rec sem ((e:exp), (r:dval env), (s: mval store)) =
      match e with
      | Eint(n) -> Int(n)
      | Ebool(b) -> Bool(b)
      | Den(i) -> dvaltoeval(applyenv(r,i))
      | Iszero(a) -> iszero(sem(a, r, s))
      | Eq(a,b) -> equ(sem(a, r, s), sem(b, r, s))
      | Prod(a,b) ->  mult (sem(a, r, s), sem(b, r, s))
      | Sum(a,b) ->  plus (sem(a, r, s), sem(b, r, s))
      | Diff(a,b)  ->  diff (sem(a, r, s), sem(b, r, s))
      | Minus(a) ->  minus(sem(a, r, s))
      | And(a,b) ->  et (sem(a, r, s), sem(b, r, s))
      | Or(a,b) ->  vel (sem(a, r, s), sem(b, r, s))
      | Not(a) -> non(sem(a, r, s))
      | Ifthenelse(a,b,c) ->
            let g = sem(a, r, s) in
            if typecheck("bool",g) then
               (if g = Bool(true)
               then sem(b, r, s)
               else sem(c, r, s))
            else failwith ("nonboolean guard")
      | Val(e) -> match semden(e, r, s) with
                  | Dloc(n) -> mvaltoeval(applystore(s, n))
                  | _ -> failwith("not a variable")

and semden ((e:exp), (r:dval env), (s: mval store)) =  match e with
      | Den(i) -> applyenv(r,i)
      | _ -> evaltodval(sem(e, r, s))
val sem : exp * dval Funenv.env * mval Funstore.store -> eval = <fun>
val semden : exp * dval Funenv.env * mval Funstore.store -> dval = <fun>
```

# Semantica dell'assegnamento

- l'assegnamento coinvolge sia l'ambiente che la memoria
- vediamone il comportamente considerando l'assegnamento X := Y
  - `X : = Y (in sintassi astratta Assign(Den "X", Val "Y"))`
  - dove sia X che Y sono variabili




- l'assegnamento fa "copiare" un valore nella memoria e non modifica l'ambiente
- quando i valori sono strutture dati modificabili
  - s-espressioni in LISP, arrays in ML, oggetti in Java
  - il valore è in realtà un puntatore e le modifiche effettuate a partire da una variabile si ripercuotono sull'altra (sharing)
- scorciatoia in LISP e Java
  - l'assegnamento agisce direttamente sull'ambiente e crea aliasing

33

# Semantica operazionale: comandi

```
let rec semc((c: com), (r:dval env), (s: mval store)) = match c with

        | Assign(e1, e2) ->
           (match semden(e1, r, s) with
           | Dloc(n) -> update(s, n, evaltomval(sem(e2, r, s)))
           | _ -> failwith ("wrong location in assignment"))

        | Cifthenelse(e, cl1, cl2) -> let g = sem(e, r, s) in
             if typecheck("bool",g) then
              (if g = Bool(true) then semcl(cl1, r, s) else semcl (cl2, r, s))
             else failwith ("nonboolean guard")

        | While(e, cl) -> let g = sem(e, r, s) in
           if typecheck("bool",g) then
              (if g = Bool(true) then semcl((cl @ [While(e, cl)]), r, s)
                          else s)
            else failwith ("nonboolean guard")

and semcl(cl, r, s) = match cl with
        | [] -> s
        | c::cl1 -> semcl(cl1, r, semc(c, r, s))

val semc :  com * dval Funenv.env * mval Funstore.store -> mval Funstore.store = <fun>
val semcl :  com list * dval Funenv.env * mval Funstore.store -> mval Funstore.store =  <fun>
```

34

# Eliminare la ricorsione


- per le espressioni, bisogna prevedere il caso in cui il valore è un dval
  - nuova pila di valori denotabili temporanei
  - diverse etichette per le espressioni
- per i comandi, la ricorsione può essere rimpiazzata con l'iterazione senza utilizzare pile ulteriori
- il dominio dei comandi è "quasi" tail recursive

```
type com =
| Assign of exp * exp
| Cifthenelse of exp * com list * com list
| While of exp * com list
```

  - non è mai necessario valutare i due rami del condizionale
  - si può utilizzare la struttura sintattica (lista di comandi) per mantenere l'informazione su quello che si deve ancora valutare
    - ✓ basta una unica cella
    - ✓ che possiamo "integrare" nella pila di espressioni etichettate
- il valore restituito dalla funzione di valutazione semantica dei comandi (uno store!) può essere gestito come aggiornamento di una "variabile globale" di tipo store

35

# Le strutture dell'interprete iterativo


```
let cframesize = 20
let tframesize = 20
let tdframesize = 20

type labeledconstruct =
   | Expr1 of exp
   | Expr2 of exp
   | Exprd1 of exp
   | Exprd2 of exp
   | Com1 of com
   | Com2 of com
   | Com1 of labeledconstruct list

let (continuation: labeledconstruct stack) = emptystack(cframesize,Expr1(Eint(0)))

let (tempstack: eval stack) = emptystack(tframesize,Novalue)

let (tempdstack: dval stack) = emptystack(tdframesize,Unbound)

let globalstore = ref(emptystore(Undefined))

let labelcom (dl: com list) = let dlr = ref(dl) in
      let ldlr = ref([]) in
      while not (!dlr = []) do
       let i = List.hd !dlr in
       ldlr := !ldlr @ [Com1(i)];
       dlr := List.tl !dlr
      done;
      Com1(!ldlr)
```

36

# L'interprete iterativo 1

```
let itsem (rho:dval env) =
   (match top(continuation) with
      |Expr1(x) ->
       (pop(continuation); push(Expr2(x),continuation);
       (match x with
         | Iszero(a) -> push(Expr1(a),continuation)
         | Eq(a,b) -> push(Expr1(a),continuation); push(Expr1(b),continuation)
         | Prod(a,b) ->  push(Expr1(a),continuation); push(Expr1(b),continuation)
         | Sum(a,b) -> push(Expr1(a),continuation); push(Expr1(b),continuation)
         | Diff(a,b) ->  push(Expr1(a),continuation); push(Expr1(b),continuation)
         | Minus(a) ->  push(Expr1(a),continuation)
         | And(a,b) ->  push(Expr1(a),continuation); push(Expr1(b),continuation)
         | Or(a,b) ->  push(Expr1(a),continuation); push(Expr1(b),continuation)
         | Not(a) -> push(Expr1(a),continuation)
         | Ifthenelse(a,b,c) -> push(Expr1(a),continuation)
         | Val(a) -> push(Exprd1(a),continuation)
         | _ -> ()))
```



# L'interprete iterativo 2

```
     |Expr2(x) ->
      (pop(continuation); (match x with
            | Eint(n) ->  push(Int(n),tempstack)
        | Ebool(b) -> push(Bool(b),tempstack)
        | Den(i) ->   push(dvaltoeval(applyenv(rho,i)),tempstack)
            | Iszero(a) -> let arg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(iszero(arg),tempstack)
        | Eq(a,b) -> let firstarg=top(tempstack) in pop(tempstack);
            let sndarg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(equ(firstarg,sndarg),tempstack)
            | Prod(a,b) -> let firstarg=top(tempstack) in pop(tempstack);
            let sndarg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(mult(firstarg,sndarg),tempstack)
        | Sum(a,b) -> let firstarg=top(tempstack) in pop(tempstack);
            let sndarg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(plus(firstarg,sndarg),tempstack)
            | Diff(a,b)  -> let firstarg=top(tempstack) in pop(tempstack);
            let sndarg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(diff(firstarg,sndarg),tempstack)
        | Minus(a) -> let arg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(minus(arg),tempstack)
        | And(a,b) -> let firstarg=top(tempstack) in pop(tempstack);
            let sndarg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(et(firstarg,sndarg),tempstack)
        | Or(a,b) -> let firstarg=top(tempstack) in pop(tempstack);
            let sndarg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(vel(firstarg,sndarg),tempstack)
        | Not(a) -> let arg=top(tempstack) in pop(tempstack); push(non(arg),tempstack)
        | Ifthenelse(a,b,c) -> let arg=top(tempstack) in pop(tempstack);
                        if typecheck("bool",arg) then
                         (if arg = Bool(true) then push(Expr1(b),continuation)
                         else push(Expr1(c),continuation))
          else failwith ("type error"))))
         | Val(e) -> let v = top(tempdstack) in    pop(tempdstack);
          (match v with
              | Dloc n -> push(mvaltoeval(applystore(!globalstore, n)), tempstack)
              | _ -> failwith("not a variable"))))
        | _ -> failwith("no more cases for semexpr"))

val itsem : dval Funenv.env -> unit = <fun>
```

```
| Val(e) -> let v =
  top(tempdstack) in
    pop(tempdstack);
         (match v with
        | Dloc n ->
  push(mvaltoeval(applystore(!
  globalstore, n)), tempstack)
        |  _ -> failwith("not a
  variable"))))
          | _ -> failwith("no
  more cases for semexpr"))
```



# L'interprete iterativo 3

```
let itsemden(rho) =
    (match top(continuation) with
     |Exprd1(x) -> (pop(continuation); push(Exprd2(x),continuation);
       match x with
         | Den i -> ()
         | _ -> push(Expr1(x), continuation))
     |Exprd2(x) -> (pop(continuation); match x with
         | Den i -> push(applyenv(rho,i), tempdstack)
         | _ -> let arg = top(tempstack) in pop(tempstack);
          push(evaltodval(arg), tempdstack))
     | _ -> failwith("No more cases for semden")    )
val itsemden : dval Funenv.env -> unit = <fun>
```

```
let itsemcl (rho: dval env) =
  let cl = (match top(continuation) with
      | Coml(dl1) -> dl1
      | _ -> failwith("impossible in semdecl")) in
  if cl = [] then pop(continuation) else
  (let currc = List.hd cl in let newcl = List.tl cl in pop(continuation); push(Coml(newcl),continuation);
     (match currc with
        | Com1(Assign(e1, e2)) ->  pop(continuation);
                                   push(Coml(Com2(Assign(e1, e2))::newcl),continuation);
          push(Exprd1(e1), continuation); push(Expr1(e2), continuation)
        | Com2(Assign(e1, e2)) -> let arg2 = evaltomval(top(tempstack)) in pop(tempstack);
           let arg1 = top(tempdstack) in pop(tempdstack);
               (match arg1 with
               | Dloc(n) -> globalstore := update(!globalstore, n, arg2)
               | _ -> failwith ("wrong location in assignment"))
        | Com1(While(e, cl)) -> pop(continuation); push(Coml(Com2(While(e, cl))::newcl),continuation);
          push(Expr1(e), continuation)
        | Com2(While(e, cl)) -> let g = top(tempstack) in pop(tempstack);
                if typecheck("bool",g) then (if g = Bool(true) then (let old = newcl in let newl =
                 (match labelcom cl with
                     | Coml newl1 -> newl1
                     | _ -> failwith("impossible in while")) in
                let nuovo = Coml(newl @ [Coml(While(e, cl))] @ old) in pop(continuation);
     push(nuovo,continuation))
             else ()) else failwith ("nonboolean guard")
        | Com1(Cifthenelse(e, cl1, cl2)) -> pop(continuation);
          push(Coml(Com2(Cifthenelse(e, cl1, cl2))::newcl),continuation); push(Expr1(e), continuation)
```

41

```
|   if typecheck("bool",g) then (let temp = if g =
Bool(true) then
                    labelcom (cl1) else labelcom (cl2) in
let newl = (match temp with
                              | Coml newl1 -> newl1
                          | _ -> failwith("impossible in
cifthenelse")) in
                    let nuovo = Coml(newl @
newclCom2(Cifthenelse(e, cl1, cl2)) -> let g =
top(tempstack) in pop(tempstack);
) in  pop(continuation); push(nuovo,continuation))
                  else failwith ("nonboolean guard")
           | _ -> failwith("no more sensible cases in
commands") ))
val itsemcl : dval Funenv.env -> unit = <fun>
```

42

```
let initstate() = svuota(continuation); svuota(tempstack)
val initstate : unit -> unit = <fun>

let loop (rho) =
    while not(empty(continuation)) do
     let currconstr = top(continuation) in (match currconstr with
          | Expr1(e) -> itsem(rho)
          | Expr2(e) -> itsem(rho)
          | Exprd1(e) -> itsemden(rho)
          | Exprd2(e) -> itsemden(rho)
          | Com1(cl) -> itsemcl(rho)
          | _ -> failwith("non legal construct in loop"))
    done
val loop : dval Funenv.env -> unit = <fun>

let sem (e,(r: dval env), (s: mval store)) = initstate();
   globalstore := s; push(Expr1(e), continuation);
   loop(r); let valore= top(tempstack) in pop(tempstack);
   valore
val sem : exp * dval Funenv.env * mval Funstore.store -> eval = <fun>

let semden (e,(r: dval env), (s: mval store)) = initstate();
   globalstore := s; push(Exprd1(e), continuation);
   loop(r); let valore= top(tempdstack) in pop(tempdstack);
   valore
val semden : exp * dval Funenv.env * mval Funstore.store -> dval = <fun>

let semcl (cl,(r: dval env), (s: mval store)) = initstate();
   globalstore := s; push(labelcom(cl), continuation);
   loop(r); !globalstore
val semcl :  com list * dval Funenv.env * mval Funstore.store -> mval Funstore.store =  <fun>
```


43