

Linguaggi di Programmazione I – Lezione 17

Proff. Piero Bonatti e Marco Faella

<mailto://pab@unina.it>

<mailto://marfaella@gmail.com>

25 maggio 2022



Panoramica dell'argomento

Paradigma funzionale

ML

Dichiarazioni e scoping in ML

Tipi strutturati in ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine superiore

Polimorfismo parametrico

Encapsulation e interfacce

Eccezioni e integrazione con type checking

Esempio: un semplice compilatore



Paradigma funzionale

Pensare funzionale

Introduzione

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Paradigma funzionale



L'essenza del paradigma funzionale

- Programmare in stile funzionale puro significa usare *solo espressioni e funzioni*, eventualmente ricorsive

Paradigma
funzionale

Pensare funzionale

Introduzione

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



L'essenza del paradigma funzionale

Paradigma
funzionale

Pensare funzionale

Introduzione

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Programmare in stile funzionale puro significa usare *solo espressioni e funzioni*, eventualmente ricorsive
- Non vi sono assegnamenti, non c'è una memoria che cambia
 - ◆ perché gli environment mappano gli identificatori direttamente sul loro valore (immutabile) invece di una locazione di memoria (il cui contenuto può cambiare)



L'essenza del paradigma funzionale

Paradigma
funzionale

Pensare funzionale

Introduzione

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

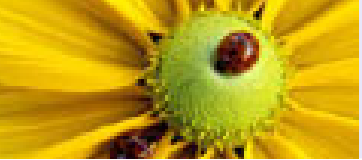
- Programmare in stile funzionale puro significa usare *solo espressioni e funzioni*, eventualmente ricorsive
- Non vi sono assegnamenti, non c'è una memoria che cambia
 - ◆ perché gli environment mappano gli identificatori direttamente sul loro valore (immutabile) invece di una locazione di memoria (il cui contenuto può cambiare)
- Quindi, senza assegnamenti, non ci possono essere cicli while/for



L'essenza del paradigma funzionale

Paradigma funzionale
Pensare funzionale
Introduzione
ML
Dichiarazioni e scoping in ML
Tipi strutturati in ML
Patterns e matching
Liste
Currying
Funzioni di ordine superiore
Polimorfismo parametrico
Encapsulation e interfacce
Eccezioni e integrazione con type checking
Esempio: un semplice compilatore

- Programmare in stile funzionale puro significa usare *solo espressioni e funzioni*, eventualmente ricorsive
- Non vi sono assegnamenti, non c'è una memoria che cambia
 - ◆ perché gli environment mappano gli identificatori direttamente sul loro valore (immutabile) invece di una locazione di memoria (il cui contenuto può cambiare)
- Quindi, senza assegnamenti, non ci possono essere cicli while/for
- Conseguenze sulla programmazione:
 - ◆ ricorsione al posto dei cicli
 - ◆ modifiche all'ambiente anziché alla memoria:
 - ◆ creazione identificatori con stesso nome mediante chiamate ricorsive
 - ◆ creazione di nuovi identificatori con lo stesso nome che mascherano la versione precedente (come nello scoping statico)



Introduzione

- In questo corso illustreremo brevemente i linguaggi funzionali:
 - ◆ ML (Meta Language, nella versione *Standard ML of New Jersey*, www.smlnj.org)
 - ◆ Altri linguaggi funzionali: OCaml, F#; Lisp, Scheme, Haskell, Scala
- I linguaggi OO più diffusi stanno acquistando caratteristiche funzionali (prossime slide)
- Testi di riferimento
 - ◆ Capitolo 13 di: Gabbrielli e Martini, *Linguaggi di Programmazione* (2a ed.)
 - ◆ Riccardo Pucella, *Notes on Programming Standard ML of New Jersey*.
<https://www.cs.cornell.edu/riccardo/prog-smlnj/notes-011001.pdf>



Costrutti funzionali in Java

Paradigma funzionale
Pensare funzionale
Introduzione
ML
Dichiarazioni e scoping in ML
Tipi strutturati in ML
Patterns e matching
Liste
Currying
Funzioni di ordine superiore
Polimorfismo parametrico
Encapsulation e interfacce
Eccezioni e integrazione con type checking
Esempio: un semplice compilatore

- Lambda espressioni (funzioni anonime) [Java 8]
- Collezioni funzionali (*stream*) [Java 8]
- Type inference per metodi parametrici [Java 5]
- Type inference per variabili locali (keyword `var`) [Java 10]
- Pattern matching su `instanceof` [Java 16]
- Pattern matching su `switch` [Java 17,
preview]
- Classi immutabili (record) [Java 16]



Costrutti funzionali in C++

Paradigma
funzionale

Pensare funzionale

Introduzione

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Lambda espressioni (funzioni anonime)
- Type inference (keyword auto)

[C++11]

[C++11]



Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

ML



Il sistema di tipi

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML è *fortemente* e *staticamente* tipato
 - ◆ Il controllo dei tipi avviene interamente a tempo di compilazione



Il sistema di tipi

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML è *fortemente* e *staticamente* tipato
 - ◆ Il controllo dei tipi avviene interamente a tempo di compilazione
- Ma non richiede di dichiarare il tipo degli identificatori
 - ◆ spesso lo capisce da solo (*type inference*)



Il sistema di tipi

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML è *fortemente e staticamente* tipato
 - ◆ Il controllo dei tipi avviene interamente a tempo di compilazione
- Ma non richiede di dichiarare il tipo degli identificatori
 - ◆ spesso lo capisce da solo (*type inference*)
- Usa sia *structural equivalence* sia *name equivalence*



Il sistema di tipi

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML è *fortemente* e *staticamente* tipato
 - ◆ Il controllo dei tipi avviene interamente a tempo di compilazione
- Ma non richiede di dichiarare il tipo degli identificatori
 - ◆ spesso lo capisce da solo (*type inference*)
- Usa sia *structural equivalence* sia *name equivalence*
- Permette di definire *tipi ricorsivi* (liste, alberi, ...)



Il sistema di tipi

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML è *fortemente e staticamente* tipato
 - ◆ Il controllo dei tipi avviene interamente a tempo di compilazione
- Ma non richiede di dichiarare il tipo degli identificatori
 - ◆ spesso lo capisce da solo (*type inference*)
- Usa sia *structural equivalence* sia *name equivalence*
- Permette di definire *tipi ricorsivi* (liste, alberi, ...)
- Supporta *polimorfismo parametrico* (come i template)



Il sistema di tipi

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML è *fortemente* e *staticamente* tipato
 - ◆ Il controllo dei tipi avviene interamente a tempo di compilazione
- Ma non richiede di dichiarare il tipo degli identificatori
 - ◆ spesso lo capisce da solo (*type inference*)
- Usa sia *structural equivalence* sia *name equivalence*
- Permette di definire *tipi ricorsivi* (liste, alberi, ...)
- Supporta *polimorfismo parametrico* (come i template)
- Supporta *encapsulation* (tipi di dato astratti) ma non è un linguaggio a oggetti
 - ◆ mancano la gerarchia di tipi e – di conseguenza – l'ereditarietà



Il sistema di tipi

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML è *fortemente* e *staticamente* tipato
 - ◆ Il controllo dei tipi avviene interamente a tempo di compilazione
- Ma non richiede di dichiarare il tipo degli identificatori
 - ◆ spesso lo capisce da solo (*type inference*)
- Usa sia *structural equivalence* sia *name equivalence*
- Permette di definire *tipi ricorsivi* (liste, alberi, ...)
- Supporta *polimorfismo parametrico* (come i template)
- Supporta *encapsulation* (tipi di dato astratti) ma non è un linguaggio a oggetti
 - ◆ mancano la gerarchia di tipi e – di conseguenza – l'ereditarietà
- Il linguaggio OCaml supporta anche gerarchie di tipi ed ereditarietà (è object-oriented)



Implementazioni di ML

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

ML può essere usato in 2 modi:

1. Interagendo con l'interprete (ad es. **Standard ML of New Jersey**)
 - inserendo definizioni ed espressioni una per una
 - l'interprete risponde ad ogni passo
 - si possono caricare programmi da file digitando nella shell dell'interprete il comando

```
use "nome del file";
```

questo rende utilizzabili le dichiarazioni contenute nel file



Implementazioni di ML

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

ML può essere usato in 2 modi:

1. Interagendo con l'interprete (ad es. **Standard ML of New Jersey**)

- inserendo definizioni ed espressioni una per una
- l'interprete risponde ad ogni passo
- si possono caricare programmi da file digitando nella shell dell'interprete il comando

```
use "nome del file";
```

questo rende utilizzabili le dichiarazioni contenute nel file

2. Compilando un programma in codice oggetto direttamente eseguibile

- ad es. mediante il compilatore **mlton** per standard ML

```
mlton "nome del file.sml"
```

questo comando produce un file eseguibile con lo stesso nome (ma senza l'estensione .sml)



I tipi primitivi (I)

Detti anche *base types*

■ **int**: gli interi

0, 1, ~1, 2, ~2, ... 0xff, ~0x32, ...

Notare che si usa ~ invece del segno meno (-). Alcuni operatori:

+, -, *, **div**, mod, =, <, ...

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



I tipi primitivi (I)

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi
Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete
Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Detti anche *base types*

■ **int**: gli interi

0, 1, ~1, 2, ~2, ... 0xff, ~0x32, ...

Notare che si usa ~ invece del segno meno (-). Alcuni operatori:

+, -, *, **div**, mod, =, <, ...

■ **word**: unsigned integers, prefisso 0w

0w44, 0w15, ... 0xffff, ...



I tipi primitivi (I)

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Detti anche *base types*

■ **int**: gli interi

0, 1, ~1, 2, ~2, ... 0xff, ~0x32, ...

Notare che si usa ~ invece del segno meno (-). Alcuni operatori:

+, -, *, **div**, mod, =, <, ...

■ **word**: unsigned integers, prefisso 0w

0w44, 0w15, ... 0xffff, ...

■ **real**

3.14, 2.0, 0.1E6, ...

Alcuni operatori su real:

+, -, *, /, <, ...



I tipi primitivi (II)

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ string

```
"abc", "123", ...
```

Alcuni operatori su string:

```
^, size, =, <, ...
```




I tipi primitivi (II)

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ string

```
"abc", "123", ...
```

Alcuni operatori su string:

```
^, size, =, <, ...
```

■ char

```
#"a", #"\\n", #"\\163", ...
```

Alcuni operatori su char:

```
ord, chr, =, <, ...
```



I tipi primitivi (II)

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi
Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete
Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ string

```
"abc", "123", ...
```

Alcuni operatori su string:

```
^, size, =, <, ...
```

■ char

```
#"a", #"\\n", #"\\163", ...
```

Alcuni operatori su char:

```
ord, chr, =, <, ...
```

■ bool

```
true, false
```

Alcuni operatori su bool:

```
not, andalso, orelse, =
```



Interazione con l'interprete

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ Esempi di interazioni con l'interprete:

```
$ sml
Standard ML of New Jersey v110.79
-
```



Interazione con l'interprete

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ Esempi di interazioni con l'interprete:

```
$ sml
Standard ML of New Jersey v110.79
- 3;
```



Interazione con l'interprete

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ Esempi di interazioni con l'interprete:

```
$ sml
Standard ML of New Jersey v110.79
- 3;
val it = 3 : int
```



Interazione con l'interprete

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ Esempi di interazioni con l'interprete:

```
$ sml
Standard ML of New Jersey v110.79
- 3;
val it = 3 : int

- 0w7 mod 0w4;
val it = 0wx3 : word
```



Interazione con l'interprete

■ Esempi di interazioni con l'interprete:

```
$ sml
Standard ML of New Jersey v110.79
- 3;
val it = 3 : int

- 0w7 mod 0w4;
val it = 0wx3 : word

- "Hallo_" ^ "world";
val it = "Hallo_world" : string
```

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Interazione con l'interprete

■ Esempi di interazioni con l'interprete:

```
$ sml
Standard ML of New Jersey v110.79
- 3;
val it = 3 : int

- 0w7 mod 0w4;
val it = 0wx3 : word

- "Hallo_" ^ "world";
val it = "Hallo_world" : string

- ord #"a"; ord #"b";
val it = 97 : int
val it = 98 : int
```

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Interazione con l'interprete

■ Esempi di interazioni con l'interprete:

```
$ sml
Standard ML of New Jersey v110.79
- 3;
val it = 3 : int

- 0w7 mod 0w4;
val it = 0wx3 : word

- "Hallo_" ^ "world";
val it = "Hallo_world" : string

- ord #"a"; ord #"b";
val it = 97 : int
val it = 98 : int

- 3 + 2.2;
Error: operator and operand don't agree [overload conflict]
```

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Interazione con l'interprete

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ Esempi di interazioni con l'interprete:

```
$ sml
Standard ML of New Jersey v110.79
- 3;
val it = 3 : int

- 0w7 mod 0w4;
val it = 0wx3 : word

- "Hallo_" ^ "world";
val it = "Hallo_world" : string

- ord #"a"; ord #"b";
val it = 97 : int
val it = 98 : int

- 3 + 2.2;
Error: operator and operand don't agree [overload conflict]

- real(3) + 2.2;
val it = 5.2 : real
```

■ 'it' si riferisce all'espressione data; calcola sia *valore* che *tipo*



I tipi primitivi (III)

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- *Nessuna conversione automatica tra tipi numerici! Usare `real:int->real` e *basis library**

```
- val r = 3.0 + 2;  
Error: operator and operand don't agree  
  
- val r = 3.0 + real(2);  
val r = 5.0 : real  
  
- val i = 1 + 0w1;  
Error: operator and operand don't agree  
  
- val i = 1 + Word.toInt(0w1);  
val i = 2 : int
```

- C'è una *basis library* per ogni tipo primitivo (`Int`, `Word`, `Real...`) con funzioni per conversioni, parsing, e altre utilità



I tipi primitivi (IV)

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- *Real non supporta l'uguaglianza! Usare Real.==*

```
- val x = 1.0; val y = 2.0;
```

```
val x = 1.0 : real
```

```
val y = 2.0 : real
```

```
- x = y;
```

```
Error: operator and operand don't agree [equality type required]
```

```
- Real.==(x,y);
```

```
val it = false : bool
```



I tipi primitivi (IV)

Paradigma
funzionale

ML

Il sistema di tipi

Implementazioni

I tipi primitivi

Usare l'interprete

Ancora tipi primitivi

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- *Real non supporta l'uguaglianza! Usare Real.==*

```
- val x = 1.0; val y = 2.0;
val x = 1.0 : real
val y = 2.0 : real
- x = y;
Error: operator and operand don't agree [equality type required]

- Real.==(x,y);
val it = false : bool
```

- Questo perchè lo standard IEEE prevede valori che risultano da operazioni non definite, denominati **NaN** (not a number)

- ◆ Un NaN non è uguale a nessun altro numero, nemmeno a sé stesso

```
- val e = Math.sqrt(~2.0);
val e = nan : real

- Real.==(e,e);
val it = false : bool
```



Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione

ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
per. funz

Dichiarazioni e scoping in ML



Funzioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione
ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz

- Ci sono diversi modi di definire e chiamare funzioni in ML. Iniziamo con i più tradizionali

```
- fun quadr x = x * x;  
val quadr = fn : int -> int
```



Funzioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione

ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz

- Ci sono diversi modi di definire e chiamare funzioni in ML. Iniziamo con i più tradizionali

```
- fun quadr x = x * x;  
val quadr = fn : int -> int  
  
- quadr(3);  
val it = 9 : int
```




Funzioni

- Ci sono diversi modi di definire e chiamare funzioni in ML. Iniziamo con i più tradizionali

```
- fun quadr x = x * x;  
val quadr = fn : int -> int
```

```
- quadr(3);  
val it = 9 : int
```

```
- quadr 3;                                     (* in questo caso le parentesi sono opzionali *)  
val it = 9 : int
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione

ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz



Funzioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione

ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz

- Ci sono diversi modi di definire e chiamare funzioni in ML. Iniziamo con i più tradizionali

```
- fun quadr x = x * x;  
val quadr = fn : int -> int
```

```
- quadr(3);  
val it = 9 : int
```

```
- quadr 3;                                     (* in questo caso le parentesi sono opzionali *)  
val it = 9 : int
```

- Con **fun** si *dichiara* la funzione
 - ◆ fun aggiunge all'ambiente l'identificatore `quadr`
 - ◆ e lo associa alla funzione da interi a interi



Funzioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione

ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Ci sono diversi modi di definire e chiamare funzioni in ML. Iniziamo con i più tradizionali

```
- fun quadr x = x * x;  
val quadr = fn : int -> int
```

```
- quadr(3);  
val it = 9 : int
```

```
- quadr 3;                                     (* in questo caso le parentesi sono opzionali *)  
val it = 9 : int
```

- Con **fun** si *dichiara* la funzione

- ◆ fun aggiunge all'ambiente l'identificatore quadr
- ◆ e lo associa alla funzione da interi a interi

- Si può vedere cosa è associato a quadr *senza chiamare la funzione*

```
- quadr;                                     (* nome della funzione senza argomenti *)  
val it = fn : int -> int
```

Mostra solo il tipo (il valore è stato trasformato in bytecode)



Annotazioni di tipo

É possibile indicare esplicitamente i tipi:

```
- fun quadr (x :int) : int = x * x;  
val quadr = fn : int -> int
```

In assenza di annotazioni di tipo, scatta la *type inference*

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione
ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz



Una funzione ricorsiva

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione
ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz

```
- fun fatt x = if x=0 then 1 else x*fatt(x-1);  
val fatt = fn : int -> int
```



Una funzione ricorsiva

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione
ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz

```
- fun fatt x = if x=0 then 1 else x*fatt(x-1);  
val fatt = fn : int -> int  
  
- fatt(3);  
val it = 6 : int
```



Una funzione ricorsiva

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione
ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz

```
- fun fatt x = if x=0 then 1 else x*fatt(x-1);  
val fatt = fn : int -> int
```

```
- fatt(3);  
val it = 6 : int
```

```
- fatt 3;                                (* in questo caso le parentesi sono opzionali *)  
val it = 6 : int
```

- In ML il costrutto `if-then-else` denota un'espressione
- In Java/C/C++/etc., denota uno *statement* (non ha un valore)
- Quindi, `if-then-else` in ML è simile all'operatore ternario `?:` in Java/C/C++



Altre dichiarazioni di identificatori

- Con **val** si aggiunge un nuovo identificatore all'ambiente e gli si associa un valore

```
- val x = 2+2;  
val x = 4 : int  
  
- x+2;  
val it = 6 : int
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione
ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz



Altre dichiarazioni di identificatori

- Con **val** si aggiunge un nuovo identificatore all'ambiente e gli si associa un valore

```
- val x = 2+2;  
val x = 4 : int  
  
- x+2;  
val it = 6 : int
```

- Grammatica delle dichiarazioni viste sinora

```
<declaration> ::=  
    val <id name> = <expression> |  
    fun <func name> <argument>* = <expression>
```

Vedremo più avanti che `val` è più generale di `fun`

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione
ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
per la funzione par. funz



Scoping

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione

ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz

■ L'equivalente dei blocchi in ML è

```
let
    <dichiarazioni>
in
    <espressione>  (* le dichiarazioni valgono solo qui *)
end
```



Scoping

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione

ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz

■ L'equivalente dei blocchi in ML è

```
let
    <dichiarazioni>
in
    <espressione>  (* le dichiarazioni valgono solo qui *)
end
```

Lo scoping è **statico**. Esempi:

```
- let val x=2 in 3*x end;
  val it = 6 : int

- x;
Error: unbound variable or constructor: x

- let val x=2 in
    let val x=3 in (* questa def. maschera la precedente *)
      3*x
    end
  end;
  val it = 9 : int
```



Scoping (II)

■ Ambiente non locale delle funzioni

```
- val x=0;  
val x=0 : int
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione

ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz



Scoping (II)

■ Ambiente non locale delle funzioni

```
- val x=0;
val x=0 : int

- let val x=1 in
      let fun f(y) = x+y in          (* x è non locale *)
        f(0)
      end
    end;
val it = 1 : int
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione

ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz



Scoping (II)

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione

ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
L1 - lezione par. funz

■ Ambiente non locale delle funzioni

```
- val x=0;
val x=0 : int

- let val x=1 in
      let fun f(y) = x+y in          (* x è non locale *)
        f(0)
      end
    end;
val it = 1 : int
```

■ Forma equivalente più concisa

```
let
  val x=1
  fun f(y) = x+y
in
  f(0)
end;
```

dopo “let” possiamo mettere quante dichiarazioni vogliamo



Scoping (III)

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Funzioni

Annotazioni di tipo

Una funzione

ricorsiva

Altre dichiarazioni di
identificatori

Scoping

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore
LPI1 - lezione par. funz

Definizioni ausiliarie

■ locali ad altre definizioni

```
local
    <dichiarazioni>
in
    <dichiarazione>  (* le dichiarazioni sopra valgono solo qui *)
end
```

Simile a let ma dopo in c'è una **dichiarazione** invece di una espressione da valutare



Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

**Tipi strutturati in
ML**

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo
Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Tipi strutturati in ML



Prodotti cartesiani

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo
Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Si possono definire n -uple semplicemente mettendo i valori tra parentesi
- Il prodotto cartesiano viene indicato con ‘*’
- Si estrae l’ i -esimo elemento da una n -upla con l’operatore prefisso $\#i$



Prodotti cartesiani

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo
Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Si possono definire n -uple semplicemente mettendo i valori tra parentesi
- Il prodotto cartesiano viene indicato con ‘*’
- Si estrae l’ i -esimo elemento da una n -upla con l’operatore prefisso $\#i$

```
- (1+1, "A");  
val it = (2,"A") : int * string
```



Prodotti cartesiani

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo
Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Si possono definire n -uple semplicemente mettendo i valori tra parentesi
- Il prodotto cartesiano viene indicato con ‘*’
- Si estrae l’ i -esimo elemento da una n -upla con l’operatore prefisso $\#i$

```
- (1+1, "A");  
val it = (2,"A") : int * string  
  
- val x = (1,"A",3.5);  
val x = (1,"A",3.5) : int * string * real
```



Prodotti cartesiani

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo
Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Si possono definire n -uple semplicemente mettendo i valori tra parentesi
- Il prodotto cartesiano viene indicato con ‘*’
- Si estrae l’ i -esimo elemento da una n -upla con l’operatore prefisso $\#i$

```
- (1+1, "A");  
val it = (2,"A") : int * string  
  
- val x = (1,"A",3.5);  
val x = (1,"A",3.5) : int * string * real  
  
- #1(x);  
val it = 1 : int
```



Prodotti cartesiani

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo
Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Si possono definire n -uple semplicemente mettendo i valori tra parentesi
- Il prodotto cartesiano viene indicato con ‘*’
- Si estrae l’ i -esimo elemento da una n -upla con l’operatore prefisso $\#i$

```
- (1+1, "A");  
val it = (2,"A") : int * string  
  
- val x = (1,"A",3.5);  
val x = (1,"A",3.5) : int * string * real  
  
- #1(x);  
val it = 1 : int  
  
- #2(x);  
val it = "A" : string
```



Prodotti cartesiani

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo
Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Si possono definire n -uple semplicemente mettendo i valori tra parentesi
- Il prodotto cartesiano viene indicato con ‘*’
- Si estrae l’ i -esimo elemento da una n -upla con l’operatore prefisso $\#i$

```
- (1+1, "A");  
val it = (2,"A") : int * string  
  
- val x = (1,"A",3.5);  
val x = (1,"A",3.5) : int * string * real  
  
- #1(x);  
val it = 1 : int  
  
- #2(x);  
val it = "A" : string  
  
- #3(x);  
val it = 3.5 : real
```



Record

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo
Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Insiemi di espressioni `<nome>=<valore>`. Notate come viene rappresentato il tipo

```
- val r = {nome="Mario",nato=1998};  
val r = {nato=1998, nome="Mario"} : {nato:int, nome:string}
```



Record

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo
Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Insiemi di espressioni `<nome>=<valore>`. Notate come viene rappresentato il tipo

```
- val r = {nome="Mario", nato=1998};  
val r = {nato=1998, nome="Mario"} : {nato:int, nome:string}
```

- Il valore associato al nome N si estrae con $\#N$

```
- #nome(r);  
val it = "Mario" : string  
  
- #nato(r);  
val it = 1998 : int
```




Record

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo
Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Insiemi di espressioni `<nome>=<valore>`. Notate come viene rappresentato il tipo

```
- val r = {nome="Mario", nato=1998};  
val r = {nato=1998, nome="Mario"} : {nato:int, nome:string}
```

- Il valore associato al nome N si estrae con $\#N$

```
- #nome(r);  
val it = "Mario" : string  
  
- #nato(r);  
val it = 1998 : int
```

- L'ordine delle coppie non conta

```
- {nome="Mario", nato=1998} = {nato=1998, nome="Mario"};  
val it = true : bool
```



Dichiarazioni di tipo

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML permette di definire nuovi tipi similmente ai typedef del C

```
- type coord = real * real;  
type coord = real * real
```



Dichiarazioni di tipo

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML permette di definire nuovi tipi similmente ai typedef del C

```
- type coord = real * real;  
type coord = real * real
```

- Il compilatore va aiutato a stabilire il tipo

```
- val x = (3.0,4.0);                                (* senza aiutino *)  
val x = (3.0,4.0) : real * real  
  
- val x:coord = (3.0,4.0);                          (* con aiutino *)  
val x = (3.0,4.0) : coord
```

- I tipi coord e (real * real) sono compatibili tra loro
(*structural equivalence*)



Dichiarazioni di tipo

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML permette di definire nuovi tipi similmente ai typedef del C

```
- type coord = real * real;  
type coord = real * real
```

- Il compilatore va aiutato a stabilire il tipo

```
- val x = (3.0,4.0);                                (* senza aiutino *)  
val x = (3.0,4.0) : real * real  
  
- val x:coord = (3.0,4.0);                          (* con aiutino *)  
val x = (3.0,4.0) : coord
```

- I tipi coord e (real * real) sono compatibili tra loro
(*structural equivalence*)

- ◆ posso passare una espressione di tipo coord a un parametro di tipo (real * real) e viceversa



Dichiarazioni di tipo

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML permette di definire nuovi tipi similmente ai typedef del C

```
- type coord = real * real;  
type coord = real * real
```

- Il compilatore va aiutato a stabilire il tipo

```
- val x = (3.0,4.0);                                (* senza aiutino *)  
val x = (3.0,4.0) : real * real  
  
- val x:coord = (3.0,4.0);                          (* con aiutino *)  
val x = (3.0,4.0) : coord
```

- I tipi coord e (real * real) sono compatibili tra loro
(*structural equivalence*)

- ◆ posso passare una espressione di tipo coord a un parametro di tipo (real * real) e viceversa
- ◆ similmente coord è compatibile con ogni altro tipo definito come (real * real), come ad esempio

```
type coppia = real * real;
```



Datatypes e costruttori

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Con **datatype** si può fare di più che dare un nome a un tipo ML
 - ◆ si possono definire **costruttori** per creare *data objects*

```
- datatype color = red | green | blue;  
datatype color = blue | green | red
```



Datatypes e costruttori

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Con **datatype** si può fare di più che dare un nome a un tipo ML
 - ◆ si possono definire **costruttori** per creare *data objects*

```
- datatype color = red | green | blue;  
datatype color = blue | green | red  
  
- val c = red;  
val c = red : color
```

red, green, blue sono costruttori. Definiscono i possibili valori del tipo color



Datatypes e costruttori

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Con **datatype** si può fare di più che dare un nome a un tipo ML
 - ◆ si possono definire **costruttori** per creare *data objects*

```
- datatype color = red | green | blue;  
datatype color = blue | green | red  
  
- val c = red;  
val c = red : color
```

red, green, blue sono costruttori. Definiscono i possibili valori del tipo color

- Notare la somiglianza con le enum del C. Solo apparente...



Differenza tra datatypes e enumerazioni C

- C non prende sul serio le enumerazioni: non sono altro che int

```
enum color { red, green, blue };  
printf("%d%d%d",red,green,blue);      (* stampa 012 *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Differenza tra datatypes e enumerazioni C

- C non prende sul serio le enumerazioni: non sono altro che int

```
enum color { red, green, blue };  
printf("%d%d%d",red,green,blue);      (* stampa 012 *)  
  
enum color c = red;  
if( c == 0 ) then ... else ...;      (* esegue il then *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Differenza tra datatypes e enumerazioni C

- C non prende sul serio le enumerazioni: non sono altro che int

```
enum color { red, green, blue };  
printf("%d%d%d",red,green,blue);      (* stampa 012 *)  
  
enum color c = red;  
if( c == 0 ) then ... else ...;      (* esegue il then *)  
  
c = 10;                               (* nessun errore!!! *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Differenza tra datatypes e enumerazioni C

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- C non prende sul serio le enumerazioni: non sono altro che int

```
enum color { red, green, blue };  
printf("%d%d%d",red,green,blue);      (* stampa 012 *)  
  
enum color c = red;  
if( c == 0 ) then ... else ...;        (* esegue il then *)  
  
c = 10;                                (* nessun errore!!! *)
```

- Invece i datatypes di ML definiscono tipi genuinamente nuovi: nessuna corrispondenza con gli int

```
- val c:color = 10;  
Error: pattern and expression in val dec don't agree  
  
- c = 0;                                (* c è uguale a 0? *)  
Error: operator and operand don't agree
```

red, green, blue sono oggetti completamente nuovi



Differenza tra datatypes e enumerazioni C

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- C non prende sul serio le enumerazioni: non sono altro che int

```
enum color { red, green, blue };  
printf("%d%d%d",red,green,blue);      (* stampa 012 *)  
  
enum color c = red;  
if( c == 0 ) then ... else ...;        (* esegue il then *)  
  
c = 10;                                (* nessun errore!!! *)
```

- Invece i datatypes di ML definiscono tipi genuinamente nuovi: nessuna corrispondenza con gli int

```
- val c:color = 10;  
Error: pattern and expression in val dec don't agree  
  
- c = 0;                                (* c è uguale a 0? *)  
Error: operator and operand don't agree
```

red, green, blue sono oggetti completamente nuovi

- Ogni tipo definito con datatype è incompatibile con *tutti gli altri tipi (name equivalence)*



Costruttori con argomenti

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Un esempio: definire una lista concatenata di interi

- Se ne può dare una *definizione ricorsiva*: una lista di interi è
 - ◆ la lista vuota (caso base)
 - ◆ un nodo che contiene un intero e una lista di interi (caso induttivo)



Costruttori con argomenti

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

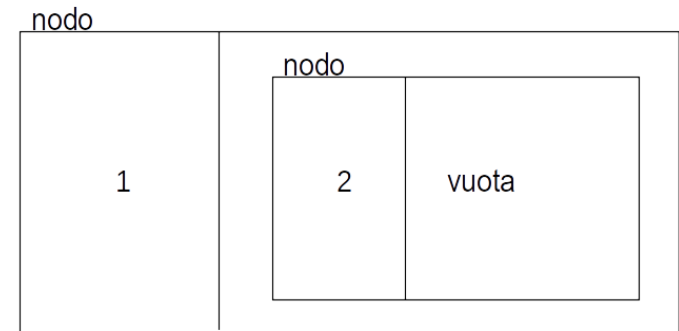
Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Un esempio: definire una lista concatenata di interi

- Se ne può dare una *definizione ricorsiva*: una lista di interi è
 - ◆ la lista vuota (caso base)
 - ◆ un nodo che contiene un intero e una lista di interi (caso induttivo)

Rappresentazione della lista [1,2]





Costruttori con argomenti

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

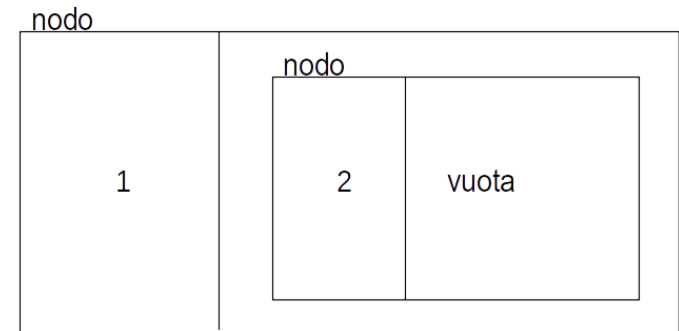
Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Un esempio: definire una lista concatenata di interi

- Se ne può dare una *definizione ricorsiva*: una lista di interi è
 - ◆ la lista vuota (caso base)
 - ◆ un nodo che contiene un intero e una lista di interi (caso induttivo)

Rappresentazione della lista [1,2]



- Quindi servono 2 costruttori: per la lista vuota e per i nodi

```
- datatype listaInt = vuota | nodo of int * listaInt;  
datatype listaInt = nodo of int * listaInt | vuota
```




Costruttori con argomenti

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

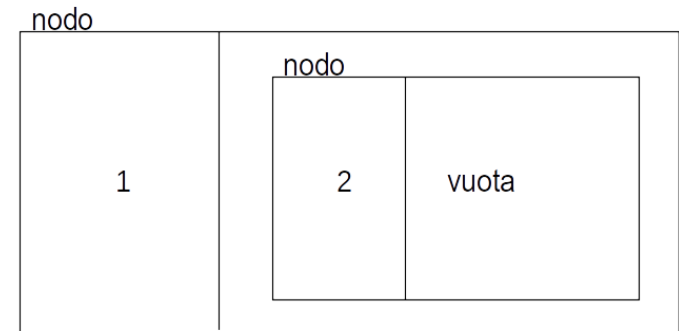
Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Un esempio: definire una lista concatenata di interi

- Se ne può dare una *definizione ricorsiva*: una lista di interi è
 - ◆ la lista vuota (caso base)
 - ◆ un nodo che contiene un intero e una lista di interi (caso induttivo)

Rappresentazione della lista [1,2]



- Quindi servono 2 costruttori: per la lista vuota e per i nodi

```
- datatype listaInt = vuota | nodo of int * listaInt;  
datatype listaInt = nodo of int * listaInt | vuota  
  
- val L = nodo(1, nodo(2, vuota));  
val L = nodo (1,nodo (2,vuota)) : listaInt
```



Costruttori con argomenti (II)

Altro esempio: albero binario con nodi etichettati da interi

- Definizione ricorsiva: un albero simile è
 - ◆ un albero vuoto, oppure
 - ◆ un nodo che contiene un intero e due alberi dello stesso tipo

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Costruttori con argomenti (II)

Altro esempio: albero binario con nodi etichettati da interi

- Definizione ricorsiva: un albero simile è
 - ◆ un albero vuoto, oppure
 - ◆ un nodo che contiene un intero e due alberi dello stesso tipo

```
datatype albero = vuoto | nodoAlb of int * albero * albero
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Costruttori con argomenti (II)

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Prodotti cartesiani

Record

Dichiarazioni di tipo

Datatypes e
costruttori

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Altro esempio: albero binario con nodi etichettati da interi

■ Definizione ricorsiva: un albero simile è

- ◆ un albero vuoto, oppure
- ◆ un nodo che contiene un intero e due alberi dello stesso tipo

```
datatype albero = vuoto | nodoAlb of int * albero * albero
```

In questo esempio costruiamo un albero con radice 1, figlio sinistro 2 (che è una foglia), mentre il figlio destro manca.

```
nodoAlb (1,nodoAlb (2,vuoto,vuoto),vuoto)
```



Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Patterns

Def. per casi

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Patterns e matching



Utilizzo dei costruttori con argomenti

- Per scandire una lista abbiamo innanzitutto bisogno di controllare se è vuota

```
- val L = nodo(1, nodo(2, vuota));  
val L = nodo (1,nodo (2,vuota)) : listaInt  
  
- L = vuota;  
val it = false : bool
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Patterns

Def. per casi

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Utilizzo dei costruttori con argomenti

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Patterns

Def. per casi

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Per scandire una lista abbiamo innanzitutto bisogno di controllare se è vuota

```
- val L = nodo(1, nodo(2, vuota));  
val L = nodo (1,nodo (2,vuota)) : listaInt  
  
- L = vuota;  
val it = false : bool
```

- Se non è vuota potrebbe servirci il primo elemento. Si estrae con *pattern matching*

```
- val nodo(p,_) = L;    (* assegna a p il 1° elemento di L *)  
val p = 1 : int         (* "_" è una wildcard *)
```

La parte in rosso è chiamata *pattern*



Utilizzo dei costruttori con argomenti

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Patterns

Def. per casi

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Per scandire una lista abbiamo innanzitutto bisogno di controllare se è vuota

```
- val L = nodo(1, nodo(2, vuota));  
val L = nodo (1,nodo (2,vuota)) : listaInt  
  
- L = vuota;  
val it = false : bool
```

- Se non è vuota potrebbe servirci il primo elemento. Si estrae con *pattern matching*

```
- val nodo(p,_) = L;    (* assegna a p il 1° elemento di L *)  
val p = 1 : int         (* "_" è una wildcard *)
```

La parte in rosso è chiamata *pattern*

- Per ottenere il resto della lista

```
- val nodo(_,r) = L;    (* assegna a r il resto *)  
val r = nodo (2,vuota) : listaInt
```




Funzione che conta gli elementi della lista

- Ovviamente deve essere *ricorsiva* (niente cicli!)

```
- fun conta x =  
    if x = vuota then 0  
    else  
        let val nodo(_, r) = x in  
            conta(r) + 1  
        end;  
val conta = fn : listaInt -> int  
  
- conta L;  
val it = 2 : int
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Patterns

Def. per casi

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Funzione che conta gli elementi della lista

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Patterns

Def. per casi

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Ovviamente deve essere *ricorsiva* (niente cicli!)

```
- fun conta x =  
    if x = vuota then 0  
    else  
        let val nodo(_, r) = x in  
            conta(r) + 1  
        end;  
val conta = fn : listaInt -> int  
  
- conta L;  
val it = 2 : int
```

- Notare come il compilatore ha *inferito* il tipo della funzione

1. x viene confrontato con “vuota”, che è di tipo listaInt \Rightarrow anche x è di tipo listaInt \Rightarrow l’input di “conta” è un listaInt
2. il “then” restituisce 0, che è un intero; quindi l’output di “conta” è un intero



Funzione che conta gli elementi della lista

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Patterns

Def. per casi

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Ovviamente deve essere *ricorsiva* (niente cicli!)

```
- fun conta x =  
    if x = vuota then 0  
    else  
        let val nodo(_, r) = x in  
            conta(r) + 1  
        end;  
val conta = fn : listaInt -> int  
  
- conta L;  
val it = 2 : int
```

- Inoltre il compilatore controlla che anche il resto della funzione sia compatibile con questi tipi

1. r corrisponde al 2° argomento del nodo, che è di tipo `listaInt` \Rightarrow è corretto passarlo a `conta` che restituisce un intero
2. quindi anche l'`else` restituisce un intero, e tutto torna



Abbreviazioni per i pattern

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching
Patterns

Def. per casi

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Si possono estrarre tutti gli elementi di un costruttore in un colpo solo

```
- val nodo(p, r) = L;  
val p = 1 : int  
val r = nodo (2, vuota) : listaInt
```

Cioè dichiara due identificatori (p e r) in un colpo solo



Abbreviazioni per i pattern

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching
Patterns

Def. per casi

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Si possono estrarre tutti gli elementi di un costruttore in un colpo solo

```
- val nodo(p, r) = L;  
val p = 1 : int  
val r = nodo (2, vuota) : listaInt
```

Cioè dichiara due identificatori (p e r) in un colpo solo

- Si può *definire una funzione per casi*

```
- fun conta(vuota) = 0  
  | conta(nodo(_, r)) = conta(r) + 1;
```

mettendo direttamente i pattern al posto dei parametri formali

Notare l'eleganza e la concisione



Analogo per i pattern dello switch/case del C

- L'idea è la stessa della definizione per casi delle funzioni

```
- case L of vuota => true
    | nodo(_, _) => false;

val it = false : bool
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Patterns

Def. per casi

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Esercizi

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Patterns

Def. per casi

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

1. Scrivere in ML una funzione `size` che restituisce il *numero di nodi* in un albero binario come quello visto in precedenza
2. Scrivere in ML una funzione che, dato un albero binario *A* come quello visto in precedenza, e un intero *N*, restituisce l'etichetta del nodo che si raggiunge in *N* passi visitando l'albero in preordine
3. Simile all'esercizio 2, ma visitando l'albero in postordine (difficile)



[Paradigma
funzionale](#)

[ML](#)

[Dichiarazioni e
scoping in ML](#)

[Tipi strutturati in
ML](#)

[Patterns e matching](#)

Liste

[Le liste in ML](#)

[Currying](#)

[Funzioni di ordine
superiore](#)

[Polimorfismo
parametrico](#)

[Encapsulation e
interfacce](#)

[Eccezioni e
integrazione con
type checking](#)

[Esempio: un
semplice compilatore](#)

Liste



Le liste in ML

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Le liste in ML

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Le liste sono tra le strutture dati più usate in programmazione funzionale
 - ◆ in qualche misura sostituiscono i vettori (concetto essenzialmente imperativo)



Le liste in ML

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Le liste in ML

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Le liste sono tra le strutture dati più usate in programmazione funzionale
 - ◆ in qualche misura sostituiscono i vettori (concetto essenzialmente imperativo)
- Perciò ML le fornisce built-in con i costruttori **nil** e **::**

```
nil                (* lista vuota *)  
1 :: 2 :: 3 :: nil (* lista che contiene 1, 2, 3 *)
```



Le liste in ML

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Le liste in ML

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Le liste sono tra le strutture dati più usate in programmazione funzionale
 - ◆ in qualche misura sostituiscono i vettori (concetto essenzialmente imperativo)
- Perciò ML le fornisce built-in con i costruttori **nil** e **::**

```
nil                (* lista vuota *)
1 :: 2 :: 3 :: nil  (* lista che contiene 1, 2, 3 *)

(* formato equivalente basato su parentesi quadre *)
[]
[1,2,3]
```



Le liste in ML

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Le liste in ML

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Le liste sono tra le strutture dati più usate in programmazione funzionale
 - ◆ in qualche misura sostituiscono i vettori (concetto essenzialmente imperativo)
- Perciò ML le fornisce built-in con i costruttori **nil** e **::**

```
nil                                (* lista vuota *)
1 :: 2 :: 3 :: nil                 (* lista che contiene 1, 2, 3 *)

(* formato equivalente basato su parentesi quadre *)
[]
[1,2,3]

(* sono veramente equivalenti *)
- [] = nil;
val it = true : bool

- 1::2::3::nil = [1,2,3];
val it = true : bool
```



Principali operatori sulle liste in ML

- La funzione `length` restituisce la lunghezza di una lista

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Le liste in ML

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Principali operatori sulle liste in ML

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Le liste in ML

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La funzione **length** restituisce la lunghezza di una lista
- La funzione **null** restituisce true se la lista è vuota



Principali operatori sulle liste in ML

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Le liste in ML

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La funzione **length** restituisce la lunghezza di una lista
- La funzione **null** restituisce true se la lista è vuota
- Le funzioni **hd** (*head*) e **tl** (*tail*) restituiscono il primo elemento e il resto della lista, rispettivamente



Principali operatori sulle liste in ML

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Le liste in ML

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La funzione `length` restituisce la lunghezza di una lista
- La funzione `null` restituisce true se la lista è vuota
- Le funzioni `hd` (*head*) e `tl` (*tail*) restituiscono il primo elemento e il resto della lista, rispettivamente
- L'operatore infisso `@` restituisce la concatenazione di due liste

```
- val L = [1,2,3];  
val L = [1,2,3] : int list  
  
- hd L;  
val it = 1 : int  
  
- tl L;  
val it = [2,3] : int list  
  
- val M = [1,2] @ [3,4];  
val M = [1,2,3,4] : int list
```




Funzioni aggiuntive su liste

- Altre funzioni si trovano nella struttura `List`, ad esempio
 - ◆ `List.nth(L,i)` restituisce l' i -esimo elemento di `L` (partendo da 0)

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Le liste in ML

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Funzioni aggiuntive su liste

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Le liste in ML

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Altre funzioni si trovano nella struttura `List`, ad esempio
 - ◆ `List.nth(L,i)` restituisce l' i -esimo elemento di `L` (partendo da 0)
 - ◆ `List.last(L)` restituisce l'ultimo elemento di `L`
- vedere <http://sml-family.org/Basis/list.html>
- In ML, una *struttura* è simile a un modulo o un package



Esercizi

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Le liste in ML

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Scrivere in ML:

1. le funzioni standard su liste riportate nelle slide precedenti: `hd`, `tl`, `List.nth`, `List.last`;
2. una funzione `member` che dati una lista `L` e un intero `N`, restituisce `true` se e solo se `N` appartiene ad `L`.
3. una funzione `append` che, dati una lista `L` e un intero `N`, accoda `N` in fondo alla lista (inserimento in coda);
4. una funzione `concat` che concatena due liste (come l'operatore `@`);
5. una funzione `reverse` che inverte l'ordine degli elementi di una lista (suggerimento: usare un parametro aggiuntivo che serve a costruire progressivamente la lista invertita).



[Paradigma
funzionale](#)

[ML](#)

[Dichiarazioni e
scoping in ML](#)

[Tipi strutturati in
ML](#)

[Patterns e matching](#)

[Liste](#)

Currying

[Funzioni di ordine
superiore](#)

[Polimorfismo
parametrico](#)

[Encapsulation e
interfacce](#)

[Eccezioni e
integrazione con
type checking](#)

[Esempio: un
semplice compilatore](#)

Currying



Funzioni con più argomenti: esistono?

- In realtà in ML ogni funzione ha un solo argomento

```
fun f (x,y) = ...      (* l'argomento è una (singola) coppia *)  
  
fun f x y = ...        (* l'argomento è x ! *)
```

Nel secondo caso, f è una funzione che *restituisce una funzione* che prende y e calcola l'espressione dopo '='

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Funzioni con più argomenti: esistono?

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- In realtà in ML ogni funzione ha un solo argomento

```
fun f (x,y) = ...      (* l'argomento è una (singola) coppia *)  
  
fun f x y = ...        (* l'argomento è x ! *)
```

Nel secondo caso, f è una funzione che *restituisce una funzione* che prende y e calcola l'espressione dopo '='

- Esempio semplice

```
- fun f (x,y) = x+y;  
val f = fn : int * int -> int  
  
- fun f' x y = x+y;  
val f' = fn : int -> int -> int
```

Il tipo $\text{int} \rightarrow \text{int} \rightarrow \text{int}$ va inteso come $\text{int} \rightarrow (\text{int} \rightarrow \text{int})$



Currying

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La trasformazione da n-uple (come $f(x,y)$) a funzioni che restituiscono funzioni (come $f' x y$) si chiama *currying* (dal nome di Haskell Curry)
- L'utilizzo è ovviamente diverso

```
- fun f (x,y) = x+y;  
val f = fn : int * int -> int  
  
- fun f' x y = x+y;  
val f' = fn : int -> int -> int
```



Currying

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La trasformazione da n-uple (come $f(x,y)$) a funzioni che restituiscono funzioni (come $f' \ x \ y$) si chiama *currying* (dal nome di Haskell Curry)
- L'utilizzo è ovviamente diverso

```
- fun f (x,y) = x+y;  
val f = fn : int * int -> int  
  
- fun f' x y = x+y;  
val f' = fn : int -> int -> int  
  
- f (3,2);  
val it = 5 : int
```




Currying

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La trasformazione da n-uple (come $f(x,y)$) a funzioni che restituiscono funzioni (come $f' x y$) si chiama *currying* (dal nome di Haskell Curry)
- L'utilizzo è ovviamente diverso

```
- fun f (x,y) = x+y;  
val f = fn : int * int -> int  
  
- fun f' x y = x+y;  
val f' = fn : int -> int -> int  
  
- f (3,2);  
val it = 5 : int  
  
- f' 3 2; (* viene interpretato come (f'3)(2) *)  
val it = 5 : int
```



Currying

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La trasformazione da n-uple (come $f(x,y)$) a funzioni che restituiscono funzioni (come $f' x y$) si chiama *currying* (dal nome di Haskell Curry)
- L'utilizzo è ovviamente diverso

```
- fun f (x,y) = x+y;  
val f = fn : int * int -> int  
  
- fun f' x y = x+y;  
val f' = fn : int -> int -> int  
  
- f (3,2);  
val it = 5 : int  
  
- f' 3 2; (* viene interpretato come (f'3)(2) *)  
val it = 5 : int  
  
- f 3 2;  
Error: operator and operand don't agree
```



Currying

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La trasformazione da n-uple (come $f(x,y)$) a funzioni che restituiscono funzioni (come $f' x y$) si chiama *currying* (dal nome di Haskell Curry)
- L'utilizzo è ovviamente diverso

```
- fun f (x,y) = x+y;  
val f = fn : int * int -> int  
  
- fun f' x y = x+y;  
val f' = fn : int -> int -> int  
  
- f (3,2);  
val it = 5 : int  
  
- f' 3 2;                                (* viene interpretato come (f'3)(2) *)  
val it = 5 : int  
  
- f 3 2;  
Error: operator and operand don't agree  
  
- f' (3,2);  
Error: operator and operand don't agree
```



Currying

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La trasformazione da n-uple (come $f(x,y)$) a funzioni che restituiscono funzioni (come $f' x y$) si chiama *currying* (dal nome di Haskell Curry)
- L'utilizzo è ovviamente diverso

```
- fun f (x,y) = x+y;  
val f = fn : int * int -> int  
  
- fun f' x y = x+y;  
val f' = fn : int -> int -> int  
  
- f (3,2);  
val it = 5 : int  
  
- f' 3 2;                                (* viene interpretato come (f'3)(2) *)  
val it = 5 : int  
  
- f 3 2;  
Error: operator and operand don't agree  
  
- f' (3,2);  
Error: operator and operand don't agree  
  
- val g = f' 3;  
val g = fn : int -> int
```



Currying

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La trasformazione da n-uple (come $f(x,y)$) a funzioni che restituiscono funzioni (come $f' x y$) si chiama *currying* (dal nome di Haskell Curry)
- L'utilizzo è ovviamente diverso

```
- fun f (x,y) = x+y;
val f = fn : int * int -> int

- fun f' x y = x+y;
val f' = fn : int -> int -> int

- f (3,2);
val it = 5 : int

- f' 3 2;                                (* viene interpretato come (f'3)(2) *)
val it = 5 : int

- f 3 2;
Error: operator and operand don't agree

- f' (3,2);
Error: operator and operand don't agree

- val g = f' 3;
val g = fn : int -> int

- g 1;
val it = 4 : int
```



Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

**Funzioni di ordine
superiore**

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Funzioni di ordine superiore



Invece dei cicli: Funzioni di ordine superiore

- La maggior parte delle funzioni ricorsive che operano su liste, alberi e simili hanno la stessa struttura
- Cambia solo l'operazione che si applica ai nodi

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Invece dei cicli: Funzioni di ordine superiore

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La maggior parte delle funzioni ricorsive che operano su liste, alberi e simili hanno la stessa struttura
- Cambia solo l'operazione che si applica ai nodi
- Quindi basta scrivere una volta per tutte la funzione che scandisce la struttura dati (che fa la funzione del ciclo)
- e passargli la funzione da applicare ai nodi



Invece dei cicli: Funzioni di ordine superiore

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La maggior parte delle funzioni ricorsive che operano su liste, alberi e simili hanno la stessa struttura
- Cambia solo l'operazione che si applica ai nodi
- Quindi basta scrivere una volta per tutte la funzione che scandisce la struttura dati (che fa la funzione del ciclo)
- e passargli la funzione da applicare ai nodi
 - ◆ Le funzioni che hanno altre funzioni come parametri sono dette di *ordine superiore*



Esempio

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Una funzione f che esegue due volte una funzione g su un valore x :

```
- fun f g x = g(g(x));  
val f = fn : ('a -> 'a) -> 'a -> 'a
```

Equivalente in C (solo per interi):

```
int f( int (*g)(int), int x) {  
    return g(g(x));  
}
```



Invece dei cicli: Funzioni di ordine superiore

■ Le tipologie di funzioni/ciclo più comuni sono tre:

- ◆ filter
- ◆ map
- ◆ reduce/fold

Nel seguito mostriamo le loro versioni per le liste

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Filter

- La funzione `filter` prende una funzione booleana `f` e una lista `L`
- seleziona gli elementi di `L` per cui `f` è vera

```
fun filter f [] = []  
  | filter f (x::y) = if f(x) then x::(filter f y)  
                      else filter f y
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Filter

- La funzione `filter` prende una funzione booleana `f` e una lista `L`
- seleziona gli elementi di `L` per cui `f` è vera

```
fun filter f [] = []  
  | filter f (x::y) = if f(x) then x::(filter f y)  
                      else filter f y  
  
(* esempio: seleziona gli elementi negativi da una lista *)  
- let fun neg x = x<0  
    in filter neg [0,~1,3,~2] end;  
val it = [~1,~2] : int list
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Filter

- La funzione `filter` prende una funzione booleana `f` e una lista `L`
- seleziona gli elementi di `L` per cui `f` è vera

```
fun filter f [] = []  
  | filter f (x::y) = if f(x) then x::(filter f y)  
                      else filter f y  
  
(* esempio: seleziona gli elementi negativi da una lista *)  
- let fun neg x = x<0  
    in filter neg [0,~1,3,~2] end;  
val it = [~1,~2] : int list  
  
(* esempio: seleziona gli elementi positivi da una lista *)  
- let fun pos x = x>0  
    in filter pos [0,~1,3,~2] end;  
val it = [3] : int list
```

Nella libreria standard: `List.filter`

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Map

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La funzione `map` prende una funzione `f` e una lista `L`
- applica `f` a tutti gli elementi della lista, ottenendo una nuova lista

```
fun map f [] = []  
  | map f (x::y) = f(x)::(map f y)
```



Map

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La funzione `map` prende una funzione `f` e una lista `L`
- applica `f` a tutti gli elementi della lista, ottenendo una nuova lista

```
fun map f [] = []  
  | map f (x::y) = f(x)::(map f y)  
  
(* esempio: conversione in lista di reali *)  
- map real [1,2,3];  
val it = [1.0,2.0,3.0] : real list
```




Map

- La funzione `map` prende una funzione `f` e una lista `L`
- applica `f` a tutti gli elementi della lista, ottenendo una nuova lista

```
fun map f [] = []  
  | map f (x::y) = f(x)::(map f y)  
  
(* esempio: conversione in lista di reali *)  
- map real [1,2,3];  
val it = [1.0,2.0,3.0] : real list  
  
(* esempio: conversione in lista di stringhe *)  
- map Int.toString [1,2,3];  
val it = ["1","2","3"] : string list
```

Nella libreria standard: `List.map`

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Reduce/fold

- La funzione reduce serve per calcolare *aggregati* di una lista
 - ◆ min, max, somma, prodotto, media...

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

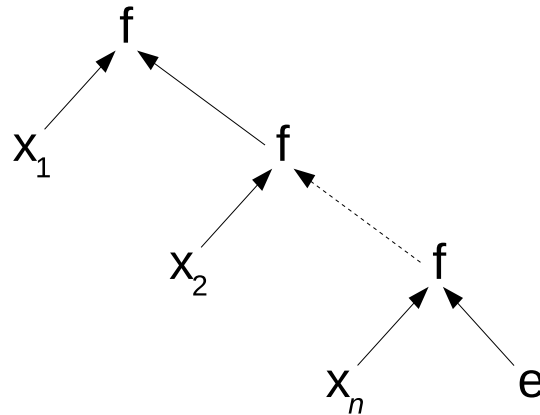


Reduce/fold

- Paradigma funzionale
- ML
- Dichiarazioni e scoping in ML
- Tipi strutturati in ML
- Patterns e matching
- Liste
- Currying
- Funzioni di ordine superiore
- Esempio
- Filter, Map, Reduce**
- Funzioni anonime
- Val vs. fun
- Currying
- Polimorfismo parametrico
- Encapsulation e interfacce
- Eccezioni e integrazione con type checking
- Esempio: un semplice compilatore

- La funzione reduce serve per calcolare *aggregati* di una lista
 - ◆ min, max, somma, prodotto, media...
- Prende in input una funzione a 2 argomenti f , un valore finale e e una lista L ed effettua questo calcolo:

$$\text{reduce } f \text{ e } [x_1, x_2, \dots, x_n] = f(x_1, f(x_2, \dots f(x_n, e) \dots))$$





Reduce/fold

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

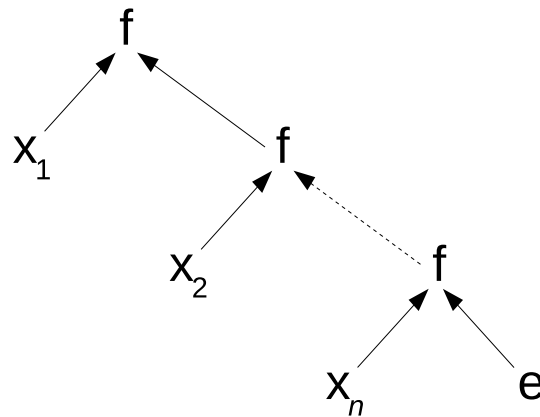
Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La funzione reduce serve per calcolare *aggregati* di una lista
 - ◆ min, max, somma, prodotto, media...
- Prende in input una funzione a 2 argomenti f , un valore finale e e una lista L ed effettua questo calcolo:

$$\text{reduce } f \text{ e } [x_1, x_2, \dots, x_n] = f(x_1, f(x_2, \dots f(x_n, e) \dots))$$



Ad esempio se f è '+' ed $e=0$ allora reduce calcola la somma degli elementi della lista



Reduce

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ Definizione di reduce ed esempi

```
fun reduce f e [] = e
  | reduce f e (x :: y) = f (x, reduce f e y)
```



Reduce

■ Definizione di reduce ed esempi

```
fun reduce f e [] = e
  | reduce f e (x :: y) = f (x, reduce f e y)
```

```
(* esempio: somma (sbagliato, + è infisso...) *)
- reduce + 0 [1,2,3];
Error: ...
```

```
(* esempio: somma (corretto) *)
- reduce (op +) 0 [1,2,3];
val it = 6 : int
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Reduce

■ Definizione di reduce ed esempi

```
fun reduce f e [] = e
  | reduce f e (x :: y) = f (x, reduce f e y)
```

```
(* esempio: somma (sbagliato, + è infisso...) *)
- reduce + 0 [1,2,3];
Error: ...
```

```
(* esempio: somma (corretto) *)
- reduce (op +) 0 [1,2,3];
val it = 6 : int
```

```
(* esempio: media di  $[x_1, \dots, x_n] = x_1/n + \dots + x_n/n$  *)
- let
      fun f L (elem, accum) = elem / real(length L) + accum
      val lista = [1.0, 2.0, 3.0]
    in
      reduce (f lista) 0.0 lista
    end;
val it = 2.0 : real
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Reduce

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ Simile alla funzione standard `List.foldr`

■ `List.foldr f e l` restituisce:

$$f(x_1, f(x_2, \dots f(x_{n-1}, f(x_n, e))))$$

■ Su lista vuota, restituisce e

■ É più generale di reduce, perché f può accettare due tipi diversi:

$$f : 'a * 'b \rightarrow 'b$$

■ Tipo di `List.foldr`:

$$fn : ('a * 'b \rightarrow 'b) \rightarrow 'b \rightarrow 'a \text{ list} \rightarrow 'b$$



Esempio di foldr

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

```
- fun f (n:int, s:string) = Int.toString(n) ^ ";" ^ s;  
val f = fn : int * string -> string
```

```
- f (323, "aaa");  
val it = "323;aaa" : string
```

```
- List.foldr f "fine" [23,3434,44,0,12];  
val it = "23;3434;44;0;12;fine" : string
```



In altri linguaggi

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

In Java 8+ (semplificato):

```
interface java.util.stream.Stream<T> {  
    ...  
    Stream<T> filter(Predicate<T> predicate)  
    <R> Stream<R> map(Function<T,R> mapper)  
    T reduce(T identity, BinaryOperator<T> accumulator)  
}
```

In Python:

```
filter(funzione lista)  
map(funzione, lista)  
reduce(funzione, lista [, inizializzatore])
```



Esercizi su funzioni di ordine superiore

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Implementare in ML le seguenti funzioni, sfruttando al meglio filter, map e reduce

1. `pari`: data una lista di interi `L`, restituisce la sottolista che contiene solo i numeri pari in `L`
2. `membro`: dati una lista di interi e un intero, restituisce *true* se e solo se l'intero compare nella lista
3. `concat`: data una lista di stringhe, restituisce la loro concatenazione
4. `max`: data una lista di interi, restituisce il massimo



Funzioni anonime

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Quando utilizziamo funzioni di ordine superiori come filter, map e reduce, può far comodo passargli funzioni semplici, specificate lì per lì senza dover dare loro un nome (né usare un blocco *let*)
- Queste funzioni anonime si specificano con la keyword **fn**

Sintassi:

```
fn <argomento> => <espressione>
```

Esempi:

```
- fn x => x+1;
val it = fn : int -> int

(* per sommare uno a tutti gli elementi di una lista *)
- map (fn x => x+1) [1,2,3];
val it = [2,3,4] : int list

- filter (fn x => (x mod 2) = 0) [10,11,12,13];
val it = [10,12] : int list
```



In altri linguaggi funzionali

In Lisp e Scheme l'equivalente di `fn` è la keyword *lambda*

- storicamente deriva dal *lambda calcolo*, un modello di calcolo matematico basato su funzioni di ordine superiore a cui tutti i linguaggi funzionali si sono ispirati
- nel lambda calcolo l'operatore λ è l'analogo di `fn`
 - ◆ come in $\lambda x. x + 1$

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



In altri linguaggi imperativi

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Una funzione anonima che accetta una stringa e restituisce vero se è più lunga di 10 caratteri

In Java:

```
s -> s.length() > 10;
```

In C++:

```
[] (string s) { return s.length() > 10; };
```

In Python:

```
lambda s: len(s) > 10
```



Esercizi su funzioni anonime

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

1. Spiegare perchè una funzione anonima non può essere ricorsiva
2. Svolgere nuovamente gli esercizi sulle funzioni di ordine superiore, sfruttando al meglio le *funzioni anonime*



Val vs. fun

- Adesso possiamo vedere in che senso `val` è più generale di `fun`. Le seguenti definizioni sono equivalenti:

```
- fun f x = x + 1;  
val f = fn : int -> int  
  
- val f = fn x => x+1;  
val f = fn : int -> int
```

In altre parole, `fun` è *zucchero sintattico*, cioè una utile abbreviazione per qualcosa che si potrebbe fare in altro modo (con `val`)

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Ulteriori dettagli su currying

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Adesso possiamo mostrare più esplicitamente la natura del currying. Riprendiamo l'esempio

```
- fun f' x y = x+y;
```

- In effetti f' può essere definita equivalentemente come

```
fun f' x = fn y => x+y
```

```
val f' = fn : int -> int -> int
```



Ulteriori dettagli su currying

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Adesso possiamo mostrare più esplicitamente la natura del currying. Riprendiamo l'esempio

```
- fun f' x y = x+y;
```

- In effetti f' può essere definita equivalentemente come

```
fun f' x = fn y => x+y
```

```
val f' = fn : int -> int -> int
```

- L'esempio della chiamata di f' con un solo parametro può essere spiegata così:

```
- val g = f' 3;      (* come fosse val g = fn y => 3+y *)  
val g = fn : int -> int
```

```
- g 1;  
val it = 4 : int
```



Ulteriori dettagli su currying

- È anche possibile definire funzioni che effettuano il currying e la sua trasformazione inversa per una data funzione del tipo giusto

```
(* f deve accettare una coppia (x,y) *)  
val curry_2args = fn f => fn x => fn y => f (x, y)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Ulteriori dettagli su currying

- È anche possibile definire funzioni che effettuano il currying e la sua trasformazione inversa per una data funzione del tipo giusto

```
(* f deve accettare una coppia (x,y) *)  
val curry_2args = fn f => fn x => fn y => f (x, y)  
  
(* f deve essere del tipo f x y *)  
val uncurry_2args = fn f => fn (x, y) => f x y
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Ulteriori dettagli su currying

- È anche possibile definire funzioni che effettuano il currying e la sua trasformazione inversa per una data funzione del tipo giusto

```
(* f deve accettare una coppia (x,y) *)  
val curry_2args = fn f => fn x => fn y => f (x, y)  
  
(* f deve essere del tipo f x y *)  
val uncurry_2args = fn f => fn (x, y) => f x y
```

- Esempi di utilizzo

```
fun f (x,y) = x+y;  
  
val f' = curry_2args f; (* equivalente a f' x y = x+y *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Ulteriori dettagli su currying

- È anche possibile definire funzioni che effettuano il currying e la sua trasformazione inversa per una data funzione del tipo giusto

```
(* f deve accettare una coppia (x,y) *)  
val curry_2args = fn f => fn x => fn y => f (x, y)  
  
(* f deve essere del tipo f x y *)  
val uncurry_2args = fn f => fn (x, y) => f x y
```

- Esempi di utilizzo

```
fun f (x,y) = x+y;  
  
val f' = curry_2args f; (* equivalente a f' x y = x+y *)
```

oppure

```
fun f' x y = x+y;  
  
val f = uncurry_2args f'; (* equivalente a f(x,y) = x+y *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Esempio

Filter, Map, Reduce

Funzioni anonime

Val vs. fun

Currying

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

**Polimorfismo
parametrico**

Tipi parametrici

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Polimorfismo parametrico



Tipi parametrici

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Tipi parametrici

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML supporta l'analogo dei *template* di C++ e Java, ovvero *tipi parametrici*



Tipi parametrici

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Tipi parametrici

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML supporta l'analogo dei *template* di C++ e Java, ovvero *tipi parametrici*
- In realtà li stiamo usando da quando usiamo le liste:
 - ◆ il costruttore `::` può essere applicato a qualunque tipo

```
1 :: nil oppure "abc" :: nil ...
```



Tipi parametrici

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Tipi parametrici

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML supporta l'analogo dei *template* di C++ e Java, ovvero *tipi parametrici*
- In realtà li stiamo usando da quando usiamo le liste:
 - ◆ il costruttore `::` può essere applicato a qualunque tipo

```
1 :: nil    oppure    "abc" :: nil ...  
  
- length;  
val it = fn : 'a list -> int
```

La funzione *length* prende una lista di elementi il cui tipo `'a` non è specificato

- ◆ cioè accetta liste con qualsiasi contenuto
- ◆ in effetti non ha bisogno di saperne il tipo: deve solo contare in nodi



Tipi parametrici

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Tipi parametrici

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML supporta l'analogo dei *template* di C++ e Java, ovvero *tipi parametrici*
- In realtà li stiamo usando da quando usiamo le liste:
 - ◆ il costruttore `::` può essere applicato a qualunque tipo

```
1 :: nil    oppure    "abc" :: nil    ...  
  
- length;  
val it = fn : 'a list -> int
```

La funzione *length* prende una lista di elementi il cui tipo `'a` non è specificato

- ◆ cioè accetta liste con qualsiasi contenuto
 - ◆ in effetti non ha bisogno di saperne il tipo: deve solo contare in nodi
- Anche la funzione *map* è parametrica:

```
- map;  
val it = fn : ('a -> 'b) -> 'a list -> 'b list
```



Tipi parametrici

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Tipi parametrici

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ Come definire tipi parametrici (come le liste)

```
(* generalizzazione delle nostre liste *)
```

```
- datatype 'a lista = vuota | nodo of ('a * 'a lista);  
datatype 'a lista = nodo of 'a * 'a lista | vuota
```



Tipi parametrici

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Tipi parametrici

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ Come definire tipi parametrici (come le liste)

```
(* generalizzazione delle nostre liste *)
```

```
- datatype 'a lista = vuota | nodo of ('a * 'a lista);  
datatype 'a lista = nodo of 'a * 'a lista | vuota
```

```
(* alberi binari con etichette parametriche *)
```

```
- datatype 'a bt = emptybt | btnode of ('a * 'a bt * 'a bt);  
datatype 'a bt = btnode of 'a * 'a bt * 'a bt | emptybt
```



Tipi parametrici

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Tipi parametrici

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ Come definire tipi parametrici (come le liste)

```
(* generalizzazione delle nostre liste *)
```

```
- datatype 'a lista = vuota | nodo of ('a * 'a lista);  
datatype 'a lista = nodo of 'a * 'a lista | vuota
```

```
(* alberi binari con etichette parametriche *)
```

```
- datatype 'a bt = emptybt | btnode of ('a * 'a bt * 'a bt);  
datatype 'a bt = btnode of 'a * 'a bt * 'a bt | emptybt
```

■ Per le funzioni (quando il compilatore non ha bisogno di aiuto per stabilirne il tipo) non dobbiamo fare niente di speciale

◆ ci pensa la *type inference*

```
- fun conta(vuota) = 0  
    | conta (nodo(x,l)) = conta(l) + 1;  
val conta = fn : 'a lista -> int
```



Tipi parametrici

Paradigma funzionale
ML
Dichiarazioni e scoping in ML
Tipi strutturati in ML
Patterns e matching
Liste
Currying
Funzioni di ordine superiore
Polimorfismo parametrico
Tipi parametrici
Encapsulation e interfacce
Eccezioni e integrazione con type checking
Esempio: un semplice compilatore

- Come si può vedere dagli esempi precedenti ML usa l'apice prima del nome per indicare che quella è una *variabile di tipo*
 - ◆ ad esempio 'a o 'b o 'c ...



Tipi parametrici

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Tipi parametrici

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Come si può vedere dagli esempi precedenti ML usa l'apice prima del nome per indicare che quella è una *variabile di tipo*
 - ◆ ad esempio 'a o 'b o 'c ...
- Quando si vuole che il tipo supporti l'uguaglianza, allora si mette un doppio apice
 - ◆ ad esempio "a o "b o "c ...



Tipi parametrici

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Tipi parametrici

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Come si può vedere dagli esempi precedenti ML usa l'apice prima del nome per indicare che quella è una *variabile di tipo*
 - ◆ ad esempio 'a o 'b o 'c ...
- Quando si vuole che il tipo supporti l'uguaglianza, allora si mette un doppio apice
 - ◆ ad esempio "a o "b o "c ...
- Ogni tanto la type inference se ne accorge da sola

```
- fun diag (x,y) = x=y;  
val diag = fn : "a * "a -> bool  
  
- diag (1.0, 1.0);  
Error: operator and operand don't agree [equality type required]  
operator domain: ''Z * ''Z  
operand:          real * real
```

(ricordarsi che i reali non supportano l'uguaglianza...)



Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

**Encapsulation e
interfacce**

Signatures

Structures

Incapsulamento

Functors

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Encapsulation e interfacce



Signatures = Interfacce

Paradigma funzionale
ML
Dichiarazioni e scoping in ML
Tipi strutturati in ML
Patterns e matching
Liste
Currying
Funzioni di ordine superiore
Polimorfismo parametrico
Encapsulation e interfacce
Signatures
Structures
Incapsulamento
Functors
Eccezioni e integrazione con type checking
Esempio: un semplice compilatore

- Le *signature* sono il costrutto ML per definire interfacce (nel senso di Java)
- Definiscono tipi e funzioni senza specificare come sono implementati



Signatures = Interfacce

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Signatures

Structures

Incapsulamento

Functors

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Le *signature* sono il costrutto ML per definire interfacce (nel senso di Java)
- Definiscono tipi e funzioni senza specificare come sono implementati
- Esempio: STACK

```
signature STACK =  
sig  
  type 'a stack  
  val empty: 'a stack  
  val push: ('a * 'a stack) -> 'a stack  
  val pop: 'a stack -> ('a * 'a stack)  
end;
```



Signatures = Interfacce

Paradigma funzionale
ML
Dichiarazioni e scoping in ML
Tipi strutturati in ML
Patterns e matching
Liste
Currying
Funzioni di ordine superiore
Polimorfismo parametrico
Encapsulation e interfacce
Signatures
Structures
Incapsulamento
Functors
Eccezioni e integrazione con type checking
Esempio: un semplice compilatore

- Le *signature* sono il costrutto ML per definire interfacce (nel senso di Java)
- Definiscono tipi e funzioni senza specificare come sono implementati
- Esempio: STACK

```
signature STACK =  
sig  
  type 'a stack ●  
  val empty: 'a stack  
  val push: ('a * 'a stack) -> 'a stack  
  val pop: 'a stack -> ('a * 'a stack)  
end;
```

- dichiara un tipo parametrico 'a stack senza dire com'è definito



Signatures = Interfacce

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Signatures

Structures

Incapsulamento

Functors

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Le *signature* sono il costrutto ML per definire interfacce (nel senso di Java)
- Definiscono tipi e funzioni senza specificare come sono implementati
- Esempio: STACK

```
signature STACK =  
sig  
  type 'a stack  
  val empty: 'a stack ●  
  val push: ('a * 'a stack) -> 'a stack  
  val pop: 'a stack -> ('a * 'a stack)  
end;
```

- dichiara un tipo parametrico 'a stack senza dire com'è definito
- una funzione empty per costruire uno stack vuoto



Signatures = Interfacce

- Paradigma funzionale
- ML
- Dichiarazioni e scoping in ML
- Tipi strutturati in ML
- Patterns e matching
- Liste
- Currying
- Funzioni di ordine superiore
- Polimorfismo parametrico
- Encapsulation e interfacce
- Signatures**
- Structures
- Incapsulamento
- Functors
- Eccezioni e integrazione con type checking
- Esempio: un semplice compilatore

- Le *signature* sono il costrutto ML per definire interfacce (nel senso di Java)
- Definiscono tipi e funzioni senza specificare come sono implementati
- Esempio: STACK

```
signature STACK =  
sig  
  type 'a stack  
  val empty: 'a stack  
  val push: ('a * 'a stack) -> 'a stack  
  val pop: 'a stack -> ('a * 'a stack)  
end;
```

- dichiara un tipo parametrico 'a stack senza dire com'è definito
- una funzione empty per costruire uno stack vuoto
- una funzione push per inserire un elemento nello stack



Signatures = Interfacce

Paradigma funzionale
ML
Dichiarazioni e scoping in ML
Tipi strutturati in ML
Patterns e matching
Liste
Currying
Funzioni di ordine superiore
Polimorfismo parametrico
Encapsulation e interfacce
Signatures
Structures
Incapsulamento
Functors
Eccezioni e integrazione con type checking
Esempio: un semplice compilatore

- Le *signature* sono il costrutto ML per definire interfacce (nel senso di Java)
- Definiscono tipi e funzioni senza specificare come sono implementati
- Esempio: STACK

```
signature STACK =  
sig  
  type 'a stack  
  val empty: 'a stack  
  val push: ('a * 'a stack) -> 'a stack  
  val pop: 'a stack -> ('a * 'a stack) ●  
end;
```

- dichiara un tipo parametrico 'a stack senza dire com'è definito
- una funzione empty per costruire uno stack vuoto
- una funzione push per inserire un elemento nello stack
- una funzione pop per estrarre la testa dallo stack
- ...senza dire come sono implementate (ovviamente)...



Signatures = Interfacce

Paradigma funzionale
ML
Dichiarazioni e scoping in ML
Tipi strutturati in ML
Patterns e matching
Liste
Currying
Funzioni di ordine superiore
Polimorfismo parametrico
Encapsulation e interfacce
Signatures
Structures
Incapsulamento
Functors
Eccezioni e integrazione con type checking
Esempio: un semplice compilatore

- Le *signature* sono il costrutto ML per definire interfacce (nel senso di Java)
- Definiscono tipi e funzioni senza specificare come sono implementati
- Esempio: STACK

```
signature STACK =  
sig  
  type 'a stack  
  val empty: 'a stack  
  val push: ('a * 'a stack) -> 'a stack  
  val pop: 'a stack -> ('a * 'a stack)  
end;
```

- dichiara un tipo parametrico 'a stack senza dire com'è definito
- una funzione empty per costruire uno stack vuoto
- una funzione push per inserire un elemento nello stack
- una funzione pop per estrarre la testa dallo stack
- ...senza dire come sono implementate (ovviamente)...
- *per assegnare un tipo a una espressione usare :*



Structures = Implementazioni delle signature

- Le structure, come le classi, definiscono *tipi di dato astratti*
- Esempio di implementazione di STACK mediante una lista

```
structure Stack :> STACK =  
struct  
    type 'a stack = 'a list;  
    val empty = [];  
    fun push (x,s) = x :: s;  
    fun pop (x::s) = (x,s);  
end;
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Signatures

Structures

Incapsulamento

Functors

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Structures = Implementazioni delle signature

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Signatures

Structures

Incapsulamento

Functors

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Le structure, come le classi, definiscono *tipi di dato astratti*
- Esempio di implementazione di STACK mediante una lista

```
structure Stack :> STACK =  
struct  
  type 'a stack = 'a list;  
  val empty = [];  
  fun push (x,s) = x :: s;  
  fun pop (x::s) = (x,s);  
end;
```

- Con l'espressione `Stack :> STACK` diciamo diverse cose:
 1. Stack deve implementare tutti gli identificatori dichiarati in STACK



Structures = Implementazioni delle signature

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Signatures

Structures

Incapsulamento

Functors

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Le structure, come le classi, definiscono *tipi di dato astratti*
- Esempio di implementazione di STACK mediante una lista

```
structure Stack :> STACK =  
struct  
  type 'a stack = 'a list;  
  val empty = [];  
  fun push (x,s) = x :: s;  
  fun pop (x::s) = (x,s);  
end;
```

- Con l'espressione `Stack :> STACK` diciamo diverse cose:
 1. Stack deve implementare tutti gli identificatori dichiarati in STACK
 2. I tipi di dato dichiarati in Stack possono essere utilizzati *solo* con le operazioni dichiarate in STACK
 - ◆ ogni altra funzione definita nella structure non è accessibile da fuori



Structures = Implementazioni delle signature

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Signatures

Structures

Incapsulamento

Functors

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Le structure, come le classi, definiscono *tipi di dato astratti*
- Esempio di implementazione di STACK mediante una lista

```
structure Stack :> STACK =  
struct  
  type 'a stack = 'a list;  
  val empty = [];  
  fun push (x,s) = x :: s;  
  fun pop (x::s) = (x,s);  
end;
```

- Con l'espressione `Stack :> STACK` diciamo diverse cose:
 1. Stack deve implementare tutti gli identificatori dichiarati in STACK
 2. I tipi di dato dichiarati in Stack possono essere utilizzati *solo* con le operazioni dichiarate in STACK
 - ◆ ogni altra funzione definita nella structure non è accessibile da fuori
 - ◆ così si ottiene l'*encapsulation*
 - ◆ e si definiscono *tipi di dato astratti*



Incapsulamento dell'implementazione dei tipi

- Paradigma funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Signatures

Structures

Incapsulamento

Functors

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Anche se in Stack il tipo stack è implementato con list...

```
type 'a stack = 'a list;
```

- ... non si può usare come list ...



Incapsulamento dell'implementazione dei tipi

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Signatures

Structures

Incapsulamento

Functors

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Anche se in Stack il tipo stack è implementato con list...

```
type 'a stack = 'a list;
```

- ... non si può usare come list ...

```
- length [];  
val it = 0 : int  
  
- length Stack.empty;  
stdIn:39.1-39.19 Error: operator and operand don't agree  
operator domain: 'Z list  
operand:           'Y Stack.stack
```

- ... perchè la structure Stack non mette a disposizione alcuna funzione length sul tipo stack e ne nasconde l'implementazione



Functors = structure parametriche

- Alcune delle componenti di una structure possono essere variabili ed essere specificate come dei parametri
- Si usa una keyword diversa: `functor`. Analogo dei template

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Signatures

Structures

Incapsulamento

Functors

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Functors = structure parametriche

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Signatures

Structures

Incapsulamento

Functors

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Alcune delle componenti di una structure possono essere variabili ed essere specificate come dei parametri
- Si usa una keyword diversa: `functor`. Analogo dei template
- Ecco un esempio di definizione di immagini parametrica rispetto alla codifica del colore
 - ◆ supponiamo di avere due structure RGB e CMYK per gli omonimi modelli di colore
 - ◆ e che entrambe implementino la signature `COLOR`
 - ◆ la struttura parametrica si può dichiarare così:



Functors = structure parametriche

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Signatures

Structures

Incapsulamento

Functors

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Alcune delle componenti di una structure possono essere variabili ed essere specificate come dei parametri
- Si usa una keyword diversa: functor. Analogo dei template
- Ecco un esempio di definizione di immagini parametrica rispetto alla codifica del colore
 - ◆ supponiamo di avere due structure RGB e CMYK per gli omonimi modelli di colore
 - ◆ e che entrambe implementino la signature COLOR
 - ◆ la struttura parametrica si può dichiarare così:

```
functor Image( X : COLOR ) =  
  struct  
    (* qui si può usare X come un tipo *)  
    (* con le operazioni definite da COLOR *)  
  end  
  
  (* col functor si possono generare diversi tipi di dato *)  
  structure Image_RGB = Image( RGB );  
  structure Image_CMYK = Image( CMYK );
```



Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

**Eccezioni e
integrazione con
type checking**

Esempio: un
semplice compilatore

Eccezioni e integrazione con type checking



Eccezioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Come Java, anche ML ha le sue eccezioni predefinite...

```
- 3 div 0;  
uncaught exception Div [divide by zero]
```



Eccezioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Come Java, anche ML ha le sue eccezioni predefinite...

```
- 3 div 0;  
uncaught exception Div [divide by zero]
```

- In ML la gestione delle eccezioni è integrata col type checking

```
- fun pop(x::s) = (x,s);  
Warning: match nonexhaustive  
x :: s => ...
```



Eccezioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Come Java, anche ML ha le sue eccezioni predefinite...

```
- 3 div 0;  
uncaught exception Div [divide by zero]
```

- In ML la gestione delle eccezioni è integrata col type checking

```
- fun pop(x::s) = (x,s);  
Warning: match nonexhaustive  
      x :: s => ...  
  
- pop [];  
uncaught exception Match [nonexhaustive match failure]
```

Ecco come funziona:



Eccezioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Come Java, anche ML ha le sue eccezioni predefinite...

```
- 3 div 0;  
uncaught exception Div [divide by zero]
```

- In ML la gestione delle eccezioni è integrata col type checking

```
- fun pop(x::s) = (x,s);  
Warning: match nonexhaustive  
      x :: s => ...  
  
- pop [];  
uncaught exception Match [nonexhaustive match failure]
```

Ecco come funziona:

1. la type inference capisce che l'input di pop è una lista



Eccezioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Come Java, anche ML ha le sue eccezioni predefinite...

```
- 3 div 0;  
uncaught exception Div [divide by zero]
```

- In ML la gestione delle eccezioni è integrata col type checking

```
- fun pop(x::s) = (x,s);  
Warning: match nonexhaustive  
      x :: s => ...  
  
- pop [];  
uncaught exception Match [nonexhaustive match failure]
```

Ecco come funziona:

1. la type inference capisce che l'input di pop è una lista
2. il datatype lista ha due costruttori: `::` e `[]`



Eccezioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Come Java, anche ML ha le sue eccezioni predefinite...

```
- 3 div 0;  
uncaught exception Div [divide by zero]
```

- In ML la gestione delle eccezioni è integrata col type checking

```
- fun pop(x::s) = (x,s);  
Warning: match nonexhaustive  
      x :: s => ...  
  
- pop [];  
uncaught exception Match [nonexhaustive match failure]
```

Ecco come funziona:

1. la type inference capisce che l'input di pop è una lista
2. il datatype lista ha due costruttori: `::` e `[]`
3. la definizione per casi di pop ha un caso solo per `::`
4. da cui il warning



Eccezioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Come Java, anche ML ha le sue eccezioni predefinite...

```
- 3 div 0;  
uncaught exception Div [divide by zero]
```

- In ML la gestione delle eccezioni è integrata col type checking

```
- fun pop(x::s) = (x,s);  
Warning: match nonexhaustive  
      x :: s => ...  
  
- pop [];  
uncaught exception Match [nonexhaustive match failure]
```

Ecco come funziona:

1. la type inference capisce che l'input di pop è una lista
2. il datatype lista ha due costruttori: `::` e `[]`
3. la definizione per casi di pop ha un caso solo per `::`
4. da cui il warning
5. il compilatore inserisce automaticamente una eccezione `Match` nei casi mancanti



Dichiarazione e generazione eccezioni

- Il programmatore può definire le proprie eccezioni:

```
exception EmptyStack;          (* dichiara una nuova eccezione *)  
  
fun pop(x::s) = (x,s)  
  | pop [] = raise EmptyStack;  (* come il throw di Java *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Dichiarazione e generazione eccezioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Il programmatore può definire le proprie eccezioni:

```
exception EmptyStack;          (* dichiara una nuova eccezione *)  
  
fun pop(x::s) = (x,s)  
  | pop [] = raise EmptyStack;  (* come il throw di Java *)
```

Il risultato in caso di errore è più esplicativo dell'eccezione
“automatica” Match

```
- pop [];  
uncaught exception EmptyStack
```



Dichiarazione e generazione eccezioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Il programmatore può definire le proprie eccezioni:

```
exception EmptyStack;      (* dichiara una nuova eccezione *)

fun pop(x::s) = (x,s)
  | pop [] = raise EmptyStack; (* come il throw di Java *)
```

Il risultato in caso di errore è più esplicativo dell'eccezione
“automatica” Match

```
- pop [];  
uncaught exception EmptyStack
```

- Le eccezioni possono essere catturate e gestite con handle:

```
pop x  
handle EmptyStack =>  
  ( print "messaggio di errore specializzato";  
    raise EmptyStack );
```



Il costrutto `handle`

- può essere messo dopo qualunque espressione che può generare una eccezione

```
(3 div x) handle ...
```

[Paradigma
funzionale](#)

[ML](#)

[Dichiarazioni e
scoping in ML](#)

[Tipi strutturati in
ML](#)

[Patterns e matching](#)

[Liste](#)

[Currying](#)

[Funzioni di ordine
superiore](#)

[Polimorfismo
parametrico](#)

[Encapsulation e
interfacce](#)

[Eccezioni e
integrazione con
type checking](#)

[Esempio: un
semplice compilatore](#)



Il costrutto `handle`

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- può essere messo dopo qualunque espressione che può generare una eccezione

```
(3 div x) handle ...
```

- un singolo `handle` può gestire diverse eccezioni

```
<expression> handle  
    <exception 1> => ...  
    | <exception 2> => ...  
    | ...
```



Il costrutto `handle`

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- può essere messo dopo qualunque espressione che può generare una eccezione

```
(3 div x) handle ...
```

- un singolo `handle` può gestire diverse eccezioni

```
<expression> handle  
    <exception 1> => ...  
    | <exception 2> => ...  
    | ...
```

Ogni ordine è buono: perchè?



Il costrutto `handle`

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- può essere messo dopo qualunque espressione che può generare una eccezione

```
(3 div x) handle ...
```

- un singolo `handle` può gestire diverse eccezioni

```
<expression> handle  
    <exception 1> => ...  
    | <exception 2> => ...  
    | ...
```

Ogni ordine è buono: perchè?

- Due modi di usarlo in ML funzionale puro:

1. fare qualcosa come stampare un messaggio e *rilanciare l'eccezione*



Il costrutto `handle`

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- può essere messo dopo qualunque espressione che può generare una eccezione

```
(3 div x) handle ...
```

- un singolo `handle` può gestire diverse eccezioni

```
<expression> handle  
    <exception 1> => ...  
    | <exception 2> => ...  
    | ...
```

Ogni ordine è buono: perchè?

- Due modi di usarlo in ML funzionale puro:

1. fare qualcosa come stampare un messaggio e *rilanciare l'eccezione*
2. “aggiustare” l'errore restituendo un valore *dello stesso tipo* dell'espressione che ha sollevato l'eccezione

Sono le uniche opzioni che passano il type checking senza errori



Il costruito handle

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ Altro esempio (da non seguire acriticamente ...)

```
- fun pos x (y::z) =  
    if (x=y) then 1 else 1 + pos x z;
```

Questa funzione restituisce la posizione di x nella lista, ma se non trova x solleva una eccezione (manca un caso terminale per [])



Il costrutto `handle`

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Altro esempio (da non seguire acriticamente ...)

```
- fun pos x (y::z) =  
    if (x=y) then 1 else 1 + pos x z;
```

Questa funzione restituisce la posizione di `x` nella lista, ma se non trova `x` solleva una eccezione (manca un caso terminale per `[]`)

- Si può usare `handle` per modificare `pos` per restituire `-1` quando non trova `x` nella lista:

```
- fun pos2 x y = (pos x y) handle Match => ~1;
```



Il costrutto handle

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Altro esempio (da non seguire acriticamente ...)

```
- fun pos x (y::z) =  
    if (x=y) then 1 else 1 + pos x z;
```

Questa funzione restituisce la posizione di x nella lista, ma se non trova x solleva una eccezione (manca un caso terminale per [])

- Si può usare handle per modificare pos per restituire -1 quando non trova x nella lista:

```
- fun pos2 x y = (pos x y) handle Match => ~1;
```

- Esempio didattico un po' artificiale: si potrebbe obiettare che pos è realizzata male...



Eccezioni con parametri

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Si possono aggiungere dettagli sull'errore che si è verificato aggiungendo parametri alle eccezioni
- Esempio di eccezione con parametri:

```
exception SyntaxError of string
```



Eccezioni con parametri

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Si possono aggiungere dettagli sull'errore che si è verificato aggiungendo parametri alle eccezioni
- Esempio di eccezione con parametri:

```
exception SyntaxError of string
```

- Questa eccezione può essere lanciata in diversi modi...

```
raise SyntaxError "Identifier_ expected"
```

```
raise SyntaxError "Integer_ expected"
```



Eccezioni con parametri

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Si possono aggiungere dettagli sull'errore che si è verificato aggiungendo parametri alle eccezioni
- Esempio di eccezione con parametri:

```
exception SyntaxError of string
```

- Questa eccezione può essere lanciata in diversi modi...

```
raise SyntaxError "Identifier_ expected"
```

```
raise SyntaxError "Integer_ expected"
```

- ... e il parametro “letto” col pattern matching

```
... handle SyntaxError x => ... (* qui si può usare x *)
```




Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Esempio: compilazione di espressioni



Elaborazione di simboli in ML

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML – come gli altri linguaggi dichiarativi (= non imperativi) – è particolarmente adatto alla *manipolazione di simboli*
- La *realizzazione di compilatori* è un esempio di questo tipo di problema
 - ◆ bisogna elaborare espressioni e comandi di un linguaggio di programmazione (codice sorgente) e tradurli in un altro linguaggio (codice oggetto o intermedio)



Elaborazione di simboli in ML

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML – come gli altri linguaggi dichiarativi (= non imperativi) – è particolarmente adatto alla *manipolazione di simboli*
- La *realizzazione di compilatori* è un esempio di questo tipo di problema
 - ◆ bisogna elaborare espressioni e comandi di un linguaggio di programmazione (codice sorgente) e tradurli in un altro linguaggio (codice oggetto o intermedio)
- Ne approfittiamo per dare un'idea parziale di alcune strutture dati interne al compilatore e dei procedimenti di generazione e ottimizzazione del codice



Elaborazione di simboli in ML

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- ML – come gli altri linguaggi dichiarativi (= non imperativi) – è particolarmente adatto alla *manipolazione di simboli*
- La *realizzazione di compilatori* è un esempio di questo tipo di problema
 - ◆ bisogna elaborare espressioni e comandi di un linguaggio di programmazione (codice sorgente) e tradurli in un altro linguaggio (codice oggetto o intermedio)
- Ne approfittiamo per dare un'idea parziale di alcune strutture dati interne al compilatore e dei procedimenti di generazione e ottimizzazione del codice
- L'esempio che segue realizza un compilatore per un linguaggio molto semplificato che supporta solo semplici espressioni su numeri interi. Il codice oggetto deve calcolare l'espressione data.



Procedimento di valutazione delle espressioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

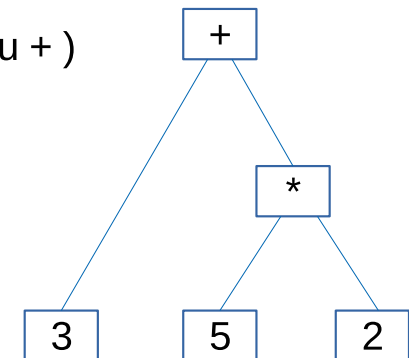
Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Espressione: $3 + 5 * 2$ 

parser

Albero sintattico
(* ha precedenza su +)





Procedimento di valutazione delle espressioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

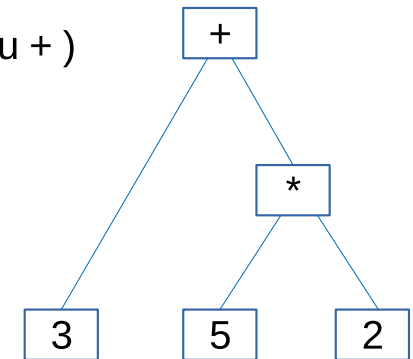
Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Espressione: $3 + 5 * 2$ 

parser

Albero sintattico
(* ha precedenza su +)



Procedimento di calcolo:

- salvare i risultati intermedi (come $5*2$) su un piccolo stack
- prima di applicare un operatore bisogna aver calcolato i suoi figli
- visitando l'albero in ordine *posticipato* si ottiene l'ordine giusto di valutazione
 - se sono su una foglia la metto sullo stack
 - se sono su un nodo operazione, i primi due elementi dello stack sono i suoi operandi

Esempio:

- ordine posticipato di visita: $3\ 5\ 2\ *\ +$



Procedimento di valutazione delle espressioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

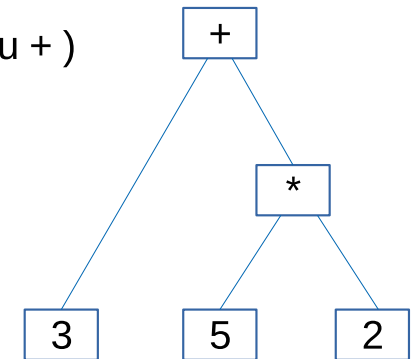
Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Espressione: $3 + 5 * 2$ 

parser

Albero sintattico
(* ha precedenza su +)



Procedimento di calcolo:

- salvare i risultati intermedi (come $5*2$) su un piccolo stack
- prima di applicare un operatore bisogna aver calcolato i suoi figli
- visitando l'albero in ordine *posticipato* si ottiene l'ordine giusto di valutazione
 - se sono su una foglia la metto sullo stack
 - se sono su un nodo operazione, i primi due elementi dello stack sono i suoi operandi

Esempio:

- ordine posticipato di visita: $3\ 5\ 2\ *\ +$



Stack

3



Procedimento di valutazione delle espressioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

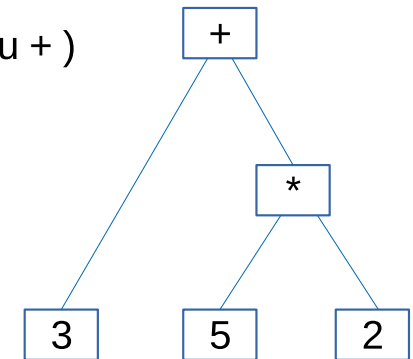
Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Espressione: $3 + 5 * 2$  parser

Albero sintattico
(* ha precedenza su +)



Procedimento di calcolo:

- salvare i risultati intermedi (come $5*2$) su un piccolo stack
- prima di applicare un operatore bisogna aver calcolato i suoi figli
- visitando l'albero in ordine *posticipato* si ottiene l'ordine giusto di valutazione
 - se sono su una foglia la metto sullo stack
 - se sono su un nodo operazione, i primi due elementi dello stack sono i suoi operandi

Esempio:

- ordine posticipato di visita: $3\ 5\ 2\ *\ +$



Stack





Procedimento di valutazione delle espressioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

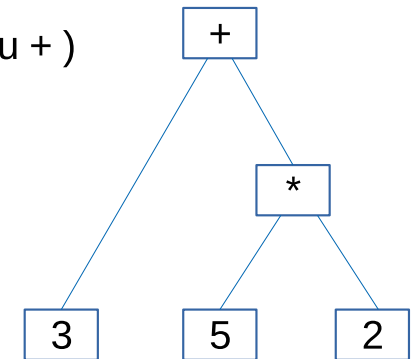
Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Espressione: $3 + 5 * 2$  parser

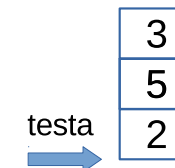
Albero sintattico
(* ha precedenza su +)



Procedimento di calcolo:

- salvare i risultati intermedi (come $5*2$) su un piccolo stack
- prima di applicare un operatore bisogna aver calcolato i suoi figli
- visitando l'albero in ordine *posticipato* si ottiene l'ordine giusto di valutazione
 - se sono su una foglia la metto sullo stack
 - se sono su un nodo operazione, i primi due elementi dello stack sono i suoi operandi

Stack



Esempio:

- ordine posticipato di visita: $3\ 5\ 2\ *\ +$



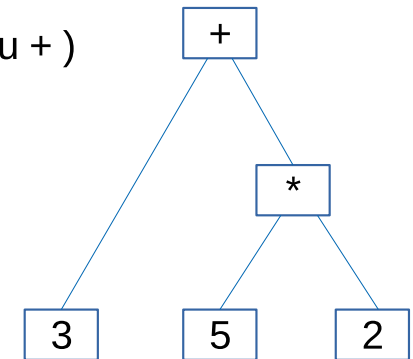


Procedimento di valutazione delle espressioni

- Paradigma funzionale
- ML
- Dichiarazioni e scoping in ML
- Tipi strutturati in ML
- Patterns e matching
- Liste
- Currying
- Funzioni di ordine superiore
- Polimorfismo parametrico
- Encapsulation e interfacce
- Eccezioni e integrazione con type checking
- Esempio: un semplice compilatore

Espressione: $3 + 5 * 2$  parser


Albero sintattico
(* ha precedenza su +)



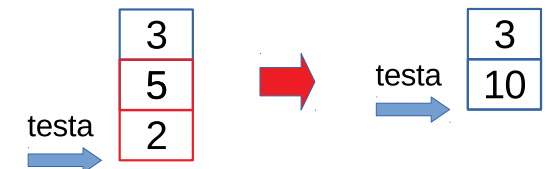
Procedimento di calcolo:

- salvare i risultati intermedi (come $5*2$) su un piccolo stack
- prima di applicare un operatore bisogna aver calcolato i suoi figli
- visitando l'albero in ordine *posticipato* si ottiene l'ordine giusto di valutazione
 - se sono su una foglia la metto sullo stack
 - se sono su un nodo operazione, i primi due elementi dello stack sono i suoi operandi

Esempio:

- ordine posticipato di visita: $3\ 5\ 2\ *\ +$


Stack





Procedimento di valutazione delle espressioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

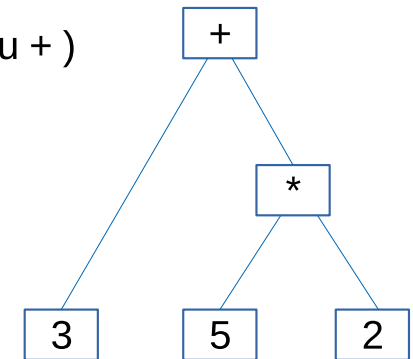
Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Espressione: $3 + 5 * 2$  parser

Albero sintattico
(* ha precedenza su +)



Procedimento di calcolo:

- salvare i risultati intermedi (come $5*2$) su un piccolo stack
- prima di applicare un operatore bisogna aver calcolato i suoi figli
- visitando l'albero in ordine *posticipato* si ottiene l'ordine giusto di valutazione
 - se sono su una foglia la metto sullo stack
 - se sono su un nodo operazione, i primi due elementi dello stack sono i suoi operandi

Esempio:

- ordine posticipato di visita: $3\ 5\ 2\ *\ +$



Stack





Procedimento di valutazione delle espressioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

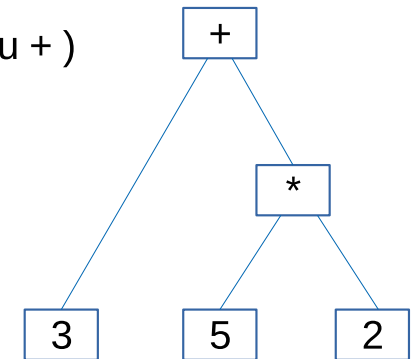
Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

Espressione: $3 + 5 * 2$  parser


Albero sintattico
(* ha precedenza su +)



Procedimento di calcolo:

- salvare i risultati intermedi (come $5*2$) su un piccolo stack
- prima di applicare un operatore bisogna aver calcolato i suoi figli
- visitando l'albero in ordine *posticipato* si ottiene l'ordine giusto di valutazione
 - se sono su una foglia la metto sullo stack
 - se sono su un nodo operazione, i primi due elementi dello stack sono i suoi operandi

Esempio:

- ordine posticipato di visita: $3\ 5\ 2\ *\ +$


Stack



Il compilatore, a partire dall'albero sintattico, deve generare un codice che implementa questo procedimento



Definizione degli alberi sintattici

- Introduciamo un costruttore per ogni operazione supportata dal linguaggio sorgente
- ogni costruttore corrisponde a un tipo di nodo dell'albero sintattico

```
datatype syntree = co of int (* le costanti *)  
                  | plus of syntree * syntree  
                  | minus of syntree * syntree  
                  | times of syntree * syntree  
                  | divide of syntree * syntree  
                  | modulus of syntree * syntree
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Definizione del linguaggio target

- Ovvero le operazioni della macchina astratta che eseguirà il codice oggetto sorgente
- qui ci ispiriamo alle istruzioni di hardware classico

```
datatype instruction
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Definizione del linguaggio target

- Ovvero le operazioni della macchina astratta che eseguirà il codice oggetto sorgente
- qui ci ispiriamo alle istruzioni di hardware classico

```
datatype instruction  
  = LOADC of int * int    (* LOADC i c => Ri := c      *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Definizione del linguaggio target

- Ovvero le operazioni della macchina astratta che eseguirà il codice oggetto sorgente
- qui ci ispiriamo alle istruzioni di hardware classico

```
datatype instruction
  = LOADC   of int * int    (* LOADC i c => Ri := c          *)
  | LOADI   of int * int    (* LOADI i j  => Ri := mem(Rj)      *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Definizione del linguaggio target

- Ovvero le operazioni della macchina astratta che eseguirà il codice oggetto sorgente
- qui ci ispiriamo alle istruzioni di hardware classico

```
datatype instruction
  = LOADC   of int * int    (* LOADC i c => Ri := c          *)
  | LOADI   of int * int    (* LOADI i j  => Ri := mem(Rj)       *)
  | STOREI  of int * int    (* STOREI i j => mem(Rj) := Ri      *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Definizione del linguaggio target

- Ovvero le operazioni della macchina astratta che eseguirà il codice oggetto sorgente
- qui ci ispiriamo alle istruzioni di hardware classico

```
datatype instruction
  = LOADC   of int * int    (* LOADC i c => Ri := c *)
  | LOADI   of int * int    (* LOADI i j => Ri := mem(Rj) *)
  | STOREI  of int * int    (* STOREI i j => mem(Rj) := Ri *)
  | INCR    of int          (* INCR i => Ri := Ri + 1 *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Definizione del linguaggio target

- Ovvero le operazioni della macchina astratta che eseguirà il codice oggetto sorgente
- qui ci ispiriamo alle istruzioni di hardware classico

```
datatype instruction
  = LOADC   of int * int    (* LOADC i c => Ri := c *)
  | LOADI   of int * int    (* LOADI i j => Ri := mem(Rj) *)
  | STOREI  of int * int    (* STOREI i j => mem(Rj) := Ri *)
  | INCR    of int          (* INCR i      => Ri := Ri + 1 *)
  | DECR    of int          (* DECR i      => Ri := Ri - 1 *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Definizione del linguaggio target

- Ovvero le operazioni della macchina astratta che eseguirà il codice oggetto sorgente
- qui ci ispiriamo alle istruzioni di hardware classico

```
datatype instruction
  = LOADC of int * int      (* LOADC i c => Ri := c *)
  | LOADI of int * int      (* LOADI i j => Ri := mem(Rj) *)
  | STOREI of int * int     (* STOREI i j => mem(Rj) := Ri *)
  | INCR of int             (* INCR i => Ri := Ri + 1 *)
  | DECR of int             (* DECR i => Ri := Ri - 1 *)
  | SUM of int * int        (* SUM i j => Ri := Ri + Rj *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Definizione del linguaggio target

- Ovvero le operazioni della macchina astratta che eseguirà il codice oggetto sorgente
- qui ci ispiriamo alle istruzioni di hardware classico

```
datatype instruction
  = LOADC of int * int      (* LOADC i c => Ri := c *)
  | LOADI of int * int      (* LOADI i j => Ri := mem(Rj) *)
  | STOREI of int * int      (* STOREI i j => mem(Rj) := Ri *)
  | INCR of int              (* INCR i => Ri := Ri + 1 *)
  | DECR of int              (* DECR i => Ri := Ri - 1 *)
  | SUM of int * int         (* SUM i j => Ri := Ri + Rj *)
  | SUB of int * int         (* SUB i j => Ri := Ri - Rj *)
  | MUL of int * int         (* MUL i j => Ri := Ri * Rj *)
  | DIV of int * int         (* DIV i j => Ri := Ri / Rj *)
  | MOD of int * int         (* MOD i j => Ri := Ri mod Rj *)
```

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Definizione del linguaggio target

- Ovvero le operazioni della macchina astratta che eseguirà il codice oggetto sorgente
- qui ci ispiriamo alle istruzioni di hardware classico

```
datatype instruction
= LOADC of int * int      (* LOADC i c => Ri := c *)
| LOADI of int * int      (* LOADI i j => Ri := mem(Rj) *)
| STOREI of int * int     (* STOREI i j => mem(Rj) := Ri *)
| INCR of int             (* INCR i => Ri := Ri + 1 *)
| DECR of int             (* DECR i => Ri := Ri - 1 *)
| SUM of int * int        (* SUM i j => Ri := Ri + Rj *)
| SUB of int * int        (* SUB i j => Ri := Ri - Rj *)
| MUL of int * int        (* MUL i j => Ri := Ri * Rj *)
| DIV of int * int        (* DIV i j => Ri := Ri / Rj *)
| MOD of int * int        (* MOD i j => Ri := Ri mod Rj *)
| HALT
```

Obiettivo: terminare il programma con il risultato in cima allo stack.



Generazione del codice – funzione codegen

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Il codice oggetto utilizza tre registri:
 - ◆ R1 come puntatore alla testa dello stack
 - ◆ R2,R3 per calcolare le singole operazioni



Generazione del codice – funzione codegen

Paradigma funzionale
ML
Dichiarazioni e scoping in ML
Tipi strutturati in ML
Patterns e matching
Liste
Currying
Funzioni di ordine superiore
Polimorfismo parametrico
Encapsulation e interfacce
Eccezioni e integrazione con type checking
Esempio: un semplice compilatore

- Il codice oggetto utilizza tre registri:
 - ◆ R1 come puntatore alla testa dello stack
 - ◆ R2,R3 per calcolare le singole operazioni
- La traduzione vera e propria è effettuata da una funzione ausiliaria `translate` che prende in input:
 - ◆ un albero sintattico `tree`
 - ◆ una *continuazione*, ovvero il codice da eseguire *dopo* avere eseguito le operazioni contenute in `tree`



Generazione del codice – funzione codegen

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- Il codice oggetto utilizza tre registri:
 - ◆ R1 come puntatore alla testa dello stack
 - ◆ R2,R3 per calcolare le singole operazioni
- La traduzione vera e propria è effettuata da una funzione ausiliaria `translate` che prende in input:
 - ◆ un albero sintattico `tree`
 - ◆ una *continuazione*, ovvero il codice da eseguire *dopo* avere eseguito le operazioni contenute in `tree`
- Pertanto la prima chiamata a `translate` gli passerà
 - ◆ l'albero sintattico dell'intera espressione da compilare
 - ◆ la lista di istruzioni `[HALT]`



Generazione del codice

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

```
fun codegen tree =
```



Generazione del codice

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

```
fun codegen tree =  
let  
  (* definizione della funzione translate *)  
  (* R1:  stack pointer; R2:  accumulator *)
```



Generazione del codice

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

```
fun codegen tree =  
let  
  (* definizione della funzione translate *)  
  (* R1:  stack pointer; R2:  accumulator *)  
  fun translate (co x) cont =  
    LOADC(2,x) :: INCR(1) :: STOREI(2,1) :: cont
```



Generazione del codice

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

```
fun codegen tree =  
let  
  (* definizione della funzione translate *)  
  (* R1:  stack pointer; R2:  accumulator *)  
  fun translate (co x) cont =  
      LOADC(2,x) :: INCR(1) :: STOREI(2,1) :: cont  
  | translate (plus(t1,t2)) cont =  
      translate t1 (  
        translate t2 (  
          LOADI(2,1) :: DECR(1) :: LOADI(3,1) :: SUM(2,3) :: STOREI(2,1) ::  
            cont))
```



Generazione del codice

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

```
fun codegen tree =  
let  
  (* definizione della funzione translate *)  
  (* R1: stack pointer; R2: accumulator *)  
  fun translate (co x) cont =  
    LOADC(2,x) :: INCR(1) :: STOREI(2,1) :: cont  
  | translate (plus(t1,t2)) cont =  
    translate t1 (  
      translate t2 (  
        LOADI(2,1) :: DECR(1) :: LOADI(3,1) :: SUM(2,3) :: STOREI(2,1) ::  
        cont))  
  | translate (times(t1,t2)) cont = simile ma con MUL al posto di SUM  
  | translate (minus(t1,t2)) cont = simile ma  
    con SUB(3,2) al posto di SUM(2,3)  
  | translate (divide(t1,t2)) cont = simile ma con DIV al posto di SUB  
  | translate (modulus(t1,t2)) cont = simile ma con MOD al posto di SUB
```



Generazione del codice

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

```
fun codegen tree =  
let  
  (* definizione della funzione translate *)  
  (* R1: stack pointer; R2: accumulator *)  
  fun translate (co x) cont =  
    LOADC(2,x) :: INCR(1) :: STOREI(2,1) :: cont  
  | translate (plus(t1,t2)) cont =  
    translate t1 (  
      translate t2 (  
        LOADI(2,1) :: DECR(1) :: LOADI(3,1) :: SUM(2,3) :: STOREI(2,1) ::  
        cont))  
  | translate (times(t1,t2)) cont = simile ma con MUL al posto di SUM  
  | translate (minus(t1,t2)) cont = simile ma  
    con SUB(3,2) al posto di SUM(2,3)  
  | translate (divide(t1,t2)) cont = simile ma con DIV al posto di SUB  
  | translate (modulus(t1,t2)) cont = simile ma con MOD al posto di SUB  
in  
  translate tree [HALT]  
end
```



Ottimizzazione del codice

- La generazione meccanica introduce operazioni inutili.

```
LOADC 2 3      (* codice generato per 3+5*2 *)
INCR 1
STOREI 2 1
—
LOADC 2 5
INCR 1
STOREI 2 1
—
LOADC 2 2
INCR 1
STOREI 2 1
—
LOADI 2 1
DECR 1
LOADI 3 1
MUL 2 3
STOREI 2 1
—
LOADI 2 1
DECR 1
LOADI 3 1
SUM 2 3
STOREI 2 1
—
HALT
```




Ottimizzazione del codice – funzione `optimize`

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

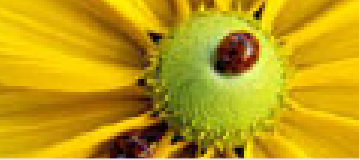
Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La funzione `optimize` elimina le più comuni operazioni ridondanti
- Itera una funzione ausiliaria `opt1` che esegue un singolo passo di ottimizzazione
- Questo può attivare ulteriori semplificazioni, quindi `optimize` itera `opt1` finchè il codice non può essere ulteriormente ridotto



Ottimizzazione del codice – funzione optimize

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

```
local
  (* definizione singolo passo di ottimizzazione *)
```



Ottimizzazione del codice – funzione optimize

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

```
local
  (* definizione singolo passo di ottimizzazione *)
  fun opt1 [] = []
```



Ottimizzazione del codice – funzione optimize

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

```
local
  (* definizione singolo passo di ottimizzazione *)
  fun opt1 [] = []
  | opt1 (INCR(x)::DECR(y)::cont) =
    let val cont' = opt1 cont in
    if x=y
      then cont'
      else INCR(x)::DECR(y)::cont'
    end
end
```



Ottimizzazione del codice – funzione optimize

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

```
local
  (* definizione singolo passo di ottimizzazione *)
  fun opt1 [] = []
  | opt1 (INCR(x)::DECR(y)::cont) =
    let val cont' = opt1 cont in
    if x=y
      then cont'
      else INCR(x)::DECR(y)::cont'
    end
  | opt1 (STOREI(x,y)::LOADI(x1,y1)::cont) =
    let val cont' = opt1 cont in
    if x=x1 andalso y=y1
      then STOREI(x,y)::cont'
      else STOREI(x,y)::LOADI(x1,y1)::cont'
    end
end
```



Ottimizzazione del codice – funzione optimize

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

```
local
  (* definizione singolo passo di ottimizzazione *)
  fun opt1 [] = []
  | opt1 (INCR(x)::DECR(y)::cont) =
    let val cont' = opt1 cont in
    if x=y
      then cont'
      else INCR(x)::DECR(y)::cont'
    end
  | opt1 (STOREI(x,y)::LOADI(x1,y1)::cont) =
    let val cont' = opt1 cont in
    if x=x1 andalso y=y1
      then STOREI(x,y)::cont'
      else STOREI(x,y)::LOADI(x1,y1)::cont'
    end
  | (* altri casi qui... *)
  | opt1 (c :: cont) = c :: (opt1 cont)
```



Ottimizzazione del codice – funzione optimize

Paradigma funzionale
ML
Dichiarazioni e scoping in ML
Tipi strutturati in ML
Patterns e matching
Liste
Currying
Funzioni di ordine superiore
Polimorfismo parametrico
Encapsulation e interfacce
Eccezioni e integrazione con type checking
Esempio: un semplice compilatore

```
local
  (* definizione singolo passo di ottimizzazione *)
  fun opt1 [] = []
  | opt1 (INCR(x)::DECR(y)::cont) =
    let val cont' = opt1 cont in
    if x=y
      then cont'
      else INCR(x)::DECR(y)::cont'
    end
  | opt1 (STOREI(x,y)::LOADI(x1,y1)::cont) =
    let val cont' = opt1 cont in
    if x=x1 andalso y=y1
      then STOREI(x,y)::cont'
      else STOREI(x,y)::LOADI(x1,y1)::cont'
    end
  | (* altri casi qui... *)
  | opt1 (c :: cont) = c :: (opt1 cont)
in
  fun optimize code =
    let val code' = opt1 code in      (* fa 1 passo di ottimizz.*)
    if length(code') = length(code) (* se nessun progresso *)
      then code'                      (* termina *)
      else optimize code'             (* altrimenti riprova *)
    end
end
```



Efficacia dell'ottimizzazione

- Ecco il risultato per la solita espressione $3+5*2$. A sinistra il codice non ottimizzato, a destra quello ottimizzato

```
LOADC 2 3
INCR 1
STOREI 2 1
LOADC 2 5
INCR 1
STOREI 2 1
LOADC 2 2
INCR 1
STOREI 2 1
LOADI 2 1
DECR 1
LOADI 3 1
MUL 2 3
STOREI 2 1
LOADI 2 1
DECR 1
LOADI 3 1
SUM 2 3
STOREI 2 1
HALT
```

```
LOADC 2 3
INCR 1
STOREI 2 1
LOADC 2 5
INCR 1
STOREI 2 1
LOADC 2 2
LOADI 3 1
MUL 2 3
DECR 1
LOADI 3 1
SUM 2 3
STOREI 2 1
HALT
```

Guadagno: 30% di istruzioni in meno



Combinare le fasi con composizione di funzioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

■ L'operatore \circ denota la composizione di funzioni

◆ $(f \circ g)(x) = f(g(x))$



Combinare le fasi con composizione di funzioni

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- L'operatore `o` denota la composizione di funzioni
 - ◆ $(f \circ g)(x) = f(g(x))$
- Con la composizione è facile definire l'intero processo di compilazione assemblando le diverse fasi

```
- val compile = optimize o codegen o parse;  
  
val it = fn : string -> instruction list
```



Conclusioni sull'esempio di compilazione

- La combinazione di costruttori, pattern e definizione per casi rende le trasformazioni del codice sorgente e del codice oggetto particolarmente chiare

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore



Conclusioni sull'esempio di compilazione

Paradigma
funzionale

ML

Dichiarazioni e
scoping in ML

Tipi strutturati in
ML

Patterns e matching

Liste

Currying

Funzioni di ordine
superiore

Polimorfismo
parametrico

Encapsulation e
interfacce

Eccezioni e
integrazione con
type checking

Esempio: un
semplice compilatore

- La combinazione di costruttori, pattern e definizione per casi rende le trasformazioni del codice sorgente e del codice oggetto particolarmente chiare
- ◆ in Java, che pure è un ottimo linguaggio, ogni nodo dell'albero sintattico sarebbe un oggetto e “leggere” la struttura di pezzi di albero non sarebbe immediato



Conclusioni sull'esempio di compilazione

Paradigma funzionale
ML
Dichiarazioni e scoping in ML
Tipi strutturati in ML
Patterns e matching
Liste
Currying
Funzioni di ordine superiore
Polimorfismo parametrico
Encapsulation e interfacce
Eccezioni e integrazione con type checking
Esempio: un semplice compilatore

- La combinazione di costruttori, pattern e definizione per casi rende le trasformazioni del codice sorgente e del codice oggetto particolarmente chiare
 - ◆ in Java, che pure è un ottimo linguaggio, ogni nodo dell'albero sintattico sarebbe un oggetto e “leggere” la struttura di pezzi di albero non sarebbe immediato
- Inoltre la type inference ci permette di omettere il tipo degli identificatori, producendo un codice più snello
 - ◆ come fosse uno scripting language debolmente tipato
 - ◆ ma senza sacrificare il controllo di tipi forte



Conclusioni sull'esempio di compilazione

Paradigma funzionale
ML
Dichiarazioni e scoping in ML
Tipi strutturati in ML
Patterns e matching
Liste
Currying
Funzioni di ordine superiore
Polimorfismo parametrico
Encapsulation e interfacce
Eccezioni e integrazione con type checking
Esempio: un semplice compilatore

- La combinazione di costruttori, pattern e definizione per casi rende le trasformazioni del codice sorgente e del codice oggetto particolarmente chiare
 - ◆ in Java, che pure è un ottimo linguaggio, ogni nodo dell'albero sintattico sarebbe un oggetto e “leggere” la struttura di pezzi di albero non sarebbe immediato
- Inoltre la type inference ci permette di omettere il tipo degli identificatori, producendo un codice più snello
 - ◆ come fosse uno scripting language debolmente tipato
 - ◆ ma senza sacrificare il controllo di tipi forte
- Per queste ragioni linguaggi come ML vengono utilizzati per la prototipizzazione rapida di compilatori e interpreti