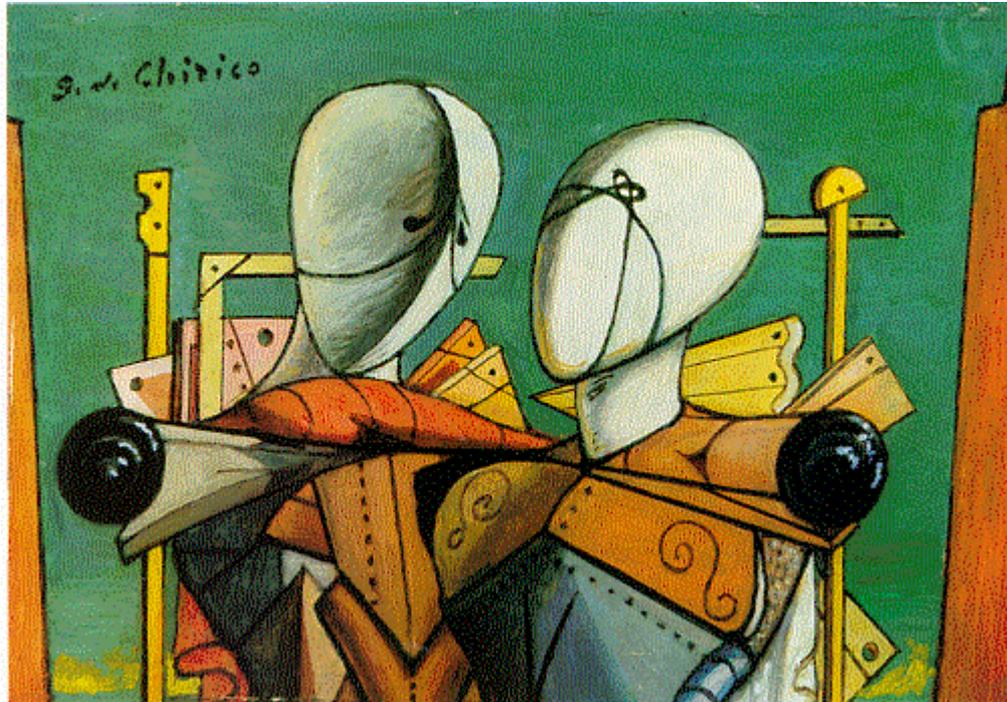


Συμπερασμός Τύπων και Πολυμορφισμός



Giorgio de Chirico, *Ettore e Andromaca*, 1915-1925

Κωστής Σαγώνας <kostis@cs.ntua.gr>
Νίκος Παπασπύρου <nickie@softlab.ntua.gr>

Εισαγωγή: Σύγκριση μεταξύ γλωσσών

```
C: int f(char a, char b) {  
    return a == b;  
}
```

```
ML: - fun f(a, b) = (a = b);  
    val f = fn : 'a * 'a -> bool
```

- Η συνάρτηση σε ML γράφεται πιο εύκολα: ο προγραμματιστής δε χρειάζεται να ορίσει τύπους
- Η συνάρτηση σε ML είναι πιο ευέλικτη: μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε τύπο (που υποστηρίζει ισότητα)
- Συναρτήσεις σαν και την παραπάνω, οι οποίες δουλεύουν για πολλούς τύπους, ονομάζονται **πολυμορφικές**

Περιεχόμενα

- Συμπερασμός τύπων (type inference)
 - Καλό παράδειγμα αλγόριθμου και εφαρμογής στατικής ανάλυσης προγραμμάτων
 - Θα δούμε τον αλγόριθμο σε κάποια παραδείγματα
- Υπερφόρτωση (overloading)
- Αυτόματη μετατροπή τύπων (type coercion)
- Πολυμορφισμός
 - Πολυμορφισμός έναντι υπερφόρτωσης
 - Υλοποίηση του πολυμορφισμού σε διαφορετικές γλώσσες
 - Παραμετρικός πολυμορφισμός (parametric polymorphism)
 - Πολυμορφισμός υποτύπων (subtype polymorphism)
- Ανακεφαλαίωση ορισμών

Συμπερασμός τύπων

Έλεγχος τύπων έναντι συμπερασμού τύπων

- **Έλεγχος τύπων**

```
int f(int x) { return x+1; };  
int g(int y) { return f(y+1)*2; };
```

- Κοιτάμε στο σώμα κάθε συνάρτησης χρησιμοποιώντας τις δηλώσεις τύπων των μεταβλητών για τον έλεγχο της συνέπειάς τους

- **Συμπερασμός τύπων**

```
int f(int x) { return x+1; };  
int g(int y) { return f(y+1)*2; };
```

- Κοιτάμε στον κώδικα, ο οποίος δεν περιέχει πληροφορία τύπων, και «μαντεύουμε» ποιοι τύποι θα έπρεπε να είχαν δηλωθεί ώστε το πρόγραμμα να είναι συνεπές ως προς τη χρήση των τύπων

- Η ML έχει σχεδιαστεί ώστε ο συμπερασμός τύπων να είναι βατός (tractable)

Χρησιμότητα

- Τύποι και έλεγχος τύπων
 - Τα συστήματα τύπων βελτιώνονται συνεχώς από την Algol 60 και έκτοτε
 - Οι τύποι έχουν αποδειχθεί σημαντικοί τόσο για τη μεταγλώττιση όσο και για την αξιοπιστία και την ασφάλεια των προγραμμάτων
- Συμπερασμός τύπων
 - Θεωρείται ως μια από τις σημαντικότερες εξελίξεις στη θεωρία και την πρακτική των γλωσσών προγραμματισμού
 - Ο συμπερασμός τύπων της ML μας δίνει μια ιδέα
 - του πώς δουλεύουν πολλοί άλλοι αλγόριθμοι συμπερασμού τύπων αλλά και
 - της στατικής ανάλυσης προγραμμάτων

Συμπερασμός τύπων στην ML

- Παράδειγμα

```
- fun add2 x = 2+x;  
val add2 = fn : int -> int
```

- Πώς συμπεραίνουμε τον παραπάνω τύπο;
 - Ο + έχει δύο τύπους: `int * int -> int`
ή `real * real -> real`
 - Η σταθερά 2 έχει τύπο `int`
 - Αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιούμε τον τύπο `: int*int -> int`
 - Αυτό με τη σειρά του σημαίνει ότι `x:int`
 - Επομένως η συνάρτηση `add2` έχει τύπο `int -> int`

Οι υπερφορτωμένοι τελεστές και συναρτήσεις, όπως ο + είναι σπάνιοι.

Τα περισσότερα σύμβολα στην ML έχουν μοναδικό τύπο.

Σε πολλές περιπτώσεις, ο μοναδικός αυτός τύπος είναι πολυμορφικός.

Μια διαφορετική παρουσίαση του συμπερασμού

- Παράδειγμα

Γράφος για $\lambda x. ((+ 2) x)$

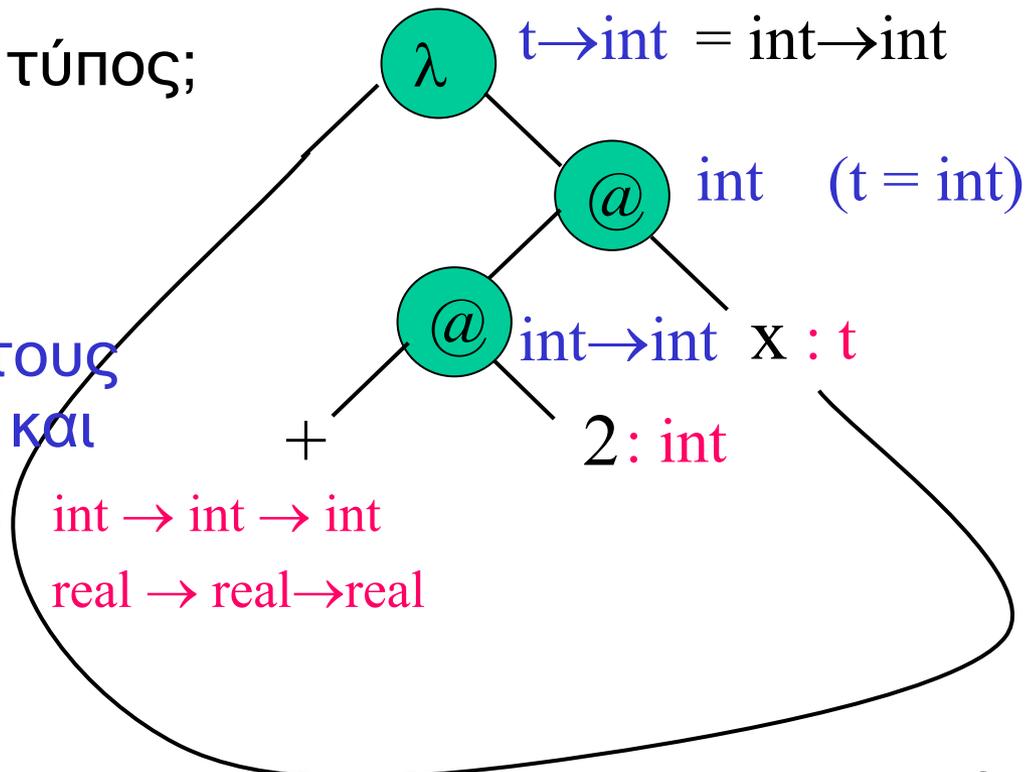
```
- fun add2 x = 2+x;  
val add2 = fn : int -> int
```

- Πώς συμπεραίνεται ο τύπος;

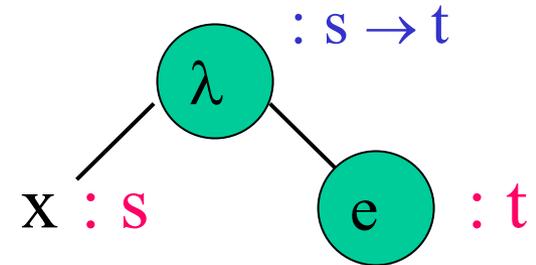
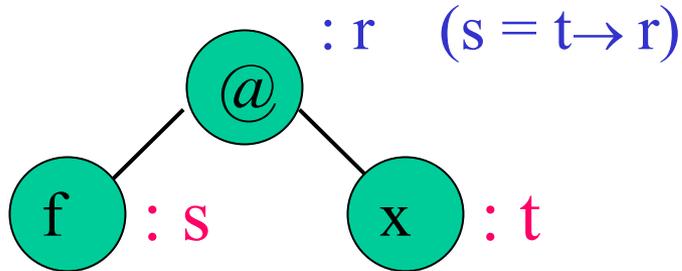
Αναθέτουμε τύπους
στα φύλλα

Πρωθούμε τύπους στους
εσωτερικούς κόμβους και
γεννάμε περιορισμούς

Επιλύουμε μέσω
αντικατάστασης
(ενοποίησης)



Εφαρμογή και ορισμός συναρτήσεων



- Εφαρμογή συνάρτησης
 - Η f έχει τύπο συνάρτησης πεδίο ορισμού \rightarrow πεδίο τιμών
 - Το πεδίο ορισμού της f είναι ίδιο με τον τύπο του ορίσματος x
 - Ο τύπος του αποτελέσματος είναι ο τύπος του πεδίου τιμών της f
- Ορισμός συνάρτησης
 - Ο τύπος της συνάρτησης είναι πεδίο ορισμού \rightarrow πεδίο τιμών
 - Πεδίο ορισμού είναι ο τύπος της μεταβλητής x
 - Πεδίο τιμών είναι ο τύπος του αποτελέσματος του σώματος e της συνάρτησης

Τύποι με μεταβλητές τύπων

- Παράδειγμα

```
- fun f g = g 2;  
val f = fn : (int -> 'a) -> 'a
```

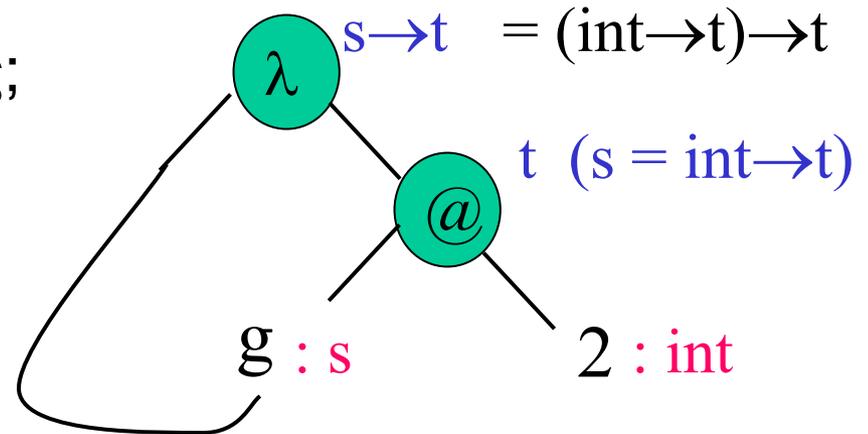
Γράφος για λg. (g 2)

- Πώς συμπεραίνεται ο τύπος;

Αναθέτουμε τύπους
στα φύλλα

Πρωθούμε τύπους στους
εσωτερικούς κόμβους και
γεννάμε περιορισμούς

Επιλύουμε μέσω
αντικατάστασης
(ενοποίησης)



Χρήση πολυμορφικών συναρτήσεων

- Συνάρτηση

```
- fun f g = g 2;  
val f = fn : (int -> 'a) -> 'a
```

- Πιθανές χρήσεις

```
- fun add2 x = x + 2;  
val add2 = fn : int -> int  
- f add2;  
val it = 4 : int
```

```
- fun isEven x = (x mod 2) = 0;  
val isEven = fn : int -> bool  
- f isEven;  
val it = true : bool
```

Αναγνώριση σφάλματος τύπων

- Έστω η συνάρτηση:

```
- fun f g = g 2;  
val f = fn : (int -> 'a) -> 'a
```

- Λάθος χρήση:

```
- fun not x = if x then false else true;  
val not = fn : bool -> bool  
- f not;
```

- Σφάλμα τύπου: δεν είναι δυνατόν ο τύπος `bool -> bool` να είναι στιγμιότυπο του τύπου `int -> 'a`

Πολυμορφικοί τύποι δεδομένων

- Τύποι δεδομένων με μεταβλητές τύπου

```
- datatype 'a list = nil | cons of 'a * ('a list);  
nil : 'a list  
cons : 'a * ('a list) -> 'a list
```

- Πολυμορφική συνάρτηση

```
- fun length nil = 0  
=     | length cons(x,rest) = 1 + length(rest);  
val length = fn : 'a list -> int
```

- Συμπερασμός τύπων

- Συμπεραίνουμε κάποιο τύπο για κάθε πρόταση ξεχωριστά
- Συνδυάζουμε τους τύπους με τον περιορισμό ότι πρέπει να είναι συμβατοί μεταξύ τους (οι τύποι ενοποιούνται αν αυτό είναι αναγκαίο)

Κύρια σημεία για το συμπερασμό τύπων

- Υπολογίζουμε τον τύπο της έκφρασης
 - Δε χρειαζόμαστε δηλώσεις για τον τύπο των μεταβλητών
 - Βρίσκουμε τον *πιο γενικό τύπο* μέσω επίλυσης περιορισμών
 - Το παραπάνω αυτόματα οδηγεί σε πολυμορφισμό συναρτήσεων
- Στατικός έλεγχος τύπων χωρίς προδιαγραφές τύπων
- Πολλές φορές οδηγεί σε καλύτερη αναγνώριση σφαλμάτων από ότι ο κοινός έλεγχος τύπων
 - Ο συμπερασμός τύπων μπορεί να αναδείξει κάποιο προγραμματιστικό λάθος ακόμα και αν δεν υπάρχει σφάλμα τύπων (βλέπε παράδειγμα στην επόμενη διαφάνεια)

Χρήσιμη πληροφορία από συμπερασμό τύπων

- Μια συνάρτηση για λίστες:

```
fun reverse nil = nil
  | reverse (h::t) = reverse t;
```

- Ο τύπος που συμπεραίνεται από την ML είναι:

```
reverse : 'a list -> 'b list
```

- Τι σημαίνει αυτός ο τύπος;

Αφού η αναστροφή μιας λίστας δεν αλλάζει τον τύπο των στοιχείων της λίστας, πρέπει να υπάρχει κάποιο λάθος στον παραπάνω ορισμό της “reverse”

Πολυμορφισμός και Υπερφόρτωση



Συμπερασμός Τύπων και Πολυμορφισμός

Υπερφόρτωση (overloading)

- Μια συνάρτηση (ή ένας τελεστής) είναι **υπερφορτωμένη** όταν έχει τουλάχιστον δύο ορισμούς για διαφορετικούς τύπους ορισμάτων
- Πολλές γλώσσες έχουν υπερφορτωμένους τελεστές

ML:

```
val x = 1 + 2;  
val y = 1.0 + 2.0;
```

Pascal:

```
a := 1 + 2;  
b := 1.0 + 2.0;  
c := "hello " + "there";  
d := ['a'..'d'] + ['f'];
```

- Επίσης, κάποιες γλώσσες επιτρέπουν τον ορισμό νέων υπερφορτωμένων συναρτήσεων ή τελεστών

Προσθήκη σε ήδη υπερφορτωμένους τελεστές

- Κάποιες γλώσσες, όπως η C++, επιτρέπουν πρόσθετη υπερφόρτωση των ήδη υπερφορτωμένων τελεστών

```
class complex {
    double rp, ip; // real part, imaginary part
public:
    complex(double r, double i) {rp = r; ip = i;}
    friend complex operator+(complex, complex);
    friend complex operator*(complex, complex);
};

void f(complex a, complex b, complex c) {
    complex d = a + b * c;
    ...
}
```

Υπερφόρτωση τελεστών στη C++

- Η C++ επιτρέπει σχεδόν σε όλους τους τελεστές την πρόσθετη υπερφόρτωση, συμπεριλαμβανομένων των:
 - Πιο συχνά χρησιμοποιούμενων τελεστών (+, -, *, /, %, ^, &, |, ~, !, =, <, >, +=, -=, /=, *=, /=, %=, ^=, &=, |=, <<, >>, >>=, <<=, ==, !=, <=, >=, &&, ||, ++, --, ->*, /)
 - Αποδεικτοδότησης (dereferencing) (*p και p->x)
 - Χρήσης δεικτών (a[i])
 - Κλήσης συνάρτησης (f(a, b, c))
 - Δέσμευσης και αποδέσμευσης μνήμης (new και delete)

Ορισμός υπερφορτωμένων συναρτήσεων

- Κάποιες γλώσσες, όπως η C++, επιτρέπουν την υπερφόρτωση των ονομάτων των συναρτήσεων

```
int square(int x) {  
    return x*x;  
}  
  
double square(double x) {  
    return x*x;  
}
```

Όμως η υπερφόρτωση εξαφανίζεται στη C++

```
int square(int x) {  
    return x*x;  
}  
  
double square(double x) {  
    return x*x;  
}  
  
void f() {  
    int a = square(3);  
    double b = square(3.0);  
}
```

square_i

square_d

Δίνουμε καινούργια
(μοναδικά) ονόματα σε
υπερφορτωμένους
ορισμούς συναρτήσεων...

Εξαφάνιση υπερφόρτωσης στη C++

```
int square_i(int x) {  
    return x*x;  
}  
  
double square_d(double x) {  
    return x*x;  
}  
  
void f() {  
    int a = square_i(3);  
    double b = square_d(3.0);  
}
```

Και στη συνέχεια μετονομάζουμε τις κλήσεις (ανάλογα με τους τύπους των ορισμάτων τους)

Υλοποίηση υπερφόρτωσης στη C++

- Οι μεταγλωττιστές συνήθως υλοποιούν την υπερφόρτωση:
 - Δημιουργούν μονομορφικές συναρτήσεις, μια για κάθε ορισμό
 - Εφευρίσκουν ένα νέο όνομα για κάθε ορισμό το οποίο κωδικοποιεί την πληροφορία για τους τύπους
 - Κάθε κλήση χρησιμοποιεί το κατάλληλο όνομα ανάλογα με τους τύπους των παραμέτρων

C++:

```
int shazam(int a, int b) {return a+b;}  
double shazam(double a, double b) {return a+b;}
```

Assembler:

```
shazam__Fii:  
    lda $30,-32($30)  
    .frame $15,32,$26,0  
  
    ...  
shazam__Fdd:  
    lda $30,-32($30)  
    .frame $15,32,$26,0  
  
    ...
```

Αυτόματος εξαναγκασμός τύπου (Coercion)

- Σε πολλές γλώσσες ο μεταγλωττιστής εξαναγκάζει την αυτόματη μετατροπή τύπου (type coercion), ακόμα και σε περιπτώσεις που οι μετατροπές δεν είναι άμεσα δηλωμένες από τον προγραμματιστή

Δήλωση μετατροπής
τύπου στη Java:

```
double x;  
x = (double) 42;
```

Coercion στη Java:

```
double x;  
x = 42;
```

Αυτόματη μετατροπή παραμέτρων

- Διαφορετικές γλώσσες υποστηρίζουν διαφορετικές μετατροπές σε διαφορετικές περιπτώσεις: σε αναθέσεις, σε δυαδικούς τελεστές, σε μοναδιαίους τελεστές, σε παραμέτρους, κ.λπ.
- Όταν μια γλώσσα υποστηρίζει αυτόματους εξαναγκασμούς μετατροπής τύπου σε παραμέτρους μιας κλήσης συνάρτησης (ή σε μια χρησιμοποίηση τελεστή), τότε η συνάρτηση (ή ο τελεστής) είναι πολυμορφική (πολυμορφικός)

Παράδειγμα: Java

```
void f(double x) {  
    ...  
}  
  
f((byte) 1);  
f((short) 2);  
f('a');  
f(3);  
f(4L);    // long  
f(5.6F);  // float
```

Η συνάρτηση **f** μπορεί να κληθεί με κάθε τύπο παραμέτρου που μπορεί να μετατραπεί αυτόματα σε **double** στη Java

Ορισμός αυτόματων μετατροπών τύπων

- Οι γλώσσες ξοδεύουν μεγάλο μέρος του τυπικού ορισμού τους στο να ορίσουν επακριβώς τους επιτρεπόμενους αυτόματους εξαναγκασμούς μετατροπής τύπου και το πώς αυτοί λαμβάνουν χώρα
- Κάποιες γλώσσες, ειδικά κάποιες παλιές γλώσσες όπως η Algol 68 και η PL/I, επιτρέπουν πολλές αυτόματες μετατροπές τύπων
- Κάποιες άλλες, όπως η ML, δεν επιτρέπουν καμία
- Οι περισσότερες, όπως η Java, είναι κάπου ενδιάμεσα

Παράδειγμα: Java

5.6.1 **Unary Numeric Promotion**

Some operators apply *unary numeric promotion* to a single operand, which must produce a value of a numeric type: If the operand is of compile-time type **byte**, **short**, or **char**, unary numeric promotion promotes it to a value of type **int** by a widening conversion (§5.1.2). Otherwise, a unary numeric operand remains as is and is not converted.

Unary numeric promotion is performed on expressions in the following situations: the dimension expression in array creations (§15.9); the index expression in array access expressions (§15.12); operands of the unary operators plus **+** (§15.14.3) and minus **-** (§15.14.4) ...

The Java Language Specification
James Gosling, Bill Joy, Guy Steele

Αυτόματες μετατροπές τύπων και υπερφόρτωση

- Η αυτόματη μετατροπή τύπων συνήθως έχει περίεργες αλληλεπιδράσεις με την υπερφόρτωση συναρτήσεων
- Αυτό συμβαίνει διότι
 - Η υπερφόρτωση χρησιμοποιεί τους τύπους για την επιλογή του ορισμού που θα χρησιμοποιηθεί
 - Η αυτόματη μετατροπή τύπων χρησιμοποιεί τον ορισμό για να αποφασίσει τι είδους μετατροπή θα πρέπει να γίνει

Παραδείγματα... σύγχυσης

- Έστω ότι, όπως στη C++, η γλώσσα επιτρέπει την αυτόματη μετατροπή `char` σε `int` ή σε `double`
- Ποια `square` καλείται σε μια κλήση `square('a');`

```
int square(int x) {  
    return x*x;  
}
```

```
double square(double x) {  
    return x*x;  
}
```

- Έστω ότι, όπως στη C++, η γλώσσα επιτρέπει την αυτόματη μετατροπή `char` σε `int`
- Ποια `f` καλείται σε μια κλήση `f('a', 'b');`

```
void f(int x, char y) {  
    ...  
}
```

```
void f(char x, int y) {  
    ...  
}
```

Πολυμορφισμός

Παραμετρικός πολυμορφισμός

- Μια συνάρτηση είναι **παραμετρικά πολυμορφική** εάν έχει τύπο που περιέχει μία ή περισσότερες μεταβλητές τύπου
- Ένας τύπος με μεταβλητές τύπων είναι ένας **πολυτύπος**
- Παραμετρικός πολυμορφισμός συναντιέται σε γλώσσες όπως η ML, η C++ και η Ada

Παράδειγμα: C++ Function Templates

```
template<class X> X max(X a, X b) {  
    return a>b ? a : b;  
}  
  
void g(int a, int b, char c, char d) {  
    int m1 = max(a,b);  
    char m2 = max(c,d);  
}
```

Ο τελεστής σύγκρισης > μπορεί να είναι πρόσθετα υπερφορτωμένος, οπότε η μεταβλητή τύπου X δεν περιορίζεται μόνο σε τύπους για τους οποίους ο τελεστής > είναι προκαθορισμένος.

Παράδειγμα: Συναρτήσεις σε ML

```
- fun identity x = x;
val identity = fn : 'a -> 'a
- identity 42;
val it = 42 : int
- identity "hello";
val it = "hello" : string
- fun reverse x =
=   if null x then nil
=   else (reverse (tl x)) @ [(hd x)];
val reverse = fn : 'a list -> 'a list
```

Υλοποίηση παραμετρικού πολυμορφισμού

- Το ένα άκρο: πολλά αντίγραφα του κώδικα
 - Δημιουργείται ένα σύνολο από μονομορφικές συναρτήσεις, μία για κάθε πιθανό στιγμιότυπο των μεταβλητών τύπου
 - Κάθε αντίγραφο είναι μια μονομορφική υλοποίηση
 - Η οποία όμως μπορεί να βελτιστοποιηθεί/προσαρμοστεί στο συγκεκριμένο τύπο
- Το άλλο άκρο: ο ίδιος κώδικας
 - Δημιουργείται μία μόνο υλοποίηση και χρησιμοποιείται για όλες τις κλήσεις (αληθινός καθολικός πολυμορφισμός)
 - Δε μπορεί να βελτιστοποιηθεί για χρήση συγκεκριμένων τύπων
- Βεβαίως υπάρχουν και πολλές ενδιάμεσες υλοποιήσεις

Πολυμορφισμός υποτύπων

- Μια συνάρτηση (ή ένας τελεστής) είναι **πολυμορφική ως προς υποτύπους** εάν κάποια από τις παραμέτρους τύπων της έχει υποτύπους
- Είναι σημαντική πηγή πολυμορφισμού σε γλώσσες με πλούσια δομή υποτύπων
- Τέτοιες είναι οι περισσότερες αντικειμενοστρεφείς γλώσσες προγραμματισμού (π.χ. η Java)

Παράδειγμα: Pascal

```
type
  Day = (Mon, Tue, Wed, Thu, Fri, Sat, Sun);
  Weekday = Mon..Fri;

function nextDay(D: Day): Day;
begin
  if D=Sun then nextDay := Mon else nextDay := D+1
end;

procedure p(D: Day; W: Weekday);
begin
  D := nextDay(D);
  D := nextDay(W)
end;
```

***Πολυμορφισμός υποτύπων:** η συνάρτηση **nextDay** μπορεί να κληθεί με μια παράμετρο υποτύπου*

Παράδειγμα: Java

```
class Car {
    void brake() { ... }
}

class ManualCar extends Car
{
    void clutch() { ... }
}

void g(Car z) {
    z.brake();
}

void f(Car x, ManualCar y) {
    g(x);
    g(y);
}
```

*Υποτύπος της κλάσης **Car** είναι η **ManualCar***

*Η συνάρτηση **g** έχει έναν απεριόριστο αριθμό τύπων—ένα για κάθε κλάση που είναι μια υποκλάση της κλάσης **Car***

Λέμε ότι αυτό είναι πολυμορφισμός υποτύπων

Ορισμοί (Ανακεφαλαίωση)

Πολυμορφισμός

- Είδαμε 4 κατηγορίες πολυμορφισμού
 - Υπάρχουν και άλλες χρήσεις του πολυμορφισμού
 - Πολυμορφισμός μεταβλητών, κλάσεων, πακέτων, συναρτήσεων
 - Είναι άλλο ένα όνομα για κλήση μεθόδων κατά το χρόνο εκτέλεσης: όταν μια κλήση $x.f()$ μπορεί να καλέσει διαφορετικές μεθόδους ανάλογα με την κλάση του αντικειμένου x κατά το χρόνο εκτέλεσης
 - Ορισμός που καλύπτει όλες τις χρήσεις:
- Μια συνάρτηση (ή ένας τελεστής) είναι **πολυμορφική** εάν έχει τουλάχιστον δύο πιθανούς τύπους
 - Λέμε ότι έχει **περιστασιακό πολυμορφισμό** (*ad hoc polymorphism*) εάν έχει τουλάχιστον δύο αλλά πεπερασμένο πλήθος πιθανών τύπων
 - Λέμε ότι έχει **καθολικό πολυμορφισμό** (*universal polymorphism*) εάν έχει άπειρο πλήθος πιθανών τύπων

Υπερφόρτωση

- Περιστασιακός πολυμορφισμός (ad hoc polymorphism)
- Κάθε διαφορετικός τύπος πρέπει να έχει το δικό του ορισμό
- Αλλά οι ορισμοί αυτοί είναι πεπερασμένοι σε ένα πεπερασμένο πρόγραμμα



Αυτόματη μετατροπή τύπων παραμέτρων

- Περιστασιακός πολυμορφισμός (ad hoc polymorphism)
- Όσο υπάρχουν πεπερασμένοι διαφορετικοί τύποι, υπάρχουν πεπερασμένοι το πλήθος διαφορετικοί τρόποι που μπορεί να γίνει η αυτόματη μετατροπή τύπων των παραμέτρων

Παραμετρικός πολυμορφισμός

- Καθολικός πολυμορφισμός
- Τουλάχιστον όσο το πλήθος των πιθανών τιμών των μεταβλητών τύπων είναι άπειρο

Πολυμορφισμός υποτύπων

- Καθολικός πολυμορφισμός
- Όσο δεν υπάρχει κάποιο όριο στο πλήθος των διαφορετικών υποτύπων που μπορεί να δηλωθούν για κάποιο συγκεκριμένο τύπο
- Συνηθισμένος σε αντικειμενοστρεφείς γλώσσες προγραμματισμού, όπως η Java

Συμπερασματικά

- Συμπερασμός τύπων
 - Προσπαθεί να εξάγει τον καλύτερο τύπο για κάθε έκφραση, με βάση πληροφορία για (κάποια από) τα σύμβολα της έκφρασης
- Πολυμορφισμός
 - Όταν κάποια συνάρτηση ή αλγόριθμος μπορεί να δουλέψει σε πολλούς τύπους δεδομένων
- Υπερφόρτωση (overloading)
 - Όταν σύμβολα έχουν πολλαπλές χρήσεις οι οποίες επιλύονται στο χρόνο μεταγλώττισης (compile time)