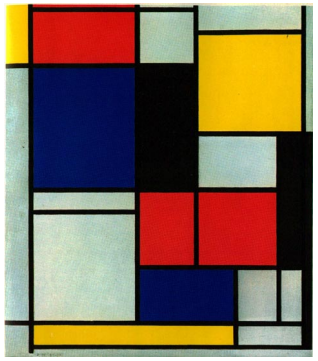
Εισαγωγή στους Τύπους



Piet Mondrian, *Composition with Blue, Yellow, Black, and Red,* 1922

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

Περιεχόμενα

- Τύποι στις γλώσσες προγραμματισμού
  - Τι είναι οι τύποι;
  - Κατηγορίες και αναπαραστάσεις των τύπων
- Χρήση και χρησιμότητα των τύπων
  - Γλώσσες με στατικό και γλώσσες και δυναμικό σύστημα τύπων
  - Έλεγχος τύπων
    - κατά το χρόνο μετάφρασης (compile-time checking)
    - κατά το χρόνο εκτέλεσης (run-time checking)
  - Η έννοια της συντηρητικής ανάλυσης προγραμμάτων
  - Ισοδυναμία τύπων

Τι είναι οι τύποι;

- Ένας τύπος είναι ένα σύνολο από τιμές
- Όταν ορίζουμε ότι μια μεταβλητή έχει ένα συγκεκριμένο τύπο, δηλώνουμε ότι οι τιμές της μεταβλητής θα είναι πάντα στοιχεία του συγκεκριμένου συνόλου

```
int n;
```

- Άρα ένας τύπος είναι ένα σύνολο από τιμές
  - που έχουν μια συγκεκριμένη κοινή αναπαράσταση
  - και μία συλλογή από λειτουργίες που μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτές τις τιμές
- Το ποια σύνολα θεωρούνται ή δεν θεωρούνται τύποι εξαρτάται από τη γλώσσα

Πρωτόγονοι και κατασκευαζόμενοι τύποι

- Κάθε τύπος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αλλά δε μπορεί να οριστεί από ένα πρόγραμμα μιας γλώσσας είναι ένας πρωτόγονος τύπος της γλώσσας
  - Πρωτόγονοι τύποι της ML: `int`, `real`, `char`
  - Ένα πρόγραμμα ML δε μπορεί να ορίσει έναν τύπο που να δουλεύει σαν τον προκαθορισμένο τύπο `int`
- Κάθε τύπος που μπορεί να οριστεί από ένα πρόγραμμα (με βάση πρωτόγονους ή ήδη ορισμένους τύπους) είναι ένας κατασκευαζόμενος τύπος
  - Π.χ. κατασκευαζόμενος τύπος στην ML: `int list`
  - Ορίζεται με χρήση του πρωτόγονου τύπου `int` και του κατασκευαστή τύπων `list`

Πρωτόγονοι τύποι

- Ο ορισμός της κάθε γλώσσας είναι αυτός που καθορίζει ποιοι είναι πρωτόγονοι τύποι της γλώσσας
- Κάποιες γλώσσες ορίζουν τους πρωτόγονους τύπους πιο αυστηρά από κάποιες άλλες:
  - Π.χ. η Java ορίζει τους πρωτόγονους τύπους επακριβώς
  - Από την άλλη μεριά, π.χ. η C και η ML αφήνουν κάποια περιθώρια ελευθερίας στον ορισμό των πρωτόγονων τύπων μεταξύ διαφορετικών υλοποιήσεων της γλώσσας

Παράδειγμα: πρωτόγονοι τύποι ακεραίων

C:

```
char
unsigned char
short int
unsigned short int
int
unsigned int
long int
unsigned long int
long long
```

Δεν υπάρχει προκαθορισμένη υλοποίηση, αλλά οι "μεγαλύτεροι" τύποι πρέπει να έχουν τουλάχιστον το εύρος των "μικρότερων" τύπων

Java:

`byte`	(1-byte signed)
`char`	(2-byte unsigned)
`short`	(2-byte signed)
`int`	(4-byte signed)
`long`	(8-byte signed)

Scheme:

`integer`

Ακέραιοι "απείρου" εύρους

Haskell:

`int`	(4-byte signed)
`Integer`	("άπειρο" εύρος)

Θέματα σχεδιασμού

- Σε ποια σύνολα αντιστοιχούν οι πρωτόγονοι τύποι;
  - Τι είναι μέρος του ορισμού της γλώσσας, τι επαφίεται στη διακριτική ευχέρεια της υλοποίησης της γλώσσας;
  - Εάν χρειαστεί, πως μπορεί ένα πρόγραμμα να ανακαλύψει πληροφορίες σχετικές με τα μέλη του συνόλου;
    - (`INT_MAX` στη C, `Int.maxInt` στην ML, …)
- Τι λειτουργίες υποστηρίζονται και πώς;
  - Λεπτομερείς ορισμοί περί στρογγυλοποίησης, εξαιρέσεων, κ.λπ.
- Η επιλογή της αναπαράστασης είναι καθοριστική για κάποιες από τις αποφάσεις

Κατασκευαζόμενοι τύποι

- Πρόσθετοι τύποι οι οποίοι ορίζονται με χρήση της γλώσσας
- Παραδείγματα: απαριθμήσεις, πλειάδες, πίνακες, συμβολοσειρές, λίστες, ενώσεις, υποτύποι, και τύποι συναρτήσεων
- Για κάθε έναν από αυτούς, υπάρχει στενή σχέση μεταξύ του πώς ορίζονται τα *σύνολα* στα μαθηματικά και του πώς ορίζονται οι *τύποι* στις γλώσσες προγραμματισμού

Απαριθμήσεις (enumerations)

- Στα μαθηματικά μπορούμε ορίσουμε ένα σύνολο απλώς με την απαρίθμηση των μελών του:

$$S = \{a, b, c\}$$

- Πολλές γλώσσες υποστηρίζουν τύπους απαρίθμησης:

C: `enum coin {penny, nickel, dime, quarter};`
Ada: `type GENDER is (MALE, FEMALE);`
Pascal: `type primaryColors = (red, green, blue);`
ML: `datatype day = M | Tu | W | Th | F | Sa | Su;`

- Ορίζουν ένα νέο τύπο (= σύνολο τιμών)
- Ορίζουν επίσης μια συλλογή από ονοματισμένες σταθερές αυτού του τύπου (= στοιχεία του συνόλου)

Αναπαράσταση τιμών μιας απαρίθμησης

- Ένας συνήθης τρόπος αναπαράστασης απαριθμήσεων είναι η χρησιμοποίηση μικρών ακεραίων για τις τιμές
- Η αναπαράσταση μπορεί να είναι εμφανής στον προγραμματιστή, όπως π.χ. στη C:

```
enum coin { penny = 1, nickel = 5, dime = 10, quarter = 25 };

enum escapes { BELL = '\a', BACKSPACE = '\b', TAB = '\t',
               NEWLINE = '\n', VTAB = '\v', RETURN = '\r' };
```


Λειτουργίες απαριθμήσεων

- Έλεγχος ισότητας, φυσικά:

```
fun isWeekend x = (x = Sa orelse x = Su);
```

- Εάν η "ακέραια φύση" της αναπαράστασης των απαριθμήσεων είναι εμφανής, η γλώσσα συνήθως επιτρέπει κάποιες από ή όλες τις λειτουργίες που επιτρέπονται σε ακεραίους:

Pascal: `for c := red to blue do p(c)`

C: `int x = penny + nickel + dime;`

Πλειάδες (tuples)

- Το καρτεσιανό γινόμενο δύο ή περισσοτέρων συνόλων ορίζει σύνολα από πλειάδες:

$$S = X \times Y = \{(x, y) \mid x \in X \wedge y \in Y\}$$

- Κάποιες γλώσσες υποστηρίζουν καθαρές πλειάδες:

```
fun get1 (x : real * real) = #1 x;
```

- Πολλές άλλες υποστηρίζουν εγγραφές (records), που είναι πλειάδες τα πεδία των οποίων έχουν ονόματα:

C:
```
struct complex {
  double rp;
  double ip;
};
```

:ML
```
type complex = {
  rp:real,
  ip:real
};
fun getip (x : complex) = #ip x;
```

Αναπαράσταση των πλειάδων

- Η συνήθης αναπαράσταση των πλειάδων είναι τα πεδία τους να διατάσσονται το ένα μετά το άλλο στη μνήμη
- Αλλά υπάρχουν πολλές λεπτομέρειες:
  - Με ποια σειρά;
  - Επιτρέπονται "τρύπες" για ευθυγράμμιση (alignment) των πεδίων (π.χ. σε αρχές διαφορετικών λέξεων) στη μνήμη;
  - Είναι κάτι από όλα αυτά ορατό στον προγραμματιστή;

Παράδειγμα: ANSI C

The members of a structure have addresses increasing in the order of their declarations. A non-field member of a structure is aligned at an addressing boundary depending on its type; therefore, there may be unnamed holes in a structure. If a pointer to a structure is cast to the type of a pointer to its first member, the result refers to the first member…

Adjacent field members of structures are packed into implementation-dependent storage units in an implementation-dependent direction...

The C Programming Language, 2nd ed.
Brian W. Kernighan and Dennis M. Ritchie

Λειτουργίες πλειάδων

- Επιλογή στοιχείων, φυσικά:

C: `x.ip`
ML: `#ip x`

- Άλλες λειτουργίες ανάλογα με το ποιο/πόσο μέρος της αναπαράστασης είναι εμφανές στον προγραμματιστή:

C:
```
double y = *((double *) &x);
struct person {
   char *firstname;
   char *lastname;
} p1 = {"dennis","ritchie"};
```


Ανύσματα (vectors)

- Ανύσματα γνωστού (σταθερού) μήκους:

$$S = X^n = \{(x_1, \ldots, x_n) \mid \forall i . x_i \in X\}$$

- Ανύσματα αγνώστου μήκους:

$$S = X^* = \bigcup_i X^i$$

- Τύποι σχετικοί με τα ανύσματα:
  - Πίνακες, συμβολοσειρές και λίστες
  - Είναι σαν τις πλειάδες αλλά συνήθως έχουν τον ίδιο τύπο στοιχείων και πολλές παραλλαγές από γλώσσα σε γλώσσα
  - Ένα παράδειγμα διαφοροποίησης: δείκτες (indices) σε πίνακες
    - Ποιες είναι οι τιμές των δεικτών;
    - Καθορίζεται το μέγεθος των πινάκων στο χρόνο μεταγλώττισης ή στο χρόνο εκτέλεσης;

Τιμές δεικτών

- Στη C, C++, Java και C#:
  - Το πρώτο στοιχείο ενός πίνακα **a** είναι το **a[0]**
  - Οι δείκτες είναι πάντα ακέραιοι που αρχίζουν από το 0
- Η Pascal είναι πιο ευέλικτη:
  - Μπορεί να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι δεικτών: ακέραιοι, χαρακτήρες, απαριθμήσεις, υποδιαστήματα (subranges)
  - Ο αρχικός δείκτης καθορίζεται από τον προγραμματιστή
  - Ο τελικός δείκτης καθορίζεται επίσης από τον προγραμματιστή: όμως το μέγεθος ενός πίνακα πρέπει να είναι γνωστό κατά το χρόνο μετάφρασης του προγράμματος

Παράδειγμα πίνακα σε Pascal

```
type
  LetterCount = array['a'..'z'] of Integer;
var
  Counts: LetterCount;

begin
  Counts['a'] = 1
  …
```


Σχεδιαστικά θέματα σχετικά με τα ανύσματα

- Τι είδους δείκτες μπορούν να έχουν οι πίνακες;
- Πρέπει το μέγεθος των πινάκων να είναι καθορισμένο κατά το χρόνο μετάφρασης;
- Μπορεί να αλλάξει (π.χ. επεκταθεί) το μέγεθος δυναμικά;
- Μπορούν οι πίνακες να έχουν πολλές διαστάσεις;
- Είναι ένας πίνακας με πολλές διαστάσεις ισοδύναμος με έναν πίνακα από πίνακες;
- Πώς διατάσσονται τα στοιχεία ενός πίνακα στη μνήμη;
- Οι συμβολοσειρές έχουν το δικό τους τύπο ή είναι πίνακες από bytes; Υπάρχει τύπος λίστας;

Ενώσεις (unions)

- Η ένωση δύο συνόλων δίνει ένα καινούριο σύνολο

$$S = X \cup Y$$

- Πολλές γλώσσες υποστηρίζουν τύπους ενώσεων:

C:
```
union element {
  int i;
  double d;
};
```

ML:
```
datatype element =
  I of int |
  R of real;
```

- Η αναπαράσταση των ενώσεων μπορεί να είναι ή μπορεί να μην είναι εμφανής στον προγραμματιστή:

```
sizeof(u) == max(sizeof(u.i),sizeof(u.d))
```

Αυστηρότητα τύπων και ενώσεις

- Στην ML, το μόνο που μπορεί να κάνουμε σε μία ένωση είναι να εξάγουμε τα περιεχόμενά της
- Και στην περίπτωση αυτή πρέπει να πούμε τι μπορεί να γίνει με τις τιμές ενώσεων διαφορετικών τύπων:

```
datatype element =
  I of int |
  R of real;

fun getReal (R x) = x
  | getReal (I x) = real x;
```


Ενώσεις χωρίς αυστηρό σύστημα τύπων

- Σε μερικές γλώσσες οι λεπτομέρειες της υλοποίησης των ενώσεων είναι εμφανείς στον προγραμματιστή
- Σε κάποιες περιπτώσεις τα προγράμματα μπορούν να εκμεταλλευθούν το γεγονός ότι ο τύπος κάποιας τιμής χάνεται:

```
union element {
  int i;
  double d;
};

union element e;
e.i = 100;
double x = e.d;
```


Τι λέει η ANSI C για τις ενώσεις;

A union may be thought of as a structure all of whose members begin at offset 0 and whose size is sufficient to contain any of its members. At most one of the members can be stored in a union at any time. If a pointer to a union is cast to the type of a pointer to a member, the result refers to that member.

In general, a member of a union may not be inspected unless the value of the union has been assigned using that same member.

The C Programming Language, 2nd ed.
Brian W. Kernighan and Dennis M. Ritchie

Υποσύνολα (subsets)

- Μπορούμε να ορίσουμε το υποσύνολο που ορίζεται με βάση ένα κατηγόρημα P :

$$S = \{x \in X \mid P(x)\}$$

- Κάποιες γλώσσες υποστηρίζουν υποτύπους (subtypes), με λίγη ή περισσότερη γενικότητα
  - Λίγη γενικότητα: Ορισμός υποδιαστημάτων στην Pascal
    `type digit = 0..9;`
  - Κάμποση γενικότητα: Ορισμός υποτύπων στην Ada
    `subtype DIGIT is INTEGER range 0..9;`
    `subtype WEEKDAY is DAY range MON..FRI;`
  - Πολλή γενικότητα: Ορισμός τύπων στη Lisp μέσω κατηγορημάτων

Παράδειγμα: Ada Subtypes

```
type DEVICE is (PRINTER, DISK);

type PERIPHERAL(Unit: DEVICE) is
  record
    HoursWorking: INTEGER;
    case Unit is
      when PRINTER =>
        Line_count: INTEGER;
      when DISK =>
        Cylinder: INTEGER;
        Track: INTEGER;
    end case;
  end record;

subtype DISK_UNIT is PERIPHERAL(DISK);
```


Παράδειγμα: Ορισμός τύπων στη Lisp

```
(declare (type integer x))

(declare (type (or null cons) x))

(declare (type (and number (not integer)) x))

(declare (type (and integer (satisfies evenp)) x))
```


Αναπαράσταση των τιμών ενός υποτύπου

- Συνήθως, ο υποτύπος χρησιμοποιεί την ίδια εσωτερική αναπαράσταση με τον υπερτύπο (supertype) του
- Ερωτήσεις:
  - Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποια πιο "φθηνή" αναπαράσταση; Π.χ. οι δύο παρακάτω τύποι χρειάζονται τον ίδιο χώρο αποθήκευσης;

    `X: 1..9`

    `X: Integer`?
  - Οι υποτύποι επιβάλλονται και ελέγχονται από το μεταγλωττιστή;

    `X := 10`

    `X := X + 1`?

Λειτουργίες υποτύπων

- Συνήθως οι επιτρεπόμενες λειτουργίες είναι όλες οι λειτουργίες που είναι διαθέσιμες και για τον υπερτύπο
- Καθώς και κάποιες άλλες που δεν έχουν τόσο πολύ νόημα στον υπερτύπο:

```
function toDigit (X: Digit) : Char;
```

Θέμα για περισυλλογή

Ένας υποτύπος είναι ένα υποσύνολο όλων των τιμών ενός υπερτύπου, αλλά συνήθως υποστηρίζει ένα υπερσύνολο από λειτουργίες.

Κάποια λόγια για τις κλάσεις (classes)

- Μια από τις βασικές ιδέες του αντικειμενοστρεφούς προγραμματισμού
- Μια κλάση είναι ένα είδος τύπου: κάποια δεδομένα και οι λειτουργίες τους σε “συσκευασία πακέτου”
- Μια υποκλάση είναι ένας υποτύπος: περιλαμβάνει μόνο ένα υποσύνολο των αντικειμένων, αλλά υποστηρίζει ένα υπερσύνολο των λειτουργιών
- Περισσότερα για τις κλάσεις στις διαλέξεις των γλωσσών αντικειμενοστρεφούς προγραμματισμού

Συναρτήσεις (functions)

- Το σύνολο των συναρτήσεων με κάποιο πεδίο ορισμού και τιμών:

$$S = D \rightarrow R = \{f \mid \text{dom } f = D \wedge \text{ran } f = R\}$$

- Οι περισσότερες γλώσσες υποστηρίζουν την έννοια των συναρτήσεων:

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

ML:
```
fun f(a:char, b:char) = (a = b);
```


Λειτουργίες συναρτήσεων

- Φυσικά, κλήση συναρτήσεων
- Μέχρι στιγμής, το θεωρήσαμε ως δεδομένο ότι οι υπόλοιποι τύποι μπορούσαν να περαστούν ως παράμετροι, να επιστραφούν ως αποτελέσματα, να ανατεθούν σε μεταβλητές, κ.λπ.
- Με τις συναρτήσεις δε μπορούμε να το θεωρήσουμε ως δεδομένο: οι περισσότερες γλώσσες δεν υποστηρίζουν κάτι περισσότερο από κλήση συναρτήσεων!

Χρησιμότητα των τύπων

Χρησιμότητα των τύπων

- Βοηθούν στην οργάνωση και τεκμηρίωση προγραμμάτων
  - Διαφορετικοί τύποι για διαφορετικές έννοιες
    - Αναπαριστάνουν έννοιες από το πεδίο του προβλήματος
  - Υποδηλώνουν την προτιθέμενη χρήση των μεταβλητών
    - Οι τύποι μπορούν να ελεγχθούν αυτόματα και να μείνουν σε συμφωνία με αλλαγές στο πρόγραμμα, σε αντίθεση με τα σχόλια
- Υποδεικνύουν και ανιχνεύουν κάποιου είδους σφάλματα
  - Ο έλεγχος τύπων μπορεί να ανιχνεύσει υπολογισμούς χωρίς σημασιολογία, όπως π.χ. `3 + true - "Bill"`
- Υποστηρίζουν τη βελτιστοποίηση (optimization)
  - Παράδειγμα: οι **`short`** ακέραιοι αποθηκεύονται σε λιγότερα bits
  - Αποφυγή ελέγχου εξαιρέσεων ή υπερχείλισης

Σφάλματα τύπων (type errors)

- Όπως είδαμε, ένας τύπος ορίζεται από:
  - Τρόπους εισαγωγής τιμών για τον τύπο
  - Τρόπους χρησιμοποίησης των τιμών για την παραγωγή νέων τύπων τιμών
- Κάτω από αυτό το πρίσμα
  - Κάθε τύπος συσχετίζεται με ένα σύνολο από λειτουργίες (δηλαδή, με κάποιους τελεστές)
  - Κάθε λειτουργία ορίζεται πάνω σε στοιχεία ενός συγκεκριμένου τύπου (δηλαδή, σε ένα συγκεκριμένο σύνολο τιμών)
  - Ένα **σφάλμα τύπου** λαμβάνει χώρα όταν η λειτουργία πάει να εφαρμοστεί σε ορίσματα εκτός του πεδίου ορισμού της (δηλαδή, σε ορίσματα διαφορετικού τύπου)

Επισημειώσεις τύπων

- Πολλές γλώσσες απαιτούν, ή τουλάχιστον επιτρέπουν, επισημειώσεις τύπων σε μεταβλητές, συναρτήσεις, κ.λπ.
- Χρησιμοποιούνται από τον προγραμματιστή για την παροχή στατικής πληροφορίας τύπων στο σύστημα υλοποίησης της γλώσσας
- Οι επισημειώσεις είναι επίσης ένα είδος τεκμηρίωσης, που καθιστά τα προγράμματα πιο εύκολα αναγνώσιμα από άλλους
- Μέρος της σύνταξης της γλώσσας συνήθως έχει σχέση με τον ορισμό τύπων (π.χ. **`*`**, **`->`** και **`list`** στην ML)

Εγγενείς τύποι (intrinsic types)

- Κάποιες γλώσσες χρησιμοποιούν ονομαστικές συμβάσεις για τον ορισμό των τύπων μεταβλητών
  - Σε διαλέκτους της BASIC: **`S$`** ορίζει μια συμβολοσειρά
  - Σε διαλέκτους της Fortran: **`I`** ορίζει έναν ακέραιο
- Όπως και οι ρητές επισημειώσεις τύπων, οι εγγενείς τύποι προμηθεύουν με πληροφορία τύπων τόσο την υλοποίηση της γλώσσας όσο και τον αναγνώστη του προγράμματος

Απλός συμπερασμός τύπων

- Οι περισσότερες γλώσσες υλοποιούν κάποιες απλές μορφές συμπερασμού τύπων
- Οι σταθερές έχουν τύπο που καθορίζεται στατικά
  Π.χ. στη Java: Η σταθερά `10` έχει τύπο `int`, η `10L` έχει τύπο `long`
- Οι εκφράσεις με τη σειρά τους μπορεί να έχουν στατικά καθοριζόμενους τύπους, που συμπεραίνονται εύκολα από τους τελεστές και τους τύπους των ορισμάτων τους
  Π.χ. στη Java: εάν ο `a` είναι `double`, τότε η έκφραση `a*0` έχει τύπο `double` (`0.0`)
- Η γλώσσα ML πηγαίνει την παραπάνω ιδέα στα άκρα...

Έλεγχος τύπων: Στατικός και δυναμικός

Έλεγχος χρόνου μετάφρασης έναντι εκτέλεσης

- Οι γλώσσες Lisp, Prolog, Python, Ruby, … ελέγχουν τους τύπους στο χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος
  Π.χ. στη Lisp σε μια έκφραση `(car x)` ελέγχουμε εάν το `x` είναι λίστα πριν πάρουμε το `car` του `x`
- Οι γλώσσες ML και Haskell ελέγχουν τους τύπους κατά το χρόνο μετάφρασης του προγράμματος
  Π.χ. σε μια κλήση `f(x)` πρέπει να έχουμε `f: A → B` και `x ∈ A`
- Ένα από τα κύρια “πάρε-δώσε” του σχεδιασμού γλωσσών
  - Και οι δύο τρόποι αποφεύγουν τα σφάλματα
  - Ο δυναμικός έλεγχος καθυστερεί την εκτέλεση
  - Ο στατικός έλεγχος περιορίζει την εκφραστικότητα
    - Λίστες σε Lisp: τα στοιχεία μπορούν να έχουν διαφορετικούς τύπους
    - Λίστες σε ML: όλα τα στοιχεία πρέπει να έχουν τον ίδιο τύπο

Στατικός έλεγχος τύπων

- Στο στατικό έλεγχο τύπων, ο τύπος της κάθε έκφρασης καθορίζεται πριν την εκτέλεση του προγράμματος
- Ο μεταγλωττιστής τυπώνει μηνύματα λάθους όταν οι τύποι που εξάγονται στατικά τον κάνουν να καταλάβει κάποια ασυνέπεια ή ασυμφωνία στη χρήση των τύπων
  - Όσον αφορά σε τελεστές: `1 + "abc"`
  - Όσον αφορά σε συναρτήσεις: `round("abc")`
  - Όσον αφορά σε εντολές της γλώσσας: `if "abc" then …`
- Πολλές μοντέρνες γλώσσες προγραμματισμού έχουν στατικά (ή ως επί το πλείστον στατικά) συστήματα τύπων

Δυναμικός έλεγχος τύπων (dynamic typing)

- Σε πολλές άλλες γλώσσες (π.χ. Lisp, Scheme, Smalltalk, Erlang, Prolog, Python, Ruby, …), τα προγράμματα δεν ελέγχονται στατικά για πιθανά σφάλματα τύπων
- Ελέγχονται όμως **δυναμικά** για τέτοιου είδους σφάλματα
- Με άλλα λόγια, κατά το χρόνο εκτέλεσης, η υλοποίηση της γλώσσας ελέγχει ότι τα ορίσματα των τελεστών είναι τύπων οι οποίοι είναι συμβατοί με τους τελεστές

Παράδειγμα: Lisp

- Μια συνάρτηση σε Lisp που προσθέτει δύο αριθμούς:

```
(defun f (a b) (+ a b))
```

- Θα εγείρει εξαίρεση εάν ο **a** ή ο **b** δεν είναι αριθμοί
- Κλήσεις με ορίσματα λάθος τύπου, π.χ. `(f nil nil)`, δεν υποδεικνύονται κατά το χρόνο μεταγλώττισης
- Στο δυναμικό έλεγχο τύπων τα παραπάνω λάθη πιάνονται κατά το χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος
  - Κατά κάποιο τρόπο, στις γλώσσες με δυναμικό έλεγχο τύπων οι τύποι χρησιμοποιούνται παραπάνω από αυτές με στατικό έλεγχο, διότι οι τύποι πρέπει να ελεγχθούν κατά το χρόνο εκτέλεσης
  - Αυτό σημαίνει ότι η υλοποίηση της γλώσσας πρέπει να διατηρήσει πληροφορία για τον τύπο της κάθε μεταβλητής

Εκφραστικότητα

- Στη Lisp, είναι δυνατό να γράψουμε τη συνάρτηση

```
(lambda (x) (cond ((less x 10) x) (T (car x))))
```

Κάποιες χρήσεις της συνάρτησης μπορεί να οδηγήσουν σε σφάλματα τύπων, κάποιες άλλες όμως όχι

- Ο στατικός έλεγχος τύπων είναι πάντα συντηρητικός

```
if (big-hairy-boolean-expression)
    then ((lambda (x) … )   5)
    else ((lambda (x) … ) nil)
```

Δε μπορούμε να αποφασίσουμε κατά το χρόνο μεταγλώττισης εάν θα υπάρξει κάποιο σφάλμα τύπου

Στατικός έλεγχος τύπων έναντι δυναμικού

- Δεν είναι όλα άσπρα ή μαύρα…
- Γλώσσες με στατικό έλεγχο τύπων πολλές φορές χρησιμοποιούν κάποιο δυναμικό έλεγχο
  - Π.χ. λόγω της ύπαρξης υποτύπων (subtyping), ειδικά στις αντικειμενοστρεφείς γλώσσες προγραμματισμού
  - Π.χ. λόγω υπερφορτωμένων τελεστών
- Γλώσσες με δυναμικό έλεγχο τύπων πολλές φορές χρησιμοποιούν κάποιο στατικό έλεγχο
  - Τύποι για (μέρη) προγραμμάτων σε Lisp, μπορούν να εξαχθούν με χρήση δηλώσεων τύπων και τοπικού συμπερασμού τύπων
  - Πολλοί μεταγλωττιστές της Lisp χρησιμοποιούν την πληροφορία αυτή για την αποφυγή ελέγχων τύπων κατά το χρόνο εκτέλεσης και για την παραγωγή καλύτερου (ταχύτερου) κώδικα μηχανής

Ρητοί έλεγχοι τύπων κατά το χρόνο εκτέλεσης

- Κάποιες γλώσσες επιτρέπουν στον προγραμματιστή να ελέγξει τύπους κατά την εκτέλεση του προγράμματος:
  - Π.χ. η Java επιτρέπει τον έλεγχο του τύπου κάποιου αντικειμένου με χρήση του τελεστή **`instanceof`**
  - Π.χ. η Modula-3 επιτρέπει τη διακλάδωση (branch) με βάση τον τύπο κάποιου αντικειμένου με χρήση της έκφρασης **`typecase`**
- Τα παραπάνω απαιτούν ότι η πληροφορία για τύπους είναι παρούσα κατά το χρόνο εκτέλεσης, παρόλο που η γλώσσα έχει ως επί το πλείστον στατικό σύστημα τύπων

Αυστηρά και ασθενή συστήματα τύπων

- Η επιδίωξη του ελέγχου των τύπων είναι η αποφυγή της εφαρμογής τελεστών σε ορίσματα των οποίων ο τύπος δεν έχει νόημα για το συγκεκριμένο τελεστή
- Σε κάποιες γλώσσες, όπως στην ML και στη Java, ο έλεγχος τύπων είναι αρκετά εξονυχιστικός και εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό το παραπάνω–λέμε ότι η γλώσσα έχει αυστηρό σύστημα τύπων (strong typing)
- Σε πολλές γλώσσες (όπως π.χ. η C) αυτό δε συμβαίνει: το σύστημα τύπων είναι ασθενές (weak) και διάτρητο
  - Αυτό παρέχει ευελιξία στον προγραμματιστή
  - Αλλά δεν προσφέρει αρκετή ασφάλεια

Σχετική ασφάλεια τύπων των γλωσσών

Μη ασφαλείς: Η οικογένεια BCPL συμπεριλαμβανομένης της C και της C++
- "Σουλουπώματα" τύπων (type casts), αριθμητική με δείκτες, …

Περίπου ασφαλείς: Η οικογένεια της Algol, Pascal, Ada
- Ξεκρέμαστοι δείκτες
  - Δέσμευσε ένα δείκτη p σε έναν ακέραιο, αποδέσμευσε τη μνήμη που δείχνει ο p, και στη συνέχεια χρησιμοποίησε την τιμή που δείχνει ο p
  - Καμία γλώσσα με ρητή αποδέσμευση μνήμης δεν προσφέρει πλήρη ασφάλεια τύπων!

Ασφαλείς: Η οικογένεια της Lisp, η ML, η Smalltalk, και οι Java, C#
- Lisp, Smalltalk, Prolog, Erlang, Ruby: γλώσσες δυναμικών τύπων
- ML, Haskell, Java, C#: γλώσσες στατικών τύπων (statically typed)

Εργαλεία στατικής ανάλυσης προγραμμάτων

- Τομέας με αρκετή ερευνητική δραστηριότητα πρόσφατα
  - Lint, Purify, Coverity, PreFix, PreFast, Dialyzer, Valgrind, …
- Δύο κατηγορίες ανάλυσης
  - Συντηρητικές (= Sound for correctness)
    - Εάν η ανάλυση πει ότι το πρόγραμμα είναι σωστό, τότε είναι
    - Εάν η ανάλυση πει "όχι σωστό", μπορεί να μην υπάρχουν λάθη
  - Μη συντηρητικές (= Sound for errors)
    - Εάν η ανάλυση πει "σωστό", το πρόγραμμα μπορεί να είναι εσφαλμένο
    - Εάν η ανάλυση βρει κάποιο πρόβλημα, τότε όντως υπάρχει κάποια "ανωμαλία " στο πρόγραμμα
  - Μια καλύτερη κατηγοριοποίηση, κατά τη γνώμη μου:
    - Συντηρητικά εργαλεία χρειάζονται για απόδειξη ορθότητας
    - Μη συντηρητικά εργαλεία για εύρεση σφαλμάτων (bug finding)

Θέματα ισοδυναμίας τύπων

Ισοδυναμία τύπων

- Πότε δύο τύποι θεωρούνται ίδιοι;
- Σημαντική ερώτηση τόσο για το στατικό όσο και για το δυναμικό έλεγχο τύπων
- Για παράδειγμα, η γλώσσα μπορεί να επιτρέπει μια ανάθεση **a := b** μόνο εάν η μεταβλητή **b** έχει "τον ίδιο" τύπο με την **a**
- Διαφορετικές γλώσσες ορίζουν την ισοδυναμία των τύπων με διαφορετικούς τρόπους

Ισοδυναμίες τύπων

- Ισοδυναμία ονόματος (name equivalence): δύο τύποι είναι ίδιοι αν και μόνο αν έχουν το ίδιο όνομα
- Ισοδυναμία δομής (structural equivalence): δύο τύποι είναι ίδιοι αν και μόνο αν έχουν προκύψει από τους ίδιους πρωτόγονους τύπους με χρήση της ίδιας σειράς ίδιων κατασκευαστών τύπων

- (Οι παραπάνω, δεν είναι οι μόνοι τρόποι ορισμού της ισοδυναμίας αλλά είναι οι πιο εύκολοι να εξηγηθούν.)

Παράδειγμα ισοδυναμίας τύπων

```
type irpair1 = int * real;
type irpair2 = int * real;
fun f(x:irpair1) = #1 x;
```

- Τι θα συμβεί εάν περάσουμε ως όρισμα στην **f** μια παράμετρο τύπου **irpair2**;
  - Η ισοδυναμία ονόματος δεν το επιτρέπει: **irpair2** και **irpair1** είναι διαφορετικά ονόματα
  - Η ισοδυναμία δομής το επιτρέπει: οι τύποι κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο
- Στην ML επιτρέπεται: η γλώσσα υποστηρίζει ισοδυναμία δομής

Παράδειγμα ισοδυναμίας τύπων

```
var
  Counts1: array['a'..'z'] of Integer;
  Counts2: array['a'..'z'] of Integer;
```

- Τι θα συμβεί εάν προσπαθήσουμε να αναθέσουμε τον πίνακα **`Counts1`** στον πίνακα **`Counts2`**;
  - Η ισοδυναμία ονόματος δεν το επιτρέπει: οι τύποι των πινάκων **`Counts1`** και **`Counts2`** δεν έχουν τα ίδια ονόματα
  - Η ισοδυναμία δομής το επιτρέπει: οι τύποι κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο
- Οι περισσότερες υλοποιήσεις της Pascal δεν επιτρέπουν την παραπάνω ανάθεση

Συμπερασματικά

- Οι τύποι παίζουν σημαντικό ρόλο σε πολλές γλώσσες προγραμματισμού
  - Για την οργάνωση και την τεκμηρίωση ενός προγράμματος
  - Για την αποφυγή σφαλμάτων λογισμικού
  - Για την παροχή πληροφορίας στο μεταγλωττιστή της γλώσσας

Βασική ερώτηση για τα συστήματα τύπων

- Πόσο μέρος της αναπαράστασης κάνει το σύστημα τύπων εμφανές στον προγραμματιστή;
  - Μερικοί προγραμματιστές προτιμούν γλώσσες σαν τη C, διότι
    - Προσφέρουν τη δυνατότητα για απ' ευθείας προσπέλαση στη λεπτομερή αναπαράσταση των τύπων όταν για κάποιο λόγο αυτό είναι επιθυμητό
  - Μερικοί άλλοι προτιμούν γλώσσες σαν την ML, διότι
    - Κρύβουν τις λεπτομέρειες της υλοποίησης των τύπων και
    - Προσφέρουν "καθαρούς" τρόπους χρησιμοποίησης δεδομένων που επιτρέπουν την ανάπτυξη προγραμμάτων χωρίς σφάλματα κάποιου είδους, και διευκολύνουν την απόδειξη της ορθότητάς τους