

Κεφάλαιο 10 :

Συναρτησιακές Γλώσσες

Αρχές Γλωσσών Προγραμματισμού και Μεταφραστών

Εισαγωγή

- Οι διαφορές των ΓΠ στις *συντακτικές δομές* τους, είναι πολύ μεγαλύτερες από τις διαφορές τους στις *εννοιολογικές δομές*. Π.χ. το στοιχείο του πίνακα A στη θέση 1, γράφεται:
 - A(1)** στις FORTRAN, COBOL, PL/1, Ada
 - A[1]** στις Pascal, C
 - A<1>** στη SNOBOL
- Στόχος συντακτικού:

Κανόνες επικοινωνίας της πληροφορίας μεταξύ προγραμματιστή και μεταφραστή/διερμηνέα.

Ιστορικά Στοιχεία

- Τα μοντέλα του προστακτικού και του συναρτησιακού προγραμματισμού προέκυψαν από το έργο των Alan Turing, Alonzo Church, Stephen Kleene, Emil Post, κλπ. ~δεκαετία 1930
 - διαφορετικοί φορμαλισμοί για την έννοια του αλγορίθμου ή της αποτελεσματικής διαδικασίας, βασισμένοι στα αυτόματα, τη συμβολική επεξεργασία, τους αναδρομικούς ορισμούς συναρτήσεων, και τη συνδυαστική
- Τα αποτελέσματα αυτά οδήγησαν τον Church στην εικασία ότι *οποιοδήποτε* διαισθητικά αποδεκτό μοντέλο υπολογισμών θα είναι και αυτό εξίσου ισχυρό
 - η εικασία αυτή είναι γνωστή ως *θέση του Church*

Ιστορικά Στοιχεία

- Το μοντέλο υπολογισμών του Turing ήταν η *μηχανή Turing*, ένα είδος αυτόματου στοίβας που χρησιμοποιούσε μια «ταινία» με απεριόριστο πλήθος αποθηκευτικών θέσεων
 - η μηχανή Turing κάνει υπολογισμούς με προστακτικό τρόπο, αλλάζοντας τις τιμές θέσεων στην ταινία της – όπως τα προστακτικά προγράμματα υψηλού επιπέδου εκτελούν υπολογισμούς αλλάζοντας τις τιμές των μεταβλητών

Ιστορικά Στοιχεία

- Το μοντέλο υπολογισμού του Church ονομάζεται *λογισμός λάμβδα*
 - βασίζεται στην έννοια των παραμετρικών εκφράσεων (κάθε παράμετρος εισάγεται με μια εμφάνιση του γράμματος λ – από όπου και το όνομα της σημειογραφίας)
 - ο λογισμός λάμβδα ήταν η έμπνευση για το συναρτησιακό προγραμματισμό
 - ο υπολογισμός γίνεται με την αντικατάσταση παραμέτρων σε εκφράσεις, ακριβώς όπως σε ένα συναρτησιακό πρόγραμμα υψηλού επιπέδου ο υπολογισμός γίνεται με τη μεταβίβαση ορισμάτων σε συναρτήσεις

Ιστορικά Στοιχεία

- Οι μαθηματικοί διατύπωσαν τη διάκριση μεταξύ
 - μιας *κατασκευαστικής* απόδειξης (που δείχνει πώς λαμβάνεται ένα μαθηματικό αντικείμενο με κάποια επιθυμητή ιδιότητα)
 - μιας *μη κατασκευαστικής* απόδειξης (που απλώς δείχνει ότι ένα τέτοιο αντικείμενο πρέπει να υπάρχει, π.χ. με απαγωγή σε άτοπο)
- Ο λογικός προγραμματισμός είναι στενά συνδεδεμένος με την έννοια της κατασκευαστικής απόδειξης, αλλά σε ένα πιο αφηρημένο επίπεδο:
 - ο προγραμματιστής στο λογικό μοντέλο προγραμματισμού, γράφει ένα σύνολο *αξιωμάτων* που επιτρέπει στον *υπολογιστή* να ανακαλύψει μια κατασκευαστική απόδειξη για κάθε συγκεκριμένο σύνολο εισόδων

Έννοιες Συναρτησιακού Προγραμματισμού

- Οι γλώσσες συναρτησιακού προγραμματισμού όπως η Lisp, η Scheme, η FP, η ML, η Miranda, και η Haskell είναι μια προσπάθεια να πραγματοποιηθεί ο λογισμός λάμβδα του Church σε μια πρακτική μορφή σαν γλώσσα προγραμματισμού
- η βασική ιδέα: τα πάντα γίνονται με τη σύνθεση συναρτήσεων
 - δεν υπάρχει μεταβλητή κατάσταση
 - δεν υπάρχουν παρενέργειες

Έννοιες Συναρτησιακού Προγραμματισμού

- Απαραίτητες δυνατότητες, αρκετές από τις οποίες λείπουν από κάποιες προστακτικές γλώσσες
 - συναρτήσεις πρώτης κατηγορίας και υψηλότερης τάξης
 - ισχυρός πολυμορφισμός
 - ισχυρές λειτουργίες για λίστες
 - αναδρομή
 - δομημένα αποτελέσματα συναρτήσεων
 - πραγματικά γενικές σταθερές σύνθετου τύπου
 - συλλογή σκουπιδιών

Έννοιες Συναρτησιακού Προγραμματισμού

- Πώς κάνουμε κάτι σε μια συναρτησιακή γλώσσα;
 - Η αναδρομή (ειδικά η αναδρομή ουράς) αντικαθιστά την επανάληψη
 - Γενικά, μπορείτε να έχετε το ίδιο αποτέλεσμα με μια σειρά αναθέσεων

```
x := 0      ...  
x := expr1  ...  
x := expr2  ...
```

με την $f3 (f2 (f1 (0)))$, όπου κάθε f περιμένει την τιμή του x σαν παράμετρο, η $f1$ επιστρέφει $expr1$, και η $f2$ επιστρέφει $expr2$

Έννοιες Συναρτησιακού Προγραμματισμού

- Η αναδρομή αντικαθιστά με επιτυχία ακόμα και τους βρόχους

```
x := 0; i := 1; j := 100;
while i < j do
    x := x + i*j; i := i + 1;
    j := j - 1
end while
return x
```

γίνεται $f(0, 1, 100)$, όπου

```
f(x, i, j) == if i < j then
f (x+i*j, i+1, j-1) else x
```

Έννοιες Συναρτησιακού Προγραμματισμού

- Το να θεωρούμε όμως ότι η αναδρομή είναι μια απευθείας, μηχανική αντικατάσταση της επανάληψης είναι ο λάθος τρόπος να βλέπουμε τα πράγματα
 - Πρέπει να συνηθίσουμε να σκεπτόμαστε σε αναδρομικό στυλ
- Πιο σημαντική έννοια και από την αναδρομή είναι οι **συναρτήσεις υψηλότερης τάξης**
 - Παίρνουν μια συνάρτηση ως παράμετρο, ή επιστρέφουν μια συνάρτηση ως αποτέλεσμα
 - Χρήσιμες στην κατασκευή πραγμάτων

Έννοιες Συναρτησιακού Προγραμματισμού

- Η Lisp έχει επίσης τα εξής (δεν τα έχουν όλες οι συναρτησιακές γλώσσες)
 - ομοεικονική
 - αυτό-ορισμός
 - ανάγνωση-αποτίμηση-εκτύπωση
- Εκδόσεις της LISP
 - Αμιγής Lisp (η πρώτη Lisp)
 - Interlisp, MacLisp, Emacs Lisp
 - Common Lisp
 - Scheme

Έννοιες Συναρτησιακού Προγραμματισμού

- Η αμιγής Lisp είναι αμιγώς συναρτησιακή· όλες οι άλλες Lisp έχουν προστακτικά χαρακτηριστικά
- Όλες οι πρώτες Lisp έχουν δυναμική εμφάνιση
 - Δεν γνωρίζουμε αν αυτό ήταν ηθελημένο ή συνέβη κατά λάθος
- Η Scheme και η Common Lisp έχουν στατικές εμφάνισεις
 - Η Common Lisp επιτρέπει τη δυναμική εμφάνιση για ρητά δηλωμένες ειδικές συναρτήσεις
 - Η Common Lisp είναι τώρα Η πρότυπη Lisp
 - Πολύ μεγάλη· πολύπλοκη (η Ada του συναρτησιακού προγραμματισμού)

Έννοιες Συναρτησιακού Προγραμματισμού

- Η Scheme είναι μια ιδιαίτερα κομψή Lisp
- Άλλες συναρτησιακές γλώσσες
 - ML
 - Miranda
 - Haskell
 - FP
- Η Haskell είναι η κυρίαρχη γλώσσα στην έρευνα στο συναρτησιακό προγραμματισμό

Μια Ανασκόπηση/Σύνοψη της Scheme

- Όπως αναφέρθηκε, η Scheme είναι μια ιδιαίτερα κομψή Lisp
 - Ο διερμηνέας εκτελεί έναν βρόχο ανάγνωσης-αποτίμησης-εκτύπωσης
 - Ό,τι εισάγεται στο διερμηνέα αποτιμάται (αναδρομικά) μόνο μια φορά
 - Αν κάτι είναι μέσα σε παρενθέσεις, είναι κλήση συνάρτησης (εκτός αν είναι σε παράθεση)
 - Οι παρενθέσεις ΔΕΝ υπάρχουν μόνο για ομοαδοποίηση, όπως στις γλώσσες της οικογένειας της Algol
 - Η προσθήκη ενός επιπέδου παρενθέσεων αλλάζει τη σημασία
 - $(+ 3 4) \Rightarrow 7$
 - $((+ 3 4)) \Rightarrow \text{error}$
- (το βέλος \Rightarrow σημαίνει «αποτιμάται σε»)

Μια Ανασκόπηση/Σύνοψη της Scheme

■ Scheme:

- Λογικές τιμές #t και #f
- Αριθμοί
- Εκφράσεις λάμβδα
- Παράθεση

`(+ 3 4) ⇒ 7`

`(quote (+ 3 4)) ⇒ (+ 3 4)`

`'(+ 3 4) ⇒ (+ 3 4)`

- Μηχανισμοί για τη δημιουργία νέων εμβλειών

```
(let ((square (lambda (x) (* x x))) (plus +))
```

```
(sqrt (plus (square a) (square b))))
```

```
let*
```

```
letrec
```


Μια Ανασκόπηση/Σύνοψη της Scheme

■ Scheme:

□ Εκφράσεις συνθήκης

```
(if (< 2 3) 4 5) ⇒ 4
```

```
(cond
```

```
  ((< 3 2) 1)
```

```
  ((< 4 3) 2)
```

```
  (else 3) ) ⇒ 3
```

□ Προστακτικές δυνατότητες

- αναθέσεις
- ακολουθιακή εκτέλεση (begin)
- επανάληψη
- είσοδος-έξοδος (read, display)

Μια Ανασκόπηση/Σύνοψη της Scheme

- Πρότυπες συναρτήσεις της Scheme (η λίστα δεν είναι πλήρης):
 - αριθμητικές
 - λογικοί τελεστές
 - ισοδυναμία
 - τελεστές λιστών
 - symbol?
 - number?
 - complex?
 - real?
 - rational?
 - integer?

Scheme Παράδειγμα - Προσομοίωση ΝΠΑ

- Θα καλέσουμε το πρόγραμμα καλώντας τη συνάρτηση 'simulate', δίνοντας της την περιγραφή ενός ΝΠΑ και μια συμβολοσειρά εισόδου
 - Η περιγραφή του αυτομάτου είναι μια λίστα τριών πραγμάτων:
 - αρχική κατάσταση
 - συνάρτηση μετάβασης
 - το σύνολο των τελικών καταστάσεων
 - Η συνάρτηση μετάβασης είναι μια λίστα από ζεύγη
 - το πρώτο στοιχείο κάθε ζεύγους είναι ένα ζεύγος, του οποίου το πρώτο στοιχείο είναι μια κατάσταση και το δεύτερο στοιχείο είναι το σύμβολο εισόδου
 - αν η τρέχουσα κατάσταση ταιριάζει με το επόμενο σύμβολο εισόδου, τότε το πεπερασμένο αυτόματο μεταβαίνει στην κατάσταση που αναφέρεται στο δεύτερο στοιχείο του ζεύγους

Scheme Παράδειγμα - Προσομοίωση ΝΠΑ

```
(define simulate
  (lambda (dfa input)
    (cons (car dfa)                ; αρχική κατάσταση
          (if (null? input)
              (if (infinal? dfa) '(accept) '(reject))
              (simulate (move dfa (car input)) (cdr input)))))))

(define infinal?
  (lambda (dfa)
    (memq (car dfa) (caddr dfa))))

(define move
  (lambda (dfa symbol)
    (let ((curstate (car dfa)) (trans (cadr dfa)) (finals (caddr dfa)))
      (list
        (if (eq? curstate 'error)
            'error
            (let ((pair (assoc (list curstate symbol) trans)))
              (if pair (cadr pair) 'error)))
        trans
        finals))))
```

Εικόνα 10.1 Πρόγραμμα Scheme που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός ΝΠΑ. Οι συναρτήσεις **cadr** και **caddr** ορίζονται ως **(lambda (x) (car (cdr x)))** και **(lambda (x) (car (cdr (cdr x))))**, αντίστοιχα. Η Scheme διαθέτει πλούσια συλλογή τέτοιων συντομεύσεων.

Επιστροφή στη Σειρά Αποτίμησης

- Εφαρμοστική σειρά
 - την έχετε συνηθίσει από τις προστακτικές γλώσσες
 - συνήθως γρηγορότερη
- Κανονική σειρά
 - όπως η κλήση κατ' όνομα: δεν αποτιμά την παράμετρο μέχρι να τη χρειαστεί
 - μερικές φορές πιο γρήγορη
 - αν ο υπολογισμός μπορεί γενικά να τερματιστεί, η αποτίμηση θα τελειώσει (θεώρημα Church-Rosser)

Επιστροφή στη Σειρά Αποτίμησης

■ Στη Scheme

- οι συναρτήσεις χρησιμοποιούν εφαρμοστική σειρά που ορίζεται με εκφράσεις λάμβδα
 - οι ειδικές μορφές (γνωστές και ως μακροεντολές) χρησιμοποιούν κανονική σειρά που ορίζεται με συντακτικούς κανόνες
- Μια *αυστηρή* γλώσσα απαιτεί όλα τα ορίσματά της να είναι καλά ορισμένα, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί εφαρμοστική σειρά
- Μια *μη αυστηρή* γλώσσα δεν απαιτεί όλα τα ορίσματά της να είναι καλά ορισμένα· χρειάζεται αποτίμηση κανονικής σειράς

Επιστροφή στη Σειρά Αποτίμησης

- Η οκνηρή αποτίμηση προσφέρει τα πλεονεκτήματα και των δυο κόσμων
- Αλλά δεν είναι καλή όταν υπάρχουν παρενέργειες.
 - χρήση των `delay` και `force` στη Scheme
 - η `delay` δημιουργεί μια "υπόσχεση"

Συναρτήσεις Υψηλής Τάξης

- Συναρτήσεις υψηλότερης τάξης
 - Δέχονται ως όρισμα μια συνάρτηση, ή επιστρέφουν ως αποτέλεσμα μια συνάρτηση
 - Πολύ χρήσιμες για την δημιουργία πραγμάτων
 - Currying (το όνομα προέρχεται από τον Haskell Curry, από τον ίδιο προέρχεται και το όνομα της Haskell)
 - Για λεπτομέρειες, δείτε το λογισμό λάμβδα σε επόμενες διαφάνειες
 - Η ML, η Miranda, και η Haskell διευκολύνουν ιδιαίτερα τον ορισμό συναρτήσεων με currying

Θεωρητικές Βάσεις : Λογισμός - λ

■ Λογισμός λάμβδα:

- Μια σημειογραφία/μοντέλο υπολογισμών που βασίζεται στον αμιγή συντακτικό χειρισμό συμβόλων, τα πάντα είναι συναρτήσεις
- Αναπτύχθηκε από τον Alonzo Church στη δεκαετία του 1930 σαν μοντέλο υπολογισιμότητας
- Ο Church άνηκε σε ένα πλήθος ανθρώπων μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται οι Chomsky, Turing, Kleene, και Rosser

Θεωρητικές Βάσεις : Λογισμός - λ

- Μπορούμε να ορίσουμε πράγματα όπως οι ακέραιοι με βάση μια διακεκριμένη συνάρτηση (όπως η ταυτοτική) που να αναπαριστά το μηδέν, και μια συνάρτηση του «επόμενου» που μας δίνει όλους τους υπόλοιπους αριθμούς
- Γίνεται εύκολο να οριστούν οι αριθμητικοί τελεστές στη σημειογραφία
 - Στην πράξη αυτό είναι κουραστικό
 - θα υποθέσουμε την ύπαρξη της αριθμητικής και διακεκριμένων σταθερών συναρτήσεων για τους αριθμούς

Θεωρητικές Βάσεις : Λογισμός - λ

■ Παράδειγμα εκφράσεων λάμβδα

<code>id</code>	<code>λx. x</code>
<code>const</code>	<code>λx. 2</code>
<code>plus</code>	<code>λx. λy. x + y</code>
<code>square</code>	<code>λx. x * x</code>
<code>hypot</code>	<code>λx. λy. sqrt</code>
	<code>(plus (square x) (square y))</code>

Θεωρητικές Βάσεις : Λογισμός - λ

- Αναδρομικά, μια έκφραση λάμβδα είναι
 - (1) ένα όνομα
 - (2) μια αφαίρεση που αποτελείται από ένα λαμβδα, ένα όνομα, μια τελεία, και μια έκφραση λάμβδα
 - (3) μια εφαρμογή που αποτελείται από δυο διπλανές λάμβδα εκφράσεις (η παράθεση σημαίνει εφαρμογή συνάρτησης), ή
 - (4) μια έκφραση λάμβδα σε παρενθέσεις

Θεωρητικές Βάσεις : Λογισμός - λ

- Συνήθως η εφαρμογή προσεταιρίζεται από αριστερά προς τα δεξιά, επομένως η $f A B$ είναι $(f A) B$, και όχι $f (A B)$
- Επίσης, η εφαρμογή έχει υψηλότερη προτεραιότητα από την αφαίρεση, επομένως η $\lambda x . A B$ είναι $\lambda x . (A B)$, και όχι $(\lambda x . A) B$ – π.χ., ML
- Οι παρενθέσεις χρησιμοποιούνται για σαφήνεια, ή για την παράβαση των κανόνων: εξ ορισμού τις χρησιμοποιούμε σε κάθε αφαίρεση που χρησιμοποιείται ως συνάρτηση ή παράμετρος:

$(\lambda f . f 2) (\lambda x . \text{plus } x x)$

ή σε κάθε εφαρμογή που χρησιμοποιείται ως παράμετρος:

`double (minus 5 2)`

Θεωρητικές Βάσεις : Λογισμός - λ

- Αυτοί οι κανόνες σημαίνουν ότι η εμβέλεια της τελείας φτάνει δεξιά μέχρι την πρώτη δεξιά παρένθεση που δεν της αντιστοιχεί αριστερή παρένθεση, ή μέχρι το τέλος της έκφρασης αν δεν υπάρχει τέτοια παρένθεση
 - Στην (λx. λy. λz.e) a b c, η αρχική συνάρτηση δέχεται μια παράμετρο και επιστρέφει μια συνάρτηση (μιας παραμέτρου) που επιστρέφει μια συνάρτηση (μιας παραμέτρου)
 - Για την αναγωγή της έκφρασης, αντικαθιστάτε την a σε κάθε x στη λy. λz.e, στη συνέχεια αντικαθιστάτε την b σε κάθε y στην υπόλοιπη έκφραση, και την c σε κάθε z σε ό,τι μένει στο τέλος

Θεωρητικές Βάσεις : Λογισμός - λ

- Παράδειγμα:

$$\begin{aligned} & (\lambda x. \lambda y. x + y) \ 3 \ 4 \\ & \lambda y. (3 + y) \ 4 \\ & (3 + 4) \\ & 7 \end{aligned}$$

- Ελεύθερες και δεσμευμένες μεταβλητές: μια μεταβλητή είναι δεσμευμένη αν εισάγεται από ένα λάμβδα

- Για παράδειγμα, στη $\lambda x. \lambda y. (* x y)$ έχουμε δυο ένθετες εκφράσεις λάμβδα

- η x είναι ελεύθερη στην εσωτερική $(\lambda y. (* x y))$, αλλά δεσμευμένη στην εξωτερική

Θεωρητικές Βάσεις : Λογισμός - λ

- Η αποτίμηση των εκφράσεων λάμβδα γίνεται μέσω

- (1) αντικατάστασης των παραμέτρων (*βήτα αναγωγή*)
 $(\lambda x. \text{times } x \ x) \ y \Rightarrow \text{times } y \ y$
- (2) μετονομασίας των μεταβλητών (*άλφα μετατροπή*)
(συχνά για να αποφύγουμε τις συγκρούσεις ονομάτων)
 $(\lambda x. \text{times } x \ x) \ y \ == (\lambda z. \text{times } z \ z) \ y$
- (3) απλοποίηση «εκτός σειράς» (*ήτα αναγωγή*)
 $(\lambda x. f \ x) \Rightarrow f$
 - Ο τελευταίος κανόνας είναι δυσνόητος· ΔΕΝ είναι ο ίδιος με τη βήτα αναγωγή

Απόψεις περί Συναρτ. Προγραμματισμού

- Πλεονεκτήματα των συναρτησιακών γλωσσών
 - η έλλειψη παρενεργειών διευκολύνει την κατανόηση των προγραμμάτων
 - η έλλειψη ρητής σειράς αποτίμησης (σε μερικές γλώσσες) προσφέρει την πιθανότητα παράλληλης αποτίμησης (π.χ. MultiLisp)
 - η έλλειψη παρενεργειών και ρητής σειράς αποτίμησης απλοποιούν κάποια πράγματα για το μεταγλωττιστή
 - τα προγράμματα συχνά είναι εκπληκτικά μικρά
 - η γλώσσα μπορεί να είναι εξαιρετικά μικρή αλλά ισχυρή

Απόψεις περί Συναρτ. Προγραμματισμού

■ Προβλήματα

- δύσκολο (αλλά όχι αδύνατο!) να υλοποιηθούν αποτελεσματικά σε υπολογιστές von Neumann
 - πολλές αντιγραφές δεδομένων μέσω παραμέτρων
 - (φαινομενική) ανάγκη να δημιουργείται ένας νέος πίνακας όταν πρέπει να αλλάξει ένα στοιχείο του
 - συχνή χρήση δεικτών (προβλήματα χώρου/χρόνου και τοπικότητας)
 - συχνές κλήσεις διαδικασιών
 - η αναδρομή χρησιμοποιεί σημαντικό χώρο
 - απαιτεί συλλογή σκουπιδιών
 - απαιτεί ένα διαφορετικό τρόπο σκέψης από τον προγραμματιστή
 - δύσκολο να ενσωματωθεί η είσοδος-έξοδος στο αμιγώς συναρτησιακό μοντέλο