Τελικός κώδικας (i)

- Από θεωρητικής άποψης, το πρόβλημα της κατασκευής βέλτιστου τελικού κώδικα δεν έχει λύση (undecidable)
- Μορφές τελικού κώδικα:
  - Γλώσσα μηχανής σε απόλυτη μορφή (absolute)
  - Γλώσσα μηχανής σε επανατοποθετήσιμη και διασυνδέσιμη μορφή (relocatable, linkable)
  - Συμβολική γλώσσα (assembly)
  - Άλλη γλώσσα χαμηλού επιπέδου

Τελικός κώδικας (ii)

- Επιμέρους προβλήματα:
  - Επιλογή εντολών
    ⇒ Πώς μεταφράζεται κάθε εντολή του ενδιάμεσου κώδικα
    ⇒ Πώς μεταφράζονται ακολουθίες τέτοιων εντολών
  - Διαχείριση της μνήμης στο χρόνο εκτέλεσης
    ⇒ Πού αποθηκεύονται τα δεδομένα
    ⇒ Πώς γίνεται η επικοινωνία ανάμεσα στις δομικές μονάδες

Τελικός υπολογιστής (i)

- Χαρακτηριστικά:
  - Επεξεργαστής: Intel 8086
  - Λειτουργικό σύστημα: MS-DOS
  - Μοντέλο μνήμης: COM / tiny
    ⇒ Συνολική μνήμη $\leq 64\,\mathrm{K}$
    ⇒ Οργάνωση σε ένα segment
    ⇒ Αρχική διεύθυνση του προγράμματος η $100h$
  - Συμβολική γλώσσα: συμβατή με το συμβολομεταφραστή MASM (Microsoft macro assembler)

Τελικός υπολογιστής (ii)

- Καταχωρητές, μεγέθους 16 bit
  - Γενικής φύσης: `ax`, `bx`, `cx`, `dx`
    ⇒ σε ζεύγη των 8 bit: `ah`, `al`, κ.λπ.
  - Καταχωρητές δείκτες: `sp` (δείκτης στοίβας) και `bp` (δείκτης βάσης)
  - Καταχωρητές αναφοράς: `si` και `di`
  - Καταχωρητές τμημάτων: `cs` (code), `ds` (data), `ss` (stack) και `es` (extra)
  - Ειδικοί καταχωρητές: `ip` (instruction pointer) και καταχωρητής σημαιών (flags)

Τελικός υπολογιστής (iii)

- Διευθύνσεις:

$$address = segment * 16 + offset$$

- Μορφή εντολής:

$$[\ label\ ]\quad opname\quad [\ operand_1\ [\ ,\ operand_2\ ]\ ]$$

Τελικός υπολογιστής (iv)

- Εντολές:
  - Μεταφοράς: `mov`, `lea`
  - Αριθμητικών πράξεων: `add`, `sub`, `neg`, `imul`, `idiv`, `cmp`, `cwd`
  - Λογικών πράξεων: `and`, `or`, `xor`, `not`, `test`
  - Άλματος: `jmp`, `jz`, `jnz`, `jl`, `jle`, `jg`, `jge`
  - Διαχείρισης στοίβας: `push`, `pop`
  - Υποπρογραμμάτων: `call`, `ret`
  - Πράξεων κινητής υποδιαστολής (x87 FPU)

Εντολές μεταφοράς

- `mov` *destination*, *source* (move)

```
mov ax, 42
mov ax, bx
mov ax, [1000h]
mov ax, [si]
mov ax, [si + 6]
mov ax, [bp + 6]
mov ax, [si + bp + 6]
```

- `lea` *destination*, *source* (load effective address)
- Καθορισμός μεγέθους δεδομένων

```
mov ax, word ptr [bp + 6]
mov al, byte ptr [bp + 6]
```


Αριθμητικές πράξεις

- `add` op_1, op_2 — $op_1 := op_1 + op_2$
- `sub` op_1, op_2 — $op_1 := op_1 - op_2$
- `neg` op — $op := -op$
- `imul` op — $(\mathtt{dx}, \mathtt{ax}) := \mathtt{ax} * op$
- `idiv` op — $\mathtt{ax} := (\mathtt{dx}, \mathtt{ax})$ **div** op; $\mathtt{dx} := (\mathtt{dx}, \mathtt{ax})$ **mod** op
- `cwd` — επέκταση προσήμου του ax στον dx
- `cmp` op_1, op_2 — σύγκρινε τα op_1 και op_2, ενημέρωσε τις σημαίες

Λογικές πράξεις

- `and` op_1, op_2 — $op_1 := op_1$ **and** op_2
- `or` op_1, op_2 — $op_1 := op_1$ **or** op_2
- `not` op — $op :=$ **not** op
- `xor` op_1, op_2 — $op_1 := op_1$ **xor** op_2
- `test` op_1, op_2 — op_1 **and** op_2, ενημέρωσε τις σημαίες

Εντολές άλματος

- `jmp` *address* — χωρίς συνθήκη
- `jz` *address* ή `je` *address* — μηδέν / ίσο
- `jnz` *address* ή `jne` *address* — όχι μηδέν / διάφορο
- `jl` *address* — μικρότερο
- `jle` *address* — μικρότερο ή ίσο
- `jg` *address* — μεγαλύτερο
- `jge` *address* — μεγαλύτερο ή ίσο

Εντολές στοίβας

- `push` *op* — πρόσθεση στη στοίβα: $\mathtt{sp} := \mathtt{sp} - 2, \quad [\mathtt{sp}] := op$
- `pop` *op* — αφαίρεση από τη στοίβα: $op := [\mathtt{sp}], \quad \mathtt{sp} := \mathtt{sp} + 2$

⇒ Η στοίβα αυξάνει προς τα κάτω, δηλαδή προς μικρότερες διευθύνσεις

Εντολές υποπρογραμμάτων

- `call` *address* — κλήση: $\mathtt{sp} := \mathtt{sp} - 2, \quad [\mathtt{sp}] := \mathtt{ip}, \quad \mathtt{ip} := address$
- `ret` — επιστροφή: $\mathtt{ip} := [\mathtt{sp}], \quad \mathtt{sp} := \mathtt{sp} + 2$

⇒ Η τιμή του `ip` που τοποθετείται στη στοίβα από την `call` είναι η διεύθυνση της εντολής που ακολουθεί την `call`

Εντολές x87 FPU (i)

⇒ Ειδική στοίβα 8 καταχωρητών: ST(0), ... ST(7)

- `fld` *source* (load real & push)

```
fld tbyte ptr @real1
```

- `fild` *source* (load integer & push)

```
fild word ptr [bp − 2]
```

- `fstp` *destination* (pop & store real)

```
fld tbyte ptr [bp − 10]
```

- `fistp` *destination* (pop & store integer)

```
fild word ptr [bp − 2]
```


Εντολές x87 FPU (ii)

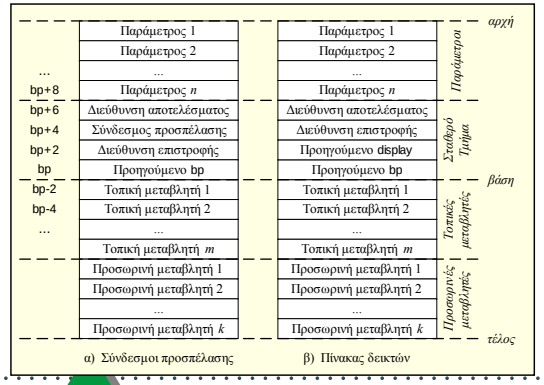
- `faddp ST(1),ST(0)` ST(1) := ST(1) + ST(0) & pop
- `fsubp ST(1),ST(0)` ST(1) := ST(1) − ST(0) & pop
- `fmulp ST(1),ST(0)` ST(1) := ST(1) ∗ ST(0) & pop
- `fdivp ST(1),ST(0)` ST(1) := ST(1)/ST(0) & pop
- `fchs` ST(0) := −ST(0)
- `fcompp` ST(1) $\lessgtr$ ST(0) & pop both
- `fstsw` *destination* (store x87 FPU flags)

```
fstsw ax
fstsw word ptr [bp − 2]
```

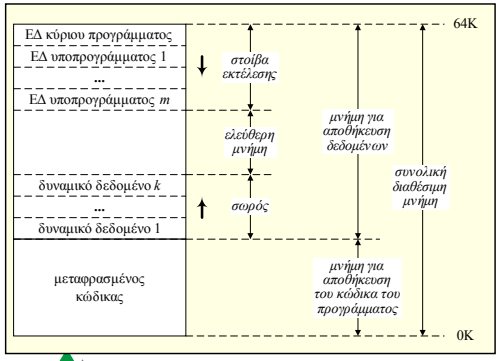

Διαχείριση μνήμης (i)

- Δομή ενοτήτων (block structure)
  - Μη τοπικά δεδομένα
- Εγγράφημα δραστηριοποίησης (activation record)
  - Παράμετροι
  - Αποτέλεσμα
  - Πληροφορίες κατάστασης μηχανής
  - Τοπικές μεταβλητές
  - Προσωρινές μεταβλητές

Διαχείριση μνήμης (ii)



Διαχείριση μνήμης (iii)



Προσπέλαση ονομάτων

- Τοπικά: [bp + *offset*]
- Μη τοπικά: [si + *offset*]

  ⇒ ο si πρέπει να δείχνει στη βάση του εγγραφήματος δραστηριοποίησης όπου τα δεδομένα είναι τοπικά
- Το πρόβλημα ανάγεται στον εντοπισμό του αντίστοιχου εγγραφήματος δραστηριοποίησης
- Λύσεις που βασίζονται στο βάθος φωλιάσματος:
  - Σύνδεσμοι προσπέλασης (access links)
  - Πίνακες δεικτών (link tables / displays)

Σύνδεσμοι προσπέλασης (i)

- Αρχή λειτουργίας
  - Έστω ότι η δομική μονάδα p βρίσκεται φωλιασμένη μέσα στη δομική μονάδα q

  $\Rightarrow$ Στο ΕΔ της p τοποθετείται ένα σύνδεσμος προς τη βάση του ΕΔ της πιο πρόσφατης κλήσης της q
- Κατά την κλήση υποπρογραμμάτων, απαιτείται τελικός κώδικας για την ενημέρωση των συνδέσμων προσπέλασης

Σύνδεσμοι προσπέλασης (ii)

- Τρόπος χρήσης
  - Έστω ότι ζητείται το δεδομένο a που είναι τοπικό σε μια δομική μονάδα με βάθος φωλιάσματος n_a
  - Έστω ότι βρισκόμαστε σε μια δομική μονάδα p με βάθος φωλιάσματος $n_p \geq n_a$

  $\Rightarrow$ Ακολουθούμε $n_p - n_a$ συνδέσμους προσπέλασης
- Κατά την προσπέλαση ονομάτων, απαιτείται τελικός κώδικας για την υλοποίηση των παραπάνω

Πέρασμα παραμέτρων

- Κλήση κατ' αξία (call by value)
- Κλήση κατ' αναφορά (call by reference)
- Κλήση κατ' όνομα (call by name)
- Κλήση κατ' ανάγκη (call by need)
- Κλήση κατ' αξία και αποτέλεσμα (call by value-result)

$\Rightarrow$ Τρόπος υλοποίησης καθενός

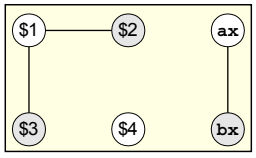
Δέσμευση καταχωρητών (i)

- Πρόβλημα 1: επιλογή τελουμένων που θα αποθηκευτούν σε καταχωρητές
- Πρόβλημα 2: επιλογή καταχωρητών όπου θα αποθηκευτούν τα τελούμενα
- Το πρόβλημα της βέλτιστης χρήσης καταχωρητών είναι NP-complete, ακόμα και χωρίς ειδικούς περιορισμούς
- Η λύση του ανάγεται στην κατασκευή του γράφου αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεταβλητών και στο χρωματισμό αυτού με τόσα χρώματα όσοι οι καταχωρητές

Δέσμευση καταχωρητών (ii)

- Παράδειγμα: `d := b*b-4*a*c`

1: $*, \mathrm{b}, \mathrm{b}, \$1$
2: $*, 4, \mathrm{a}, \$2$
3: $*, \$2, \mathrm{c}, \$3$
4: $-, \$1, \$3, \$4$
5: $:=, \$4, -, \mathrm{d}$

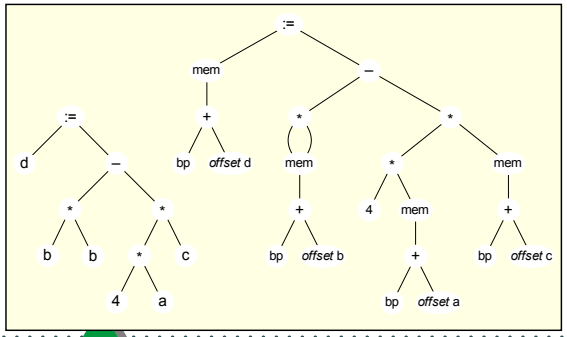


Επιλογή εντολών (i)

- Απλή αλλά κακή προσέγγιση: ενιαίο σχήμα παραγωγής τελικού κώδικα για κάθε δομή του ενδιάμεσου κώδικα
- Καλύτερη προσέγγιση: πλακόστρωση (tiling)
  - τεμαχισμός του ενδιάμεσου κώδικα σε τμήματα
  - κάθε τμήμα αντιστοιχεί σε μια εντολή
- Βέλτιστη αλλά χρονοβόρα προσέγγιση: δυναμικός προγραμματισμός (dynamic programming)

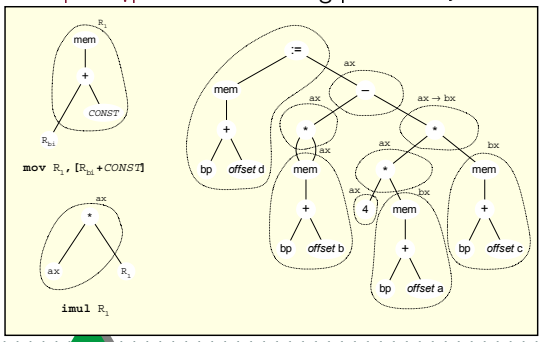
Επιλογή εντολών (ii)

- Παράδειγμα: `d := b*b-4*a*c`



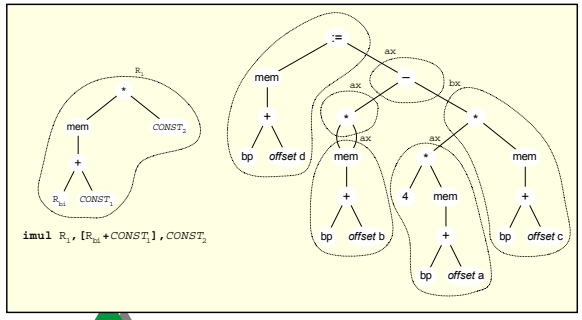
Επιλογή εντολών (iii)

- Παράδειγμα: tiling με εντολές του 8086



Επιλογή εντολών (iv)

- Παράδειγμα: tiling με εντολές του 80386



Το τελικό πρόγραμμα (i)

- Σκελετός:

```
xseg  segment  public 'code'
      assume   cs : xseg, ds : xseg, ss : xseg
      org      100h
main  proc     near
      call     near ptr program
      mov      ax, 4C00h
      int      21h
main  endp
```

... τελικός κώδικας που παράγεται ...

```
xseg  ends
      end      main
```


Το τελικό πρόγραμμα (ii)

- Βιβλιοθήκη χρόνου εκτέλεσης (run-time library)

```
extrn function : proc
```

- Σταθερές συμβολοσειρές και κινητής υποδιαστολής

```
@str1   db 'this is'
        db 10
        db 'an example'
        db 0

@real1  dt 1e-10
@real2  dt 2.0
```


Βοηθητικές ρουτίνες (i)

- getAR(a) (φόρτωση διεύθυνσης ΕΔ)

```
mov si, word ptr [bp + 4]
mov si, word ptr [si + 4]
...
mov si, word ptr [si + 4]
```

} $(n_{\text{cur}} - n_{\text{a}} - 1$ φορές)

- updateAL() (ενημέρωση συνδέσμων προσπέλασης)

(α) `push bp` αν $n_p < n_x$

(β) `push word ptr [bp + 4]` αν $n_p = n_x$

(γ)
```
mov si, word ptr [bp + 4]
mov si, word ptr [si + 4]
...
mov si, word ptr [si + 4]
```
αν $n_p > n_x$ } $(n_p - n_x - 1$ φορές)

```
push word ptr [si + 4]
```

Βοηθητικές ρουτίνες (ii)

- load(R, a) (φόρτωση τελουμένου)

	Είδος του a	Κώδικας που παράγεται
(α1)	αριθμητική σταθερά	`mov R, a`
(α2)	λογική σταθερά `true`	`mov R, 1`
(α3)	λογική σταθερά `false`	`mov R, 0`
(α4)	σταθερά χαρακτήρα	`mov R, ASCII(a)`
(α6)	σταθερά `nil`	`mov R, 0`
(β1)	τοπική οντότητα: μεταβλητή, παράμετρος κατ' αξία, ή προσωρινή μεταβλητή	`mov R,` *size* `ptr [bp +` *offset*`]`
(β2)	τοπική οντότητα: παράμετρος κατ' αναφορά	`mov si, word ptr [bp +` *offset*`]` `mov R,` *size* `ptr [si]`

Βοηθητικές ρουτίνες (iii)

- load(R, a) (φόρτωση τελουμένου)

	Είδος του a	Κώδικας που παράγεται
(γ1)	μη τοπική οντότητα: μεταβλητή, παράμετρος κατ' αξία, ή προσωρινή μεταβλητή	getAR(a) `mov R,` *size* `ptr [si +` *offset*`]`

(γ2)	μη τοπική οντότητα: παράμετρος κατ' αναφορά	getAR(a)
		`mov si, word ptr [si +` *offset*`]`
		`mov R,` *size* `ptr [si]`

(δ)	$[x]$	load(di, x) `mov R,` *size* `ptr [di]`
(ε)	$\{x\}$	loadAddr(R, x)

Βοηθητικές ρουτίνες (iv)

- loadAddr(R, a) (φόρτωση διεύθυνσης τελουμένου)

	Είδος του a	Κώδικας που παράγεται
(α5)	σταθερή συμβολοσειρά	`lea R, byte ptr a`
(β1)	τοπική οντότητα: παράμετρος κατ' αξία, ή προσωρινή μεταβλητή	`lea R,` *size* `ptr [bp +` *offset*`]`
(β2)	τοπική οντότητα: παράμετρος κατ' αναφορά	`mov R, word ptr [bp +` *offset*`]`
(γ1)	μη τοπική οντότητα: παράμετρος κατ' αξία, ή προσωρινή μεταβλητή	getAR(a) `lea R,` *size* `ptr [si +` *offset*`]`
(γ2)	μη τοπική οντότητα: παράμετρος κατ' αναφορά	getAR(a) `mov R, word ptr [si +` *offset*`]`
(δ)	$[x]$	load(R, x)

Βοηθητικές ρουτίνες (v)

- Παρόμοια υλοποίηση για τις:
  - loadReal(a)
  - store(R, a)
  - storeReal(a)
- Ρουτίνες για ετικέτες τελικού κώδικα:
  - name(p) _p_*num*
  - endof(p) @p_*num*
  - label(n) @n
  - label(ℓ) @p_*num*_ℓ

Παραγωγή κώδικα (i)

- Τετράδα :=, x, −, z

  load(R, x) loadReal(x)
  store(R, z) storeReal(z)
- Τετράδα array, x, y, z

```
load(ax, y)
mov   cx, size
imul  cx
loadAddr(cx, x)
add   ax, cx
store(ax, z)
```


Παραγωγή κώδικα (ii)

- Τετράδες +, x, y, z −, x, y, z

```
load(ax, x)          loadReal(x)
load(dx, y)          loadReal(y)
instr  ax, dx        finstr  ST(1), ST(0)
store(ax, z)         storeReal(z)
```

instr = `add` ή `sub` *finstr* = `faddp` κ.λπ.

- Τετράδες ∗, x, y, z /, x, y, z %, x, y, z

```
load(ax, x)    load(ax, x)    load(ax, x)
load(cx, y)    cwd            cwd
imul  cx       load(cx, y)    load(cx, y)
store(ax, z)   idiv  cx       idiv  cx
               store(ax, z)   store(dx, z)
```

Παραγωγή κώδικα (iii)

- Τετράδες $=, x, y, z$ $<>, x, y, z$ $<, x, y, z$
  $>, x, y, z$ $<=, x, y, z$ $>=, x, y, z$

load(ax, x)
load(dx, y)
cmp ax, dx
instr label(z)

instr = je, jne, κ.λπ.

loadReal(x)
loadReal(y)
fcompp
fstsw ax
test ax, *value*
instr label(z)

value και *instr* από Πίνακα 9.1 σελ. 249

Παραγωγή κώδικα (iv)

- Τετράδα ifb, x, −, z

load(al, x)
or al, al
jnz label(z)

- Τετράδα jump, −, −, z

jmp label(z)

- Τετράδα jumpl, −, −, z

jmp label(z)

- Τετράδα label, −, −, z

label(z) :

Παραγωγή κώδικα (v)

- Τετράδα unit, x, −, −

name(x) proc near
push bp
mov bp, sp
sub sp, *size*

- Τετράδα endu, x, −, −

endof(x) : mov sp, bp
pop bp
ret
name(x) endp

Παραγωγή κώδικα (vi)

- Τετράδα call, −, −, z

sub sp, 2 αν z είναι διαδικασία
updateAL()
call near ptr name(z)
add sp, *size* + 4

- Τετράδα ret, −, −, −

jmp endof(*current*)

Παραγωγή κώδικα (vii)

- Τετράδα par, x, y, −
  - αν y = V και x είναι 16 bit

load(ax, x)
push ax

  - αν y = V και x είναι 8 bit

load(al, x)
sub sp, 1
mov si, sp
mov byte ptr [si], al

Παραγωγή κώδικα (vii)

- Τετράδα par, x, y, − (συνέχεια)
  - αν y = V και x είναι 80 bit

loadReal(x)
sub sp, 10
mov si, sp
fstp tbyte ptr [si]

  - αν y = R ή RET

loadAddr(si, x)
push si