

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών

Κεφάλαιο 4

Ο επεξεργαστής

[Έχει χρησιμοποιηθεί υλικό από τις διαφάνειες
Computer Organization and Design, 4th Edition,
Patterson & Hennessy, © 2008, MK]

Εισαγωγή

§4.1 Εισαγωγή

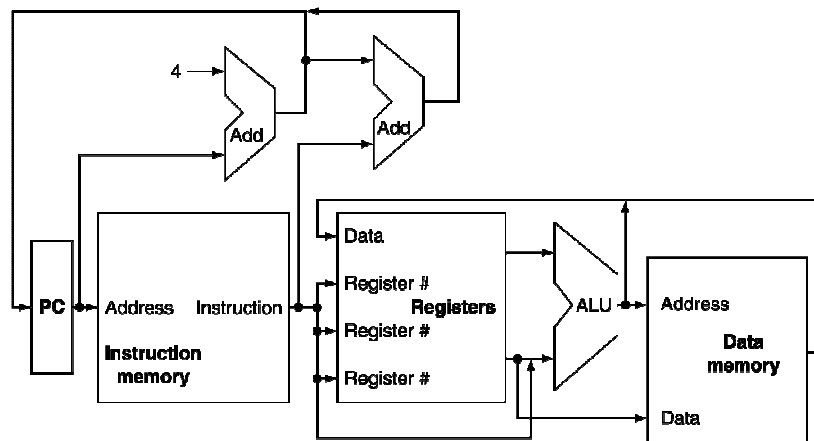
- Παράγοντες απόδοσης του επεξεργαστή
 - Αριθμός εντολών
 - Καθορίζεται από το ISA και το μεταγλωττιστή
 - CPI και κύκλος ρολογιού
 - Καθορίζονται από το υλικό του επεξεργαστή
- Θα εξετάσουμε δύο υλοποιήσεις του MIPS
 - Αναλυτικά μια απλή έκδοση
 - Σύντομα μια πιο ρεαλιστική έκδοση (με διοχέτευση)
 - Πιο αναλυτικά στο 3^ο έτος (στο μάθημα Προηγμένη Αρχιτεκτονική Υπολογιστών)
- Απλό υποσύνολο του ISA
 - Προσπέλαση μνήμης: lw, sw
 - Αριθμητικές/λογικές: add, sub, and, or, slt
 - Ελέγχου: beq, j

Εκτέλεση εντολής

- Program Counter (PC) → μνήμη εντολών (instruction memory), προσκόμιση εντολών (fetch instruction)
- Αριθμοί καταχωρητών → αρχείο καταχωρητών (register file), ανάγνωση καταχωρητών
- Ανάλογα με τον τύπο της εντολής
 - Χρησιμοποιεί την ALU για να υπολογίσει
 - Αριθμητικό αποτέλεσμα
 - Διεύθυνση μνήμης για load/store
 - Διεύθυνση προορισμού διακλάδωσης (branch target address)
 - Προσπέλαση της μνήμης δεδομένων (data memory) για load/store
 - $PC \leftarrow$ διεύθυνση διακλάδωσης ή $PC + 4$

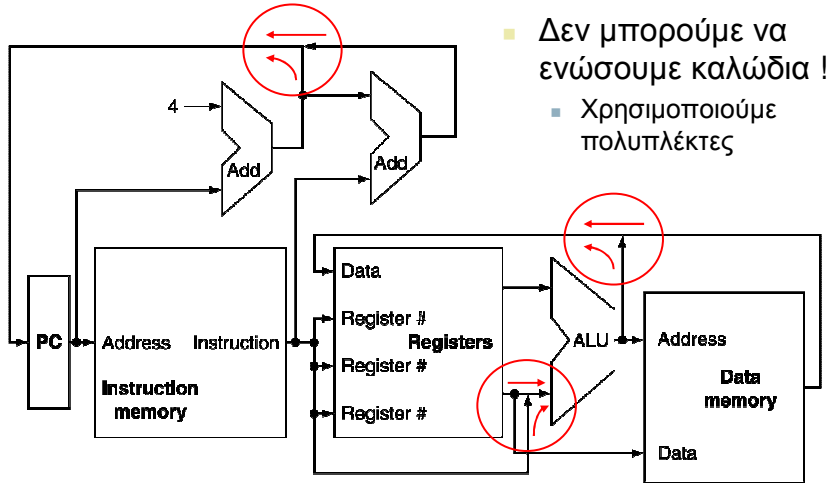
Ο επεξεργαστής — 3

Άποψη της CPU



Ο επεξεργαστής — 4

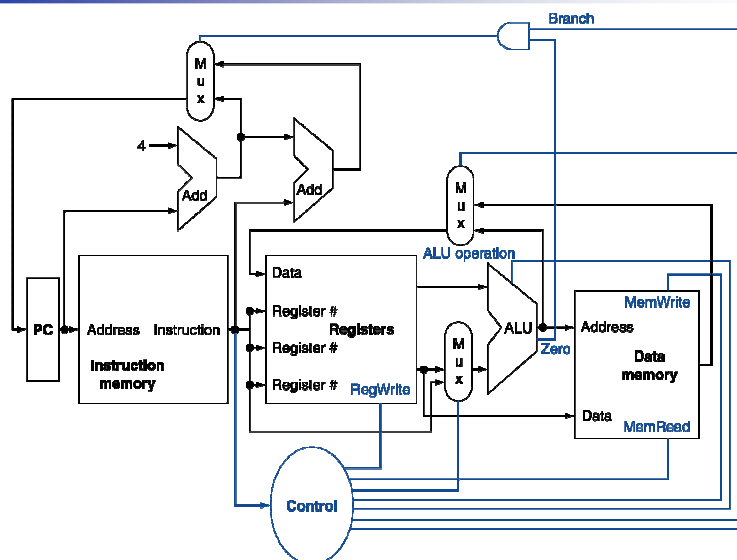
Πολυπλέκτες



- Δεν μπορούμε να ενώσουμε καλώδια !
 - Χρησιμοποιούμε πολυπλέκτες

Ο επεξεργαστής — 5

Έλεγχος



Ο επεξεργαστής — 6

Συνδυαστικά στοιχεία

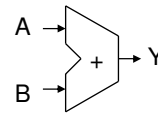
- Πύλη AND

- $Y = A \& B$



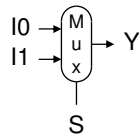
- Αθροιστής

- $Y = A + B$



- Πολυπλέκτης

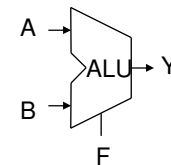
- $Y = S ? I1 : I0$



- ALU

Arithmetic/Logic Unit

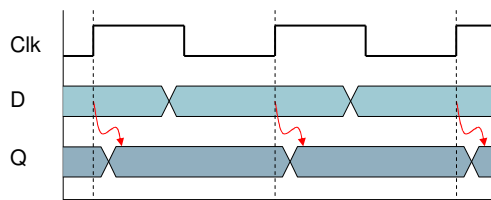
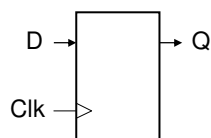
- $Y = F(A, B)$



Ακολουθιακά στοιχεία

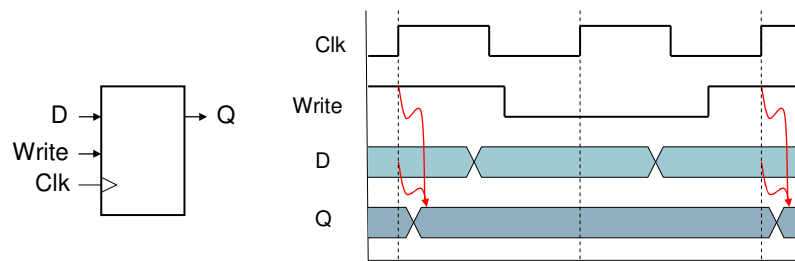
- Καταχωρητής (register): αποθηκεύει δυαδική πληροφορία

- Ακμοπυροδότητος (edge-triggered): ενημερώνει την τιμή του όταν το Clk αλλάζει από 0 σε 1



Ακολουθιακά στοιχεία

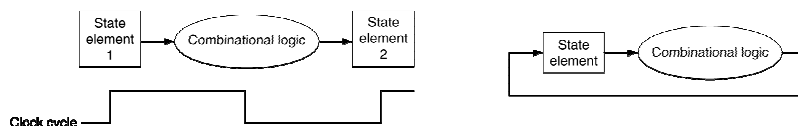
- Καταχωρητής με έλεγχο εγγραφής (write)
 - Ενημερώνει στην ακμή του ρολογιού όταν η είσοδος ελέγχου εγγραφής είναι 1



Ο επεξεργαστής — 9

Μεθοδολογία χρονισμού

- Η συνδυαστική λογική επεξεργάζεται τα δεδομένα κατά τη διάρκεια των κύκλων ρολογιού
 - Μεταξύ ακμών ρολογιού
 - Είσοδος από καταχωρητή, έξοδος σε καταχωρητή
 - Η μεγαλύτερη καθυστέρηση καθορίζει την περίοδο του ρολογιού



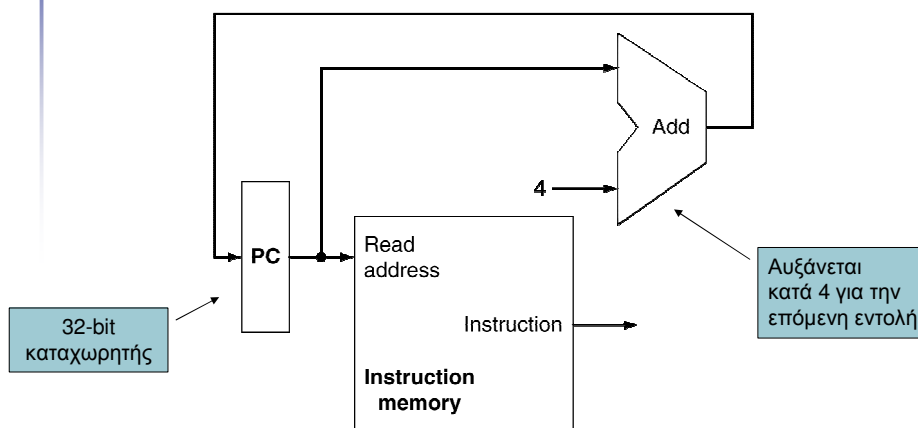
Ο επεξεργαστής — 10

Διαδρομή δεδομένων

- Διαδρομή δεδομένων (datapath)
 - Τα στοιχεία που επεξεργάζονται δεδομένα και διευθύνσεις στην CPU
 - Καταχωρητές, ALUs, πολυπλέκτες, μνήμες, ...
- Θα χτίσουμε σταδιακά μια διαδρομή δεδομένων για τον MIPS
 - Προσθέτοντας ολοένα περισσότερη λεπτομέρεια

Ο επεξεργαστής — 11

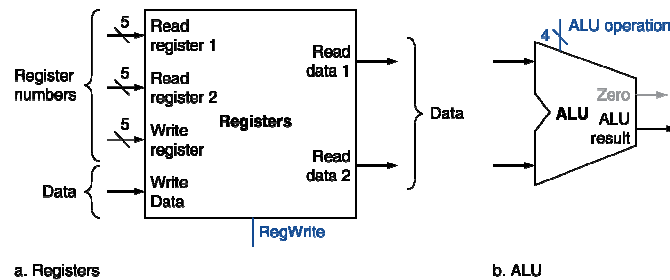
Προσκόμιση εντολής



Ο επεξεργαστής — 12

Εντολή τύπου R

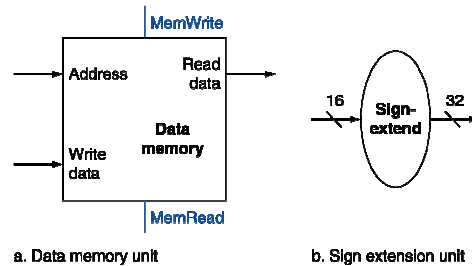
- Διαβάζει δύο καταχωρητές (τελεστέοι)
- Εκτελεί την αριθμητική/λογική λειτουργία
- Γράφει το αποτέλεσμα στον καταχωρητή



Ο επεξεργαστής — 13

Εντολή Load/Store

- Διαβάζει τους καταχωρητές
- Υπολογίζει τη διεύθυνση χρησιμοποιώντας τη σχετική απόσταση (offset) των 16-bit
 - Χρησιμοποιεί την ALU, αλλά πρώτα κάνει επέκταση προσήμου
- Load: διαβάζει τη μνήμη και ενημερώνει τον καταχωρητή
- Store: γράφει την τιμή του καταχωρητή στη μνήμη



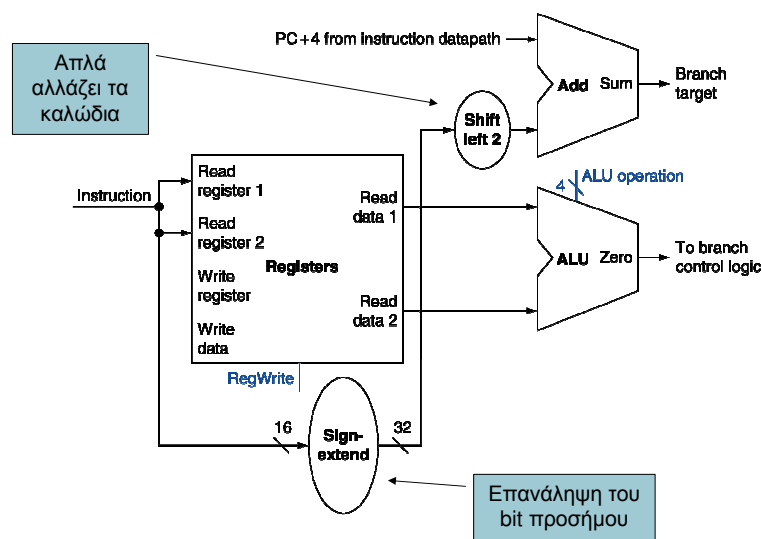
Ο επεξεργαστής — 14

Εντολή διακλάδωσης

- Διαβάζει τους καταχωρητές
- Συγκρίνει τους τελεστέους
 - Χρησιμοποιεί την ALU, αφαιρεί και ελέγχει την έξοδο Zero
- Υπολογίζει τη διεύθυνση προορισμού διακλάδωσης
 - Επέκταση προσήμου της μετατόπισης
 - Αριστερή ολίσθηση 2 θέσεις (μετατόπιση λέξης)
 - Πρόσθεση στο PC + 4
 - Έχει ήδη υπολογιστεί από την προσκόμιση εντολής

Ο επεξεργαστής — 15

Εντολή διακλάδωσης



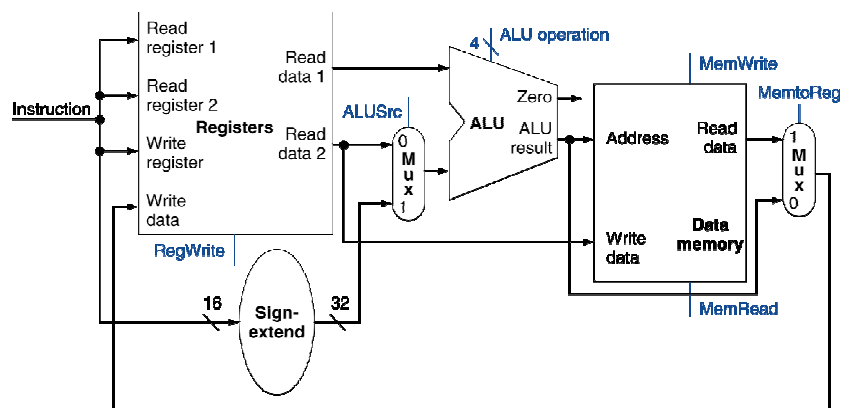
Ο επεξεργαστής — 16

Ενώνοντας τα στοιχεία

- Η διαδρομή δεδομένων εκτελεί μία εντολή σε ένα κύκλο ρολογιού
 - Κάθε στοιχείο της διαδρομής δεδομένων μπορεί να εκτελέσει μία συνάρτηση τη φορά
 - Άρα, χρειαζόμαστε ξεχωριστές μνήμες για εντολές και δεδομένα
- Χρήση πολυπλεκτών όπου υπάρχουν εναλλακτικές πηγές δεδομένων για διαφορετικές εντολές

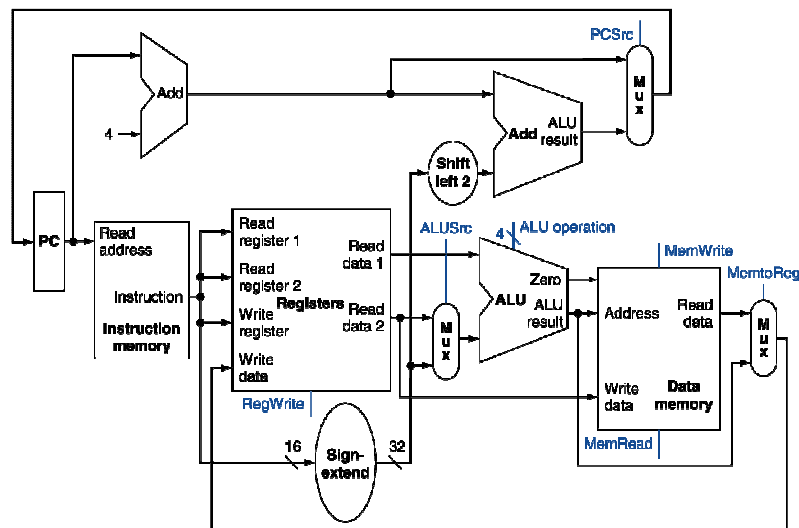
Ο επεξεργαστής — 17

Διαδρομή δεδομένων για R-Type/Load/Store



Ο επεξεργαστής — 18

Πλήρης διαδρομή δεδομένων



Ο επεξεργαστής — 19

Έλεγχος ALU

- Η ALU χρησιμοποιείται για
 - Load/Store: F = πρόσθεση
 - Branch: F = αφαίρεση
 - R-type: F = εξαρτάται από το πεδίο funct

ALU control	Function
0000	AND
0001	OR
0010	add
0110	subtract
0111	set-on-less-than
1100	NOR

Ο επεξεργαστής — 20

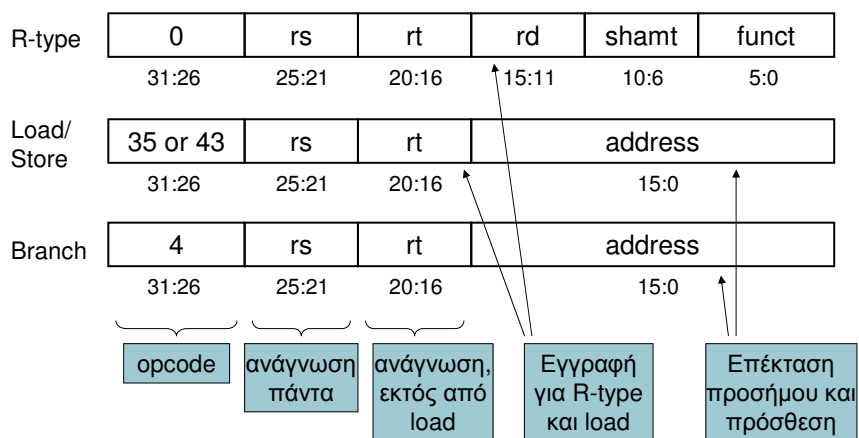
Έλεγχος ALU

- Υποθέστε ότι το ALUOp των 2-bit εξάγεται από το opcode της εντολής
 - Συνδυαστική λογική εξάγει τα bit ελέγχου της ALU

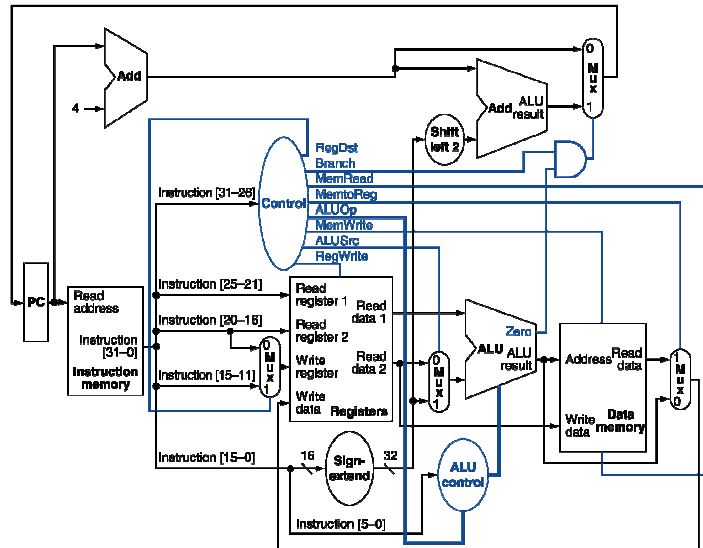
opcode	ALUOp	Operation	funct	ALU function	ALU control
lw	00	load word	XXXXXX	add	0010
sw	00	store word	XXXXXX	add	0010
beq	01	branch equal	XXXXXX	subtract	0110
R-type	10	add	100000	add	0010
		subtract	100010	subtract	0110
		AND	100100	AND	0000
		OR	100101	OR	0001
		set-on-less-than	101010	set-on-less-than	0111

Μονάδα ελέγχου

- Τα σήματα ελέγχου που εξάγονται από την εντολή

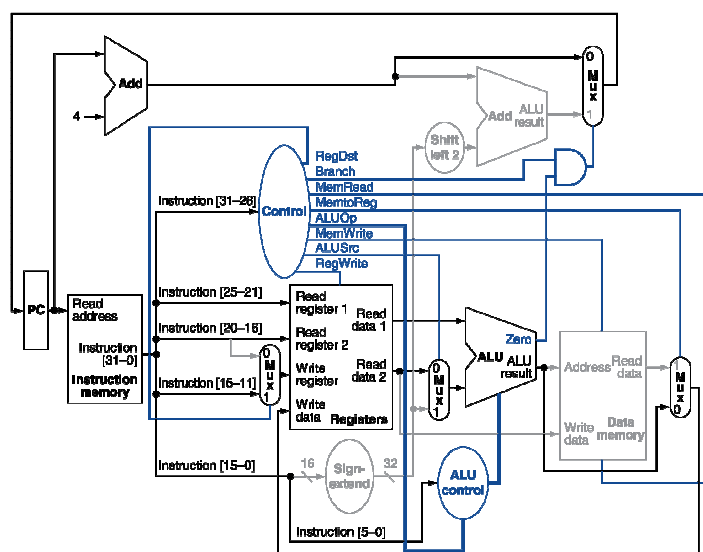


Διαδρομή δεδομένων με έλεγχο



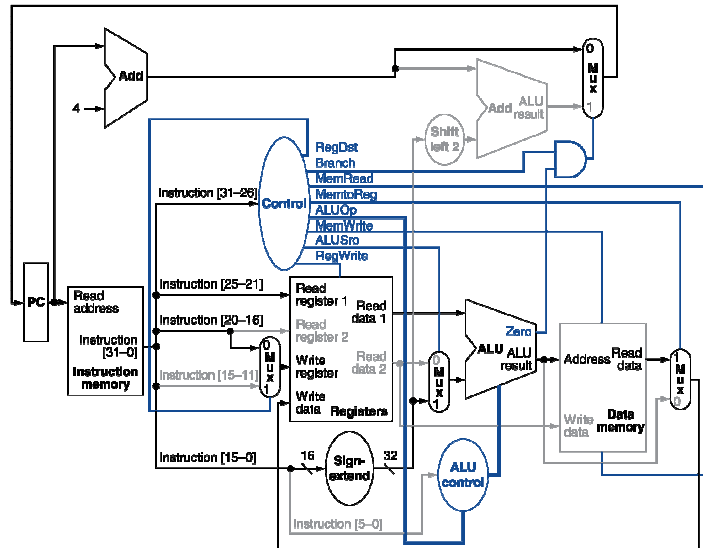
Ο επεξεργαστής — 23

Εντολή τύπου R



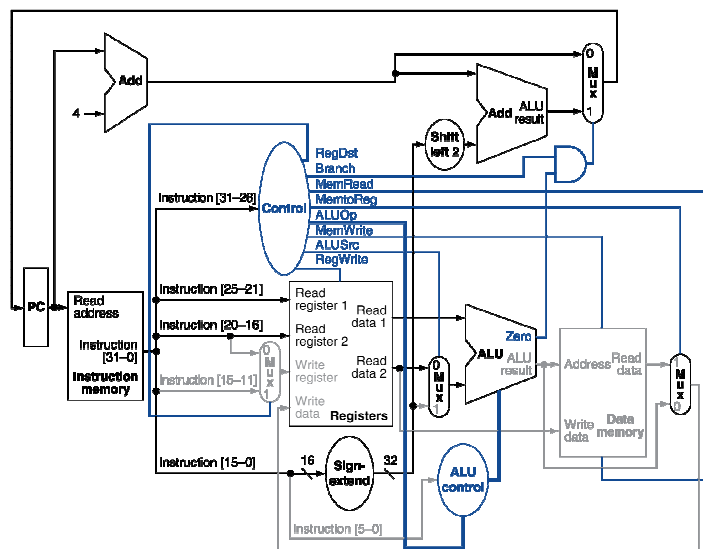
Ο επεξεργαστής — 24

Εντολή Load



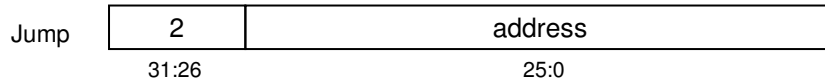
Ο επεξεργαστής — 25

Εντολή Branch-on-Equal



Ο επεξεργαστής — 26

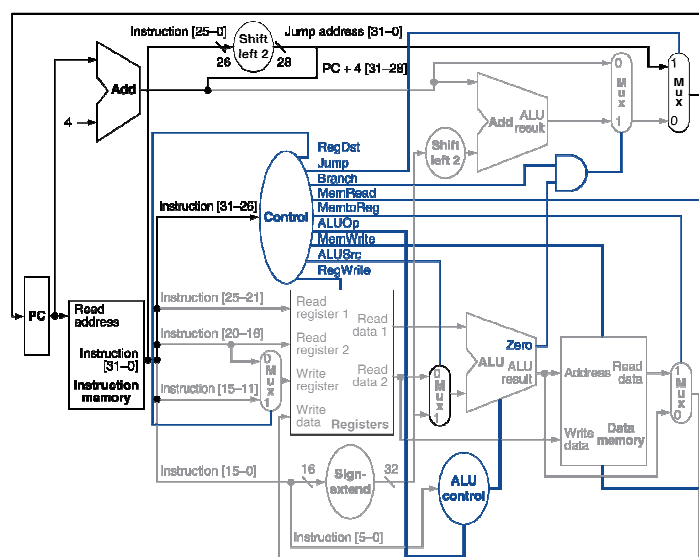
Υλοποίηση των αλμάτων



- Χρησιμοποιούν διεύθυνση λέξης
- Ενημερώνουν τον PC με συνένωση των
 - 4 πιο σημαντικά bit του παλιού PC
 - 26-bit της διεύθυνσης άλματος
 - 00
- Χρειάζεται ένα επιπλέον σήμα ελέγχου να αποκωδικοποιηθεί από το opcode

Ο επεξεργαστής — 27

Διαδρομή και με τα άλματα



Ο επεξεργαστής — 28

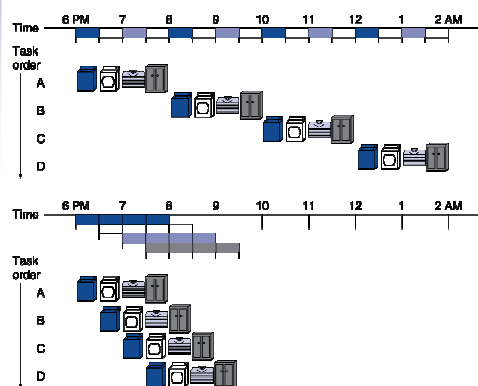
Θέματα απόδοσης

- Η μεγαλύτερη καθυστέρηση καθορίζει την περίοδο του ρολογιού
 - Κρίσιμη διαδρομή: εντολή load
 - Μνήμη εντολών → αρχείο καταχωρητών → ALU → μνήμη δεδομένων → αρχείο καταχωρητών
- Δεν είναι εφικτό να μεταβάλλουμε την περίοδο του ρολογιού ανάλογα με την εντολή
- Παραβιάζει τη βασική σχεδιαστική αρχή
 - Κάντε την πιο συνηθισμένη περίπτωση γρήγορη
- Μπορούμε να βελτιώσουμε την απόδοση με διοχέτευση (pipelining)

Ο επεξεργαστής — 29

Αναλογία διοχέτευσης

- Μπουγάδα με διοχέτευση (pipeline)
 - Επικαλυπτόμενη εκτέλεση
 - Η παραλληλία βελτιώνει την απόδοση



- Τέσσερα φορτία:

- Επιτάχυνση
= $8/3.5 = 2.3$

- Πολλά φορτία:

- Επιτάχυνση
= $2n/0.5n + 1.5 \approx 4$
= αριθμός σταδίων

Ο επεξεργαστής — 30

Διοχέτευση στον MIPS

- Πέντε στάδια, ένα βήμα ανά στάδιο
 1. IF: Instruction fetch
 - Προσκόμιση εντολής από τη μνήμη
 2. ID: Instruction decode
 - Αποκωδικοποίηση εντολής και ανάγνωση καταχωρητών
 3. EX: Execute
 - Εκτέλεση λειτουργίας ή υπολογισμός διεύθυνσης
 4. MEM: memory
 - Προσπέλαση της μνήμης
 5. WB: Write back
 - Εγγραφή του αποτελέσματος πίσω σε καταχωρητή

Ο επεξεργαστής — 31

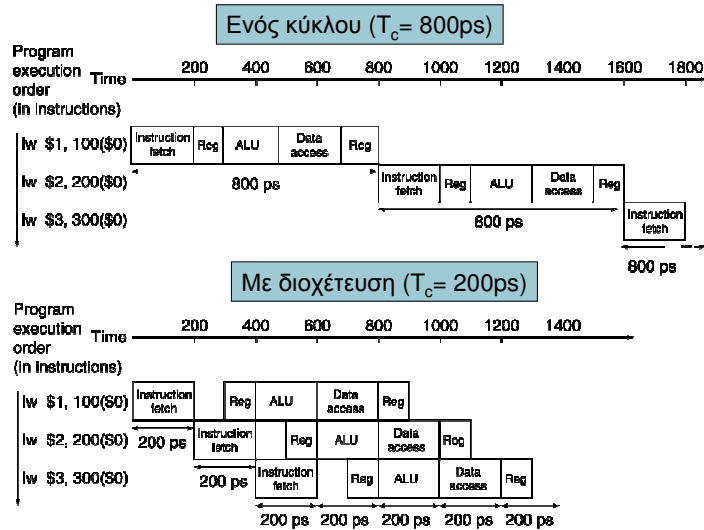
Απόδοση διοχέτευσης

- Υποθέστε ότι οι χρόνοι των σταδίων είναι
 - 100ps για ανάγνωση ή εγγραφή καταχωρητών
 - 200ps για τα υπόλοιπα στάδια
- Σύγκριση της διαδρομής δεδομένων με διοχέτευση με τη διαδρομή δεδομένων ενός κύκλου

Instr	Instr fetch	Register read	ALU op	Memory access	Register write	Total time
lw	200ps	100 ps	200ps	200ps	100 ps	800ps
sw	200ps	100 ps	200ps	200ps		700ps
R-format	200ps	100 ps	200ps		100 ps	600ps
beq	200ps	100 ps	200ps			500ps

Ο επεξεργαστής — 32

Απόδοση διοχέτευσης



Ο επεξεργαστής — 33

Επιτάχυνση διοχέτευσης

- Εάν όλα τα στάδια ήταν ισορροπημένα
 - π.χ., όλα διαρκούσαν τον ίδιο χρόνο
 - Χρόνος μεταξύ εντολών_{pipelined}
= $\frac{\text{Χρόνος μεταξύ εντολών}_{\text{nonpipelined}}}{\text{αριθμός σταδίων}}$
- Διαφορετικά, η επιτάχυνση είναι μικρότερη
- Επιτάχυνση λόγω της αύξησης της ικανότητας διεκπεραίωσης (throughput)
 - Ο χρόνος εκτέλεσης της κάθε εντολής (latency) δεν μειώνεται

Ο επεξεργαστής — 34

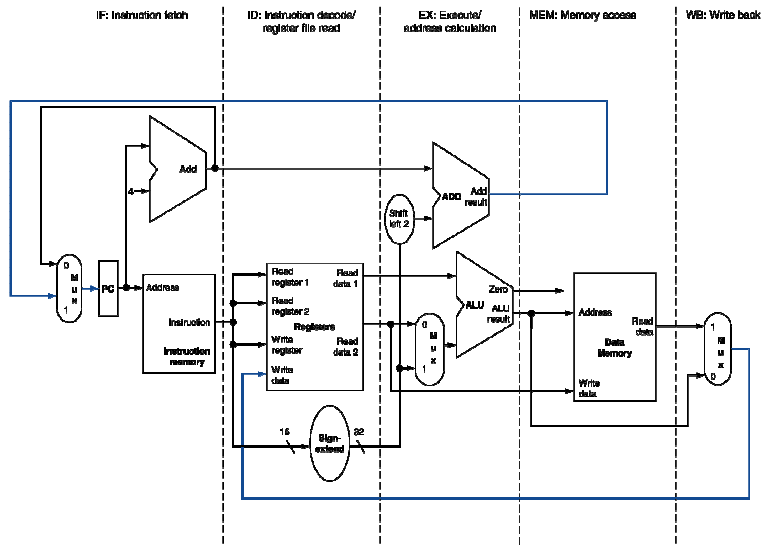
Διοχέτευση και ISA

- Το ISA του MIPS είναι κατάλληλο για διοχέτευση
 - Όλες οι εντολές είναι 32-bit
 - Εύκολη προσκόμιση και αποκωδικοποίηση
 - Αντίθετα στο x86 ISA: εντολές με μήκος 1 έως 17 byte
 - Κατηγορίες εντολών: λίγες και κανονικές
 - Αποκωδικοποίηση και ανάγνωση καταχωρητών σε ένα βήμα
 - Διευθύνσεις φόρτωσης/αποθήκευσης
 - Υπολογισμός της διεύθυνσης στο 3^ο στάδιο, προσπέλαση μνήμης στο 4^ο στάδιο
 - Ευθυγραμμισμένα δεδομένα στη μνήμη
 - Προσπέλαση της μνήμης σε ένα κύκλο

Κίνδυνοι (hazards)

- Καταστάσεις που εμποδίζουν την έναρξη της επόμενης εντολής στον επόμενο κύκλο
- Δομικοί κίνδυνοι (structural hazards)
 - Κάποια μονάδα είναι απασχολημένη
- Κίνδυνοι δεδομένων (data hazards)
 - Πρέπει να περιμένει την προηγούμενη εντολή να ολοκληρωθεί γιατί χρειάζεται τα δεδομένα που παράγει
- Κίνδυνοι ελέγχου (control hazards)
 - Η λήψη μιας απόφασης ελέγχου εξαρτάται από μια προηγούμενη εντολή

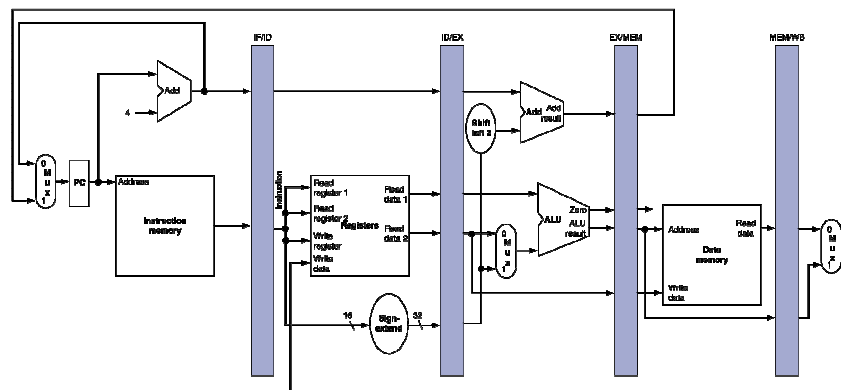
Διαδρομή δεδομένων με διοχέτευση



Ο επεξεργαστής — 37

Καταχωρητές διοχέτευσης

- Απαιτούνται καταχωρητές μεταξύ των σταδίων
 - Για να κρατάνε την πληροφορία που παράγεται σε κάθε κύκλο



Ο επεξεργαστής — 38

Τέλος...