

#### Εικονική Μνήμη

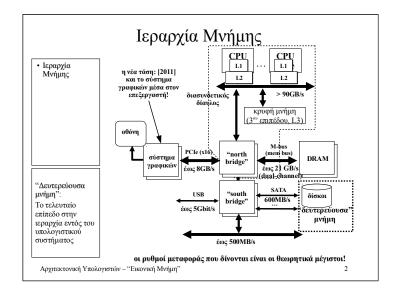
(και ο ρόλος της στην ιεραρχία μνήμης)

http://mixstef.github.io/courses/comparch/



#### Μ.Στεφανιδάκης





# Εικονική μνήμη (virtual memory)

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Το πρώτο σύστημα

εικονικής μνήμης

παρουσιάστηκε το

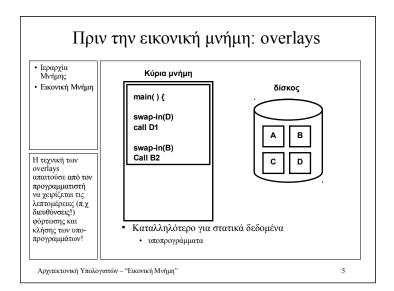
1962 (Atlas

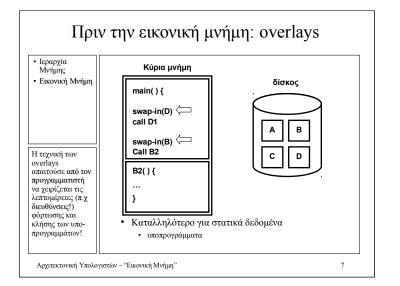
computer)

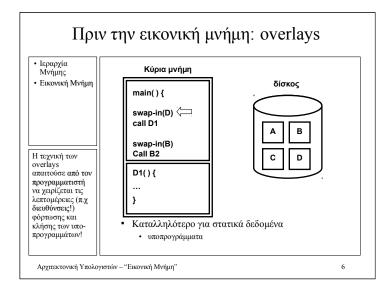
- Για ποιον λόγο εμφανίστηκε;
  - Στους πρώτους υπολογιστές το μέγεθος της κύριας μνήμης ήταν περιορισμένο
  - Ακόμα και στην περίπτωση του μονοπρογραμματισμού η κύρια μνήμη ήταν ανεπαρκής
  - Εμφάνιση ΛΣ με υποστήριξη πολυπρογραμματισμού: αδυναμία ταυτόχρονης διατήρησης πολλών προγραμμάτων στην κύρια μνήμη
  - Η λύση: εικονική μνήμη
    - Μέρος των δεδομένων βρίσκεται στους δίσκους του συστήματος
    - Μεταφορά στην κύρια μνήμη όταν χρειαστεί
    - Πιθανότατα αντικαθιστώντας άλλα τμήματα δεδομένων
    - Τα τελευταία μεταφέρονται πίσω στους δίσκους

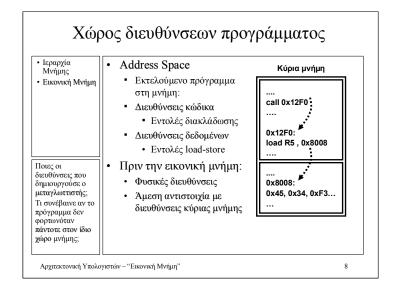
Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – "Εικονική Μνήμη"

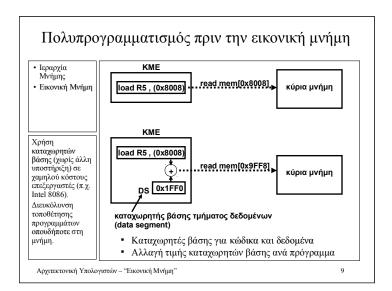
4

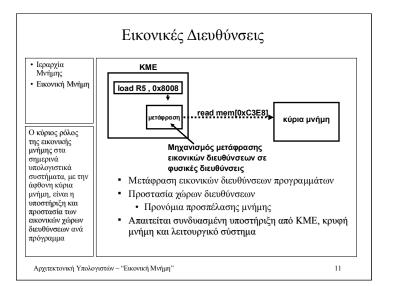












# Μεταβαίνοντας σε εικονικές διευθύνσεις

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη
- Το προηγούμενο σχήμα
  - Εισήγαγε την αποσύνδεση των λογικών διευθύνσεων των προγραμμάτων από τις φυσικές διευθύνσεις κύριας μνήμης
  - Με απλή αντιστοιχία:
     φυσική διεύθυνση + καταχωρητής βάσης
  - Απαιτείται υποστήριξη από το υλικό (ΚΜΕ)
  - Το πρόγραμμα μπορεί να φορτωθεί σε οποιαδήποτε θέση μνήμης (relocation)
    - Δεν περιέχει αναφορές σε φυσικές διευθύνσεις
  - Εισάγεται η έννοια των ξεχωριστών χώρων διευθύνσεων (κώδικα, δεδομένων...) ανά πρόγραμμα
    - γωρίς περαιτέρω υποστήριξη όμως!

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών - "Εικονική Μνήμη"

10

# Η εικονική μνήμη (ξανά)

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η διαχείριση της

εικονικής μνήμης

τη διαχείριση

κρυφής-κύριας

μνήμης. Τα δύο

(μνήμη-δίσκοι)

διαφορές στα

τους!

χαρακτηριστικά

επίπεδα εδώ όμως

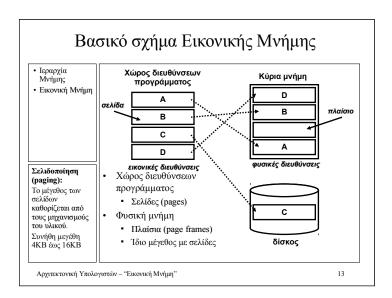
έχουν σημαντικές

έχει ομοιότητες με

- Ποιος ο ρόλος της;
  - Η χρήση εικονικής μνήμης, πέρα από όση είναι πραγματικά διαθέσιμη
  - 2. Η αντιστοίχιση εικονικών διευθύνσεων σε φυσικές και η διαχείριση των προνομίων προσπέλασης
    - Σημαντικότερο σήμερα!
- Ποιος τη διαχειρίζεται;
  - Διαχείριση από το λειτουργικό σύστημα
  - Υποστήριξη από το υλικό (ΚΜΕ/κρυφή μνήμη)
- Πώς υλοποιείται;
- Μετακίνηση τμημάτων μνήμης από/προς τους δίσκους
- Εκμετάλλευση αρχής τοπικότητας
  - Μερικά μέρη μόνο των προγραμμάτων είναι "ενεργά" κάθε στιγμή

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών - "Εικονική Μνήμη"

12



# "Σελίδες" και "Τμήματα"

- Ιεραρχία Μνήμης • Εικονική Μνήμη
  - Σελίδες (pages)
    - Σταθερό μέγεθος (4KB-16KB)
    - Μία λέξη εικονικής διεύθυνσης (page+offset)
    - Ευκολία τοποθέτησης και αντικατάστασης σελίδων στην κύρια μνήμη
    - Βέλτιστο μέγεθος για μεταφορά από-προς δίσκο
    - Ενδεχομένως μέρος σελίδας μένει αχρησιμοποίητο
    - Τμήματα (segments)
      - Μεταβλητό μέγεθος (από 1 byte(!) έως 2<sup>32</sup> bytes)
      - Δύο λέξεις ανά διεύθυνση (segment, offset)
      - Αναγκαίος ο έλεγχος ορίων
      - "ταιριάζει καλύτερα στα χαρακτηριστικά των εφαρμογών"
      - Σε ορισμένους επεξεργαστές χρησιμοποιείται ως πρώτο επίπεδο μετάφρασης (πριν τη μετάφραση των σελίδων)

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών - "Εικονική Μνήμη"

15

# Σελίδες και εικονικές διευθύνσεις

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Ο επεξεργαστής παράγει εικονική διεύθυνση
N-1 Μ (M-1) 0
αριθμός σελίδας μετατόπιση (offset)
μετάφραση ως έχει
Κ-1 Μ (M-1) 0
αριθμός φυσικής σελίδας μετατόπιση (offset)

Η μετάφραση γίνεται στον επεξεργαστή, άρα εκεί (δηλ. στο υλικό) καθορίζεται το μέγεθος της σελίδας

#### Στη μνήμη στέλνεται φυσική διεύθυνση

- Ο επεξεργαστής μπορεί να παράγει έως και  $2^{\rm N}$  εικονικές διευθύνσεις
- Η φυσική μνήμη μπορεί να έχει έως 2<sup>κ</sup> διευθύνσεις
- Το μέγεθος σελίδας είναι 2<sup>M</sup> bytes

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – "Εικονική Μνήμη"

14

# Σελιδοποίηση κατ' απαίτηση

• Ιεραρχία Μνήμης

Η μεγάλη

επιβάρυνση για τη

μετακίνηση των

σελίδων από και

είναι καθοριστική

για την απόδοση

ενός συστήματος

προς τον δίσκο

- Εικονική Μνήμη
- Οι σελίδες των προγραμμάτων (κώδικας-δεδομένα)
   βρίσκονται αρχικά μόνο στον δίσκο
- Το ΛΣ τις σημειώνει ως "απούσες" από τη μνήμη
- Όταν προσπελαστεί μια "απούσα" σελίδα, δημιουργείται ένα σφάλμα σελιδοποίησης (page fault)...
- ...και το ΛΣ τη φορτώνει σε ένα πλαίσιο στη μνήμη
- Ενδεχομένως εκτοπίζοντας πίσω στον δίσκο μια άλλη σελίδα από τη μνήμη
  - Η τελευταία σημειώνεται ως "απούσα"
- Page faults: μεγάλο κόστος σε κύκλους αναμονής
  - 1-10Μκύκλοι

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών - "Εικονική Μνήμη"

16

#### Κρίσιμα σημεία στη σχεδίαση εικονικής μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Ακόμα και μικρή

μείωση στην

εμφάνιση page

faults μπορεί να

έχει σημαντικό

όφελος για την

απόδοση του συστήματος Οι σελίδες πρέπει να έχουν ικανό μέγεθος

- Για εξισορρόπηση του κόστους προσπέλασης του δίσκου
- Η μείωση των page faults είναι επιβεβλημένη
  - Οι σελίδες τοποθετούνται οπουδήποτε μέσα στη μνήμη
    - Σχήμα ανάλογο των fully-associative κρυφών μνημών
- Η διαχείριση της εικονικής μνήμης γίνεται από λογισμικό (ΛΣ)
  - Μικρή επιβάρυνση συγκρινόμενη με χρόνο μετακίνησης σελίδων στους δίσκους
  - Δυνατότητα χρήσης πολυπλοκότερων αλγορίθμων για τοποθέτηση-αντικατάσταση σελίδων στη μνήμη
- Δεν είναι δυνατή η ενημέρωση στον δίσκο με κάθε εγγραφή νέων δεδομένων στη σελίδα

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – "Εικονική Μνήμη"

17

#### Πίνακας σελίδων

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Τι συμβαίνει στην

πολλαπλών

προγραμμάτων;

- Πού βρίσκεται;
  - Στην κύρια μνήμη!
- Πόσες θέσεις διαθέτει;
  - Θεωρητικά: ίσες με τον μέγιστο αριθμό σελίδων
     Για 2<sup>20</sup> σελίδες με 4 bytes ανά γραμμή, απαιτούνται 4MB
  - Πρακτικά: πίνακες πολλαπλών επιπέδων
  - Πιθανόν: σελιδοποίηση πινάκων (!)
    - Αρκεί να υπάρχει πάντα στη μνήμη ένα μέρος του πίνακα

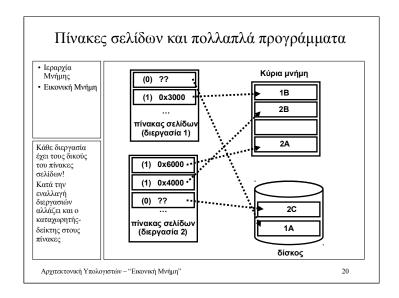
#### Ποια πρόσθετη πληροφορία χρειάζεται;

- Βρίσκεται η σελίδα στη μνήμη; Έχει αλλάξει;
- Αν όχι, σε ποιο σημείο του δίσκου είναι;
- Συχνά η πληροφορία αυτή φυλάσσεται μέσα στον πίνακα σελίδων
- Ποια σελίδα βρίσκεται σε κάθε πλαίσιο μνήμης;
- Πόσο πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε;
  - Δομές του ΛΣ για αλγόριθμο αντικατάστασης σελίδων

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών - "Εικονική Μνήμη"

19

#### Μετάφραση εικονικών διευθύνσεων • Ιεραρχία εικονική διεύθυνση Κύρια μνήμη Μνήμης 0x3000 0x000013F0 • Εικονική Μνήμη D 0x4000 В φυσική (1) 0x2000 0x5000 0x63F0 (1) 0x6000 0x6000 Α 2 (0) ?? (1) 0x3000 Presence bit: βρίσκεται η σελίδα στην κύρια μνήμη; πίνακας σελίδων (page table) δίσκος Αρχιτεκτονική Υπολογιστών - "Εικονική Μνήμη" 18



#### Translation-Lookaside Buffer

- Ιεραρχία
- Εικονική Μνήμη
- Το πρόβλημα με τους πίνακες σελίδων
  - Βρίσκονται στην κύρια μνήμη
  - Για κάθε προσπέλαση μνήμης απαιτείται μια δεύτερη!
    - Για τον πίνακα σελίδων
    - Μη αποδεκτή χρονική επιβάρυνση!
- Translation-Lookaside Buffer (TLB)
- Μικρή "κρυφή μνήμη" για πρόσφατες μεταφράσεις εικονικών διευθύνσεων
  - Μέσα στον επεξεργαστή
  - 16-512 θέσεις, 1-2 γραμμές του πίνακα σελίδων ανά
  - Προσπέλαση < 1 κύκλο ρολογιού
  - Παρατηρούμενο Miss rate: 0.01% 1%

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – "Εικονική Μνήμη"

21

### Εικονική Μνήμη και Προστασία Προσπέλασης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη
- Προστασία προσπέλασης σελίδων
  - Με διαφορετικούς πίνακες σελίδων ανά διεργασία είναι αδύνατη η προσπέλαση "ξένων" σελίδων
  - Δικαιώματα προσπέλασης ανά σελίδα
  - User mode και Supervisor Mode
    - Σε user mode δεν είναι δυνατή η προσπέλαση του TLB, του πίνακα σελίδων και των αντίστοιχων καταχωρητών
    - Υπάρχουν αρχιτεκτονικές με περισσότερα από 2 επίπεδα
  - Ελεγχόμενη προσπέλαση συναρτήσεων ΛΣ
    - Call gates: ελεγχόμενη εκτέλεση συναρτήσεων ΔΣ από χρήστη, στο επίπεδο όμως των προνομίων του χρήστη → δεν είναι δυνατή η προσπέλαση "ξένων" δεδομένων!

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών - "Εικονική Μνήμη"

23

#### Προσπέλαση μνήμης: η συνολική εικόνα • Ιεραρχία Μνήμης • Εικονική Μνήμη TLB Κρυφή μνήμη δεδομένα, cache hit δεδομένα, cache miss KME Στο σχήμα η κρυφή μνήμη δέχεται φυσικές μετάφραση, TLB miss διευθύνσεις. Υπάρχουν αρχιτεκτονικές με εικονική κρυφή μνήμη ή συνδυασμό εικονικής-φυσικής πίνακας σελίδων (στην κύρια μνήμη) κρυφής μνήμης Κύρια μνήμη Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – "Εικονική Μνήμη" 22