

Εικονική Μνήμη

(και ο ρόλος της στην ιεραρχία μνήμης)

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



Μ.Στεφανιδάκης

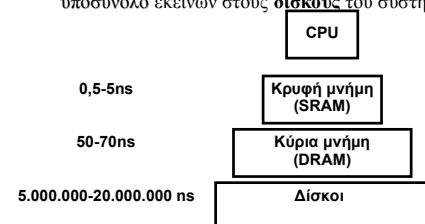
Επεκτείνοντας την Ιεραρχία Μνήμης

• Ιεραρχία Μνήμης

• Εννοιολογικά:

- Κάθε υψηλότερο επίπεδο δρα ως «κρυφή μνήμη» για το αμέσως χαμηλότερο
- Η **κύρια μνήμη** λειτουργεί ως «κρυφή μνήμη» των **δίσκων**
- Τα περιεχόμενα στην **κύρια μνήμη** είναι υποσύνολο εκείνων στους **δίσκους** του συστήματος

Επέκταση
ιεραρχίας εκτός
του συστήματος:
δικτυακές θέσεις
αποθήκευσης



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Εικονική Μνήμη”

2

Εικονική μνήμη (virtual memory)

• Ιεραρχία Μνήμης • Εικονική Μνήμη

• 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
 - Πιθανότητα αντικαθιστώντας άλλα τμήματα δεδομένων
 - Τα τελευταία μεταφέρονται πίσω στους δίσκους

Το πρώτο σύστημα εικονικής μνήμης παρουσιάστηκε το 1962 (Atlas computer)

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Εικονική Μνήμη”

3

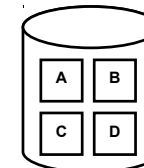
Πριν την εικονική μνήμη: overlays

• Ιεραρχία Μνήμης • Εικονική Μνήμη

Κύρια μνήμη

```
main() {  
  swap-in(D)  
  call D1  
  
  swap-in(B)  
  call B2  
}
```

δίσκος



- Καταλληλότερο για στατικά δεδομένα
 - υποπρογράμματα

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Εικονική Μνήμη”

4

Πριν την εικονική μνήμη: overlays

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η τεχνική των overlays απαιτούσε από τον προγραμματιστή να χειρίζεται τις λεπτομέρειες (π.χ. διευθύνσεις!) φόρτωσης και κλήσης των υποπρογραμμάτων!

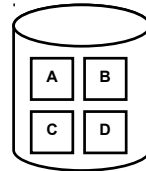
Κύρια μνήμη

```
main() {
    swap-in(D) ←
    call D1

    swap-in(B)
    Call B2
}

D1() {
    ...
}
```

δίσκος



- Καταλληλότερο για στατικά δεδομένα
 - υποπρογράμματα

Πριν την εικονική μνήμη: overlays

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η τεχνική των overlays απαιτούσε από τον προγραμματιστή να χειρίζεται τις λεπτομέρειες (π.χ. διευθύνσεις!) φόρτωσης και κλήσης των υποπρογραμμάτων!

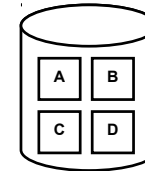
Κύρια μνήμη

```
main() {
    swap-in(D) ←
    call D1

    swap-in(B) ←
    Call B2
}

B2() {
    ...
}
```

δίσκος



- Καταλληλότερο για στατικά δεδομένα
 - υποπρογράμματα

Χώρος διευθύνσεων προγράμματος

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Ποιες οι διευθύνσεις που δημιουργούσε ο μεταγλωττιστής; Τι συνέβαινε αν το πρόγραμμα δεν φορτωνόταν πάντοτε στον ίδιο χώρο μνήμης;

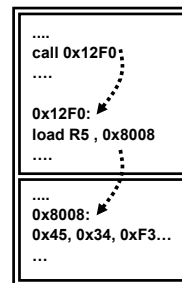
Address Space

- Εκτελούμενο πρόγραμμα στη μνήμη:
 - Διευθύνσεις κώδικα
 - Εντολές διακλάδωσης
 - Διευθύνσεις δεδομένων
 - Εντολές load-store

Πριν την εικονική μνήμη:

- Φυσικές διευθύνσεις
- Άμεση αντιστοιχία με διευθύνσεις κύριας μνήμης

Κύρια μνήμη



Πολυπρογραμματισμός πριν την εικονική μνήμη

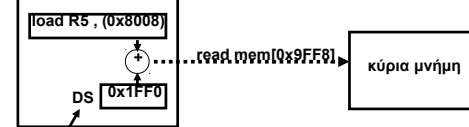
- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Χρήση καταχωρητών βάσης (χωρίς άλλη υποστήριξη) σε χαμηλού κόστους επεξεργαστές (π.χ. Intel 8086). Διευκόλυνση τοποθέτησης προγραμμάτων οπουδήποτε στη μνήμη.

KME



KME



καταχωρητής βάσης τμήματος δεδομένων (data segment)

- Καταχωρητές βάσης για κώδικα και δεδομένα
- Αλλαγή τιμής καταχωρητών βάσης ανά πρόγραμμα

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 = λογική 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
 - χωρίς περαιτέρω υποστήριξη όμως!

Εικονικές Διευθύνσεις

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Ο κύριος ρόλος της εικονικής μνήμης στα σημερινά υπολογιστικά συστήματα, με την άφθονη κύρια μνήμη, είναι η υποστήριξη και προστασία των εικονικών χώρων διευθύνσεων ανά πρόγραμμα



Μηχανισμός μετάφρασης εικονικών διευθύνσεων σε φυσικές διευθύνσεις

- Μετάφραση εικονικών διευθύνσεων προγραμμάτων
- Προστασία χώρων διευθύνσεων
 - Προνόμια προσπέλασης μνήμης
- Απαιτείται συνδυασμένη υποστήριξη από ΚΜΕ, κρυφή μνήμη και λειτουργικό σύστημα

Η εικονική μνήμη (ξανά)

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η διαχείριση της εικονικής μνήμης έχει ομοιότητες με τη διαχείριση κρυφής-κύριας μνήμης. Τα δύο επίπεδα εδώ όμως (μνήμη-δίσκοι) έχουν σημαντικές διαφορές στα χαρακτηριστικά τους

• Ποιος ο ρόλος της;

1. 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)

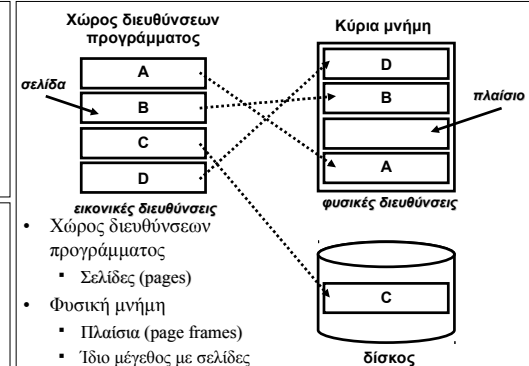
• Πώς υλοποιείται;

- Μετακίνηση τμημάτων μνήμης από/προς τους δίσκους
- Εκμετάλλευση αρχής τοπικότητας
 - Μερικά μέρη μόνο των προγραμμάτων είναι «ενεργά» κάθε στιγμή

Βασικό σχήμα Εικονικής Μνήμης

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Σελιδοποίηση (paging):
Το μέγεθος των σελίδων καθορίζεται από τους μηχανισμούς του υλικού. Συνήθη μεγέθη 4KB έως 2MB



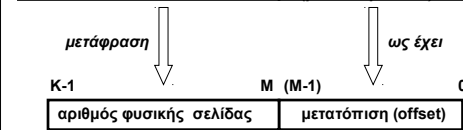
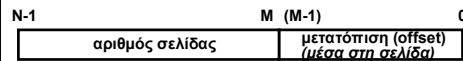
- Χώρος διευθύνσεων προγράμματος
 - Σελίδες (pages)
- Φυσική μνήμη
 - Πλαίσια (page frames)
 - Ίδιο μέγεθος με σελίδες

Σελίδες και εικονικές διευθύνσεις

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

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

Ο επεξεργαστής παράγει εικονική διεύθυνση



Στη μνήμη στέλνεται φυσική διεύθυνση

- Ο επεξεργαστής μπορεί να παράγει έως και 2^N εικονικές διευθύνσεις
- Η φυσική μνήμη μπορεί να έχει έως 2^K διευθύνσεις
- Το μέγεθος σελίδας είναι 2^M bytes

Χαρακτηριστικά Σελίδων

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

- Σταθερό μέγεθος (4KB-2MB)
- Για την προσπέλαση οποιασδήποτε θέσης μνήμης της σελίδας απαιτείται μία λέξη εικονικής διεύθυνσης (page+offset)
- Ευκολία τοποθέτησης και αντικατάστασης σελίδων στην κύρια μνήμη
- Βέλτιστο μέγεθος για μεταφορά από-προς δίσκο
- Ενδεχομένως ένα μέρος της σελίδας μένει αχρησιμοποίητο

Σελιδοποίηση κατ'απαίτηση

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Η μεγάλη επιβάρυνση για τη μετακίνηση των σελίδων από και προς τον δίσκο είναι καθοριστική για την απόδοση ενός συστήματος

- 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

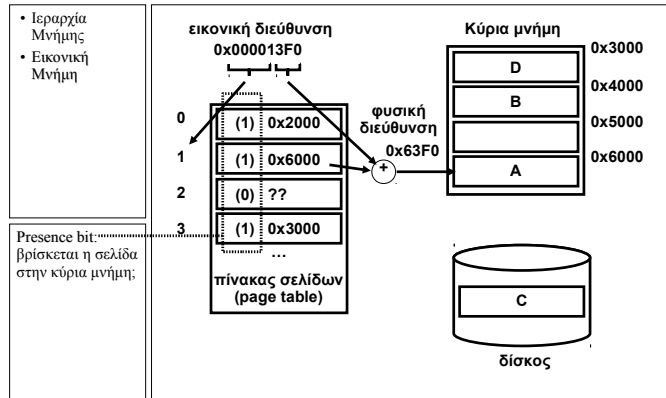
Κρίσιμα σημεία στη σχεδίαση εικονικής μνήμης

- 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

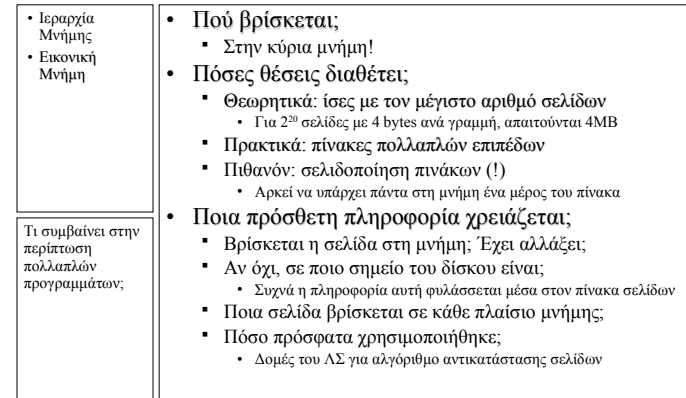
Μετάφραση εικονικών διευθύνσεων



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Εικονική Μνήμη”

17

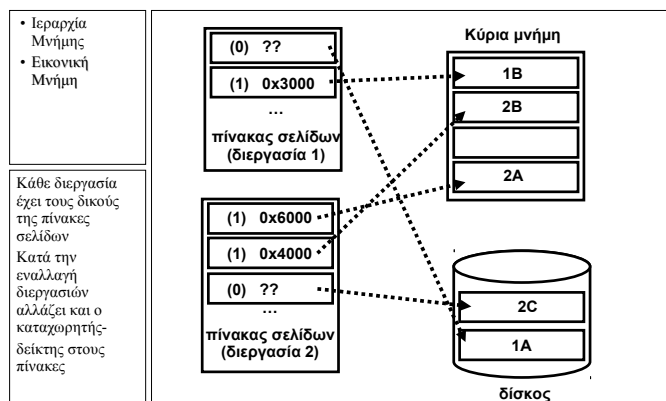
Πίνακας σελίδων



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Εικονική Μνήμη”

18

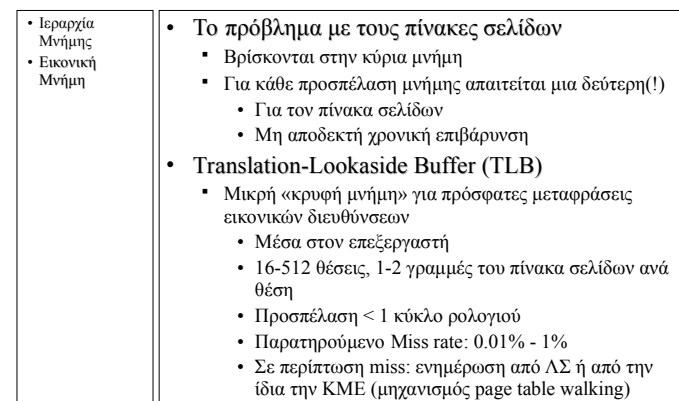
Πίνακες σελίδων και πολλαπλά προγράμματα



Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Εικονική Μνήμη”

19

Translation-Lookaside Buffer



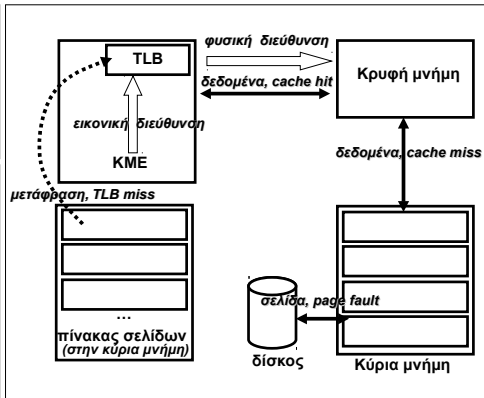
Αρχιτεκτονική Υπολογιστών – “Εικονική Μνήμη”

20

Προσπέλαση μνήμης: η συνολική εικόνα

- Ιεραρχία Μνήμης
- Εικονική Μνήμη

Στο σχήμα η κρυφή μνήμη δέχεται φυσικές διευθύνσεις. Υπάρχουν αρχιτεκτονικές με εικονική κρυφή μνήμη ή συνδυασμό εικονικής-φυσικής κρυφής μνήμης



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 συστήματος
 - Υπάρχουν αρχιτεκτονικές με περισσότερα από 2 επίπεδα προνομίων
- Ελεγχόμενη προσπέλαση συναρτήσεων ΛΣ
 - Call gates: ελεγχόμενη εκτέλεση συναρτήσεων ΛΣ από χρήστη, στο επίπεδο όμως των προνομίων του χρήστη → δεν είναι δυνατή η προσπέλαση «ξένων» δεδομένων!