Ιόνιο Πανεπιστήμιο – Τμήμα Πληροφορικής

Αρχιτεκτονική Υπολογιστών

Συναρτήσεις

(Κλήσεις και επιστροφές από συναρτήσεις)

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

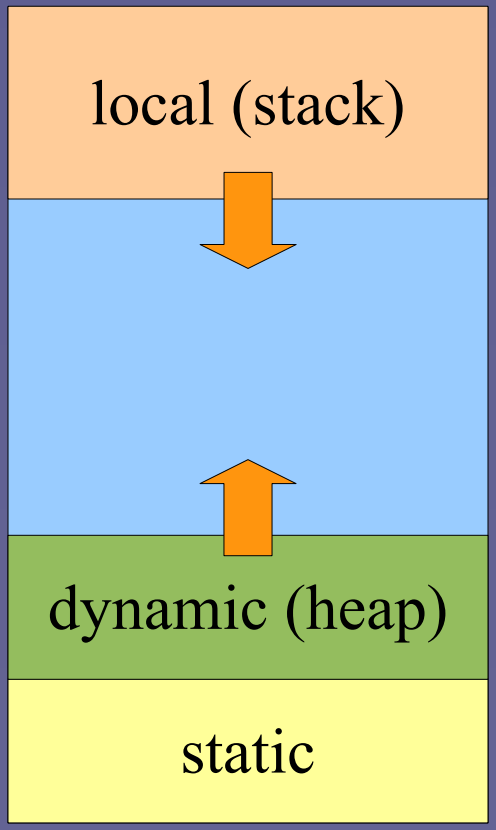
Μ.Στεφανιδάκης

Χώροι διευθύνσεων

- Στις δομημένες γλώσσες προγραμματισμού
- Δεδομένα
  - Στατικές μεταβλητές (static)
  - Τοπικές μεταβλητές (local)
  - Heap (δέσμευση με malloc)
- Εκτελέσιμος κώδικας προγράμματος
  - Εντολές μηχανής
    - Παραδοσιακά το τμήμα αυτό ονομάζεται “text”

Τυπική οργάνωση χώρου δεδομένων

υψηλότερη διεύθυνση μνήμης προγράμματος



χαμηλότερη διεύθυνση μνήμης προγράμματος

(Runtime) stack

- Ο χώρος στη μνήμη για την αποθήκευση
  - Των τοπικών μεταβλητών των συναρτήσεων
  - Της διεύθυνσης επιστροφής
  - Των παραμέτρων κλήσης της συνάρτησης
  - Των επιστρεφόμενων αποτελεσμάτων
  - Στις σύγχρονες αρχιτεκτονικές πολλά από τα παραπάνω παραμένουν όσο το δυνατόν στους καταχωρητές
- Stack pointer (sp)
  - Καταχωρητής γενικού ή ειδικού σκοπού (ανάλογα με την αρχιτεκτονική ISA) που περιέχει τη διεύθυνση της κορυφής στη στοίβα
    - Όπου θα γραφούν δεδομένα (push) ή θα αναγνωστούν (pop) δεδομένα
    - Η τιμή του προσαρμόζεται κατάλληλα μετά από κάθε push/pop

Stack Frame

- Περιβάλλον εκτέλεσης μιας κλήσης συνάρτησης
  - Stack Frame ή Activation Record
  - Περιέχει το «περιβάλλον εκτέλεσης» μιας συνάρτησης
    - Τοπικές μεταβλητές
    - Παράμετροι εισόδου
    - Διεύθυνση επιστροφής
  - Κάθε κλήση συνάρτησης δημιουργεί ένα καινούργιο stack frame
- Frame pointer (fp)
  - Καταχωρητής (συνήθως γενικού σκοπού) που περιέχει τη διεύθυνση της αρχής του stack frame
  - Όλες οι προσπελάσεις σε τοπικές μεταβλητές γίνονται σε σχέση με την τρέχουσα τιμή του fp

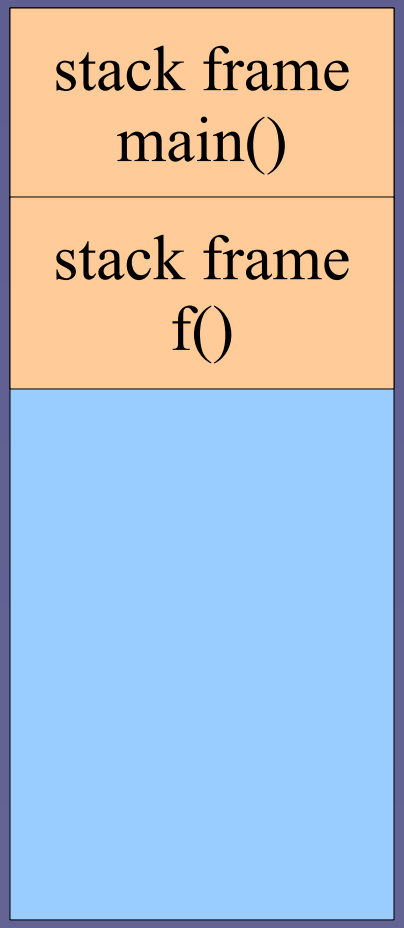
Stack frames (Activation records)

εκτελείται η main()

Stack frames (Activation records)

εκτελείται η main()

η main() καλεί την f()

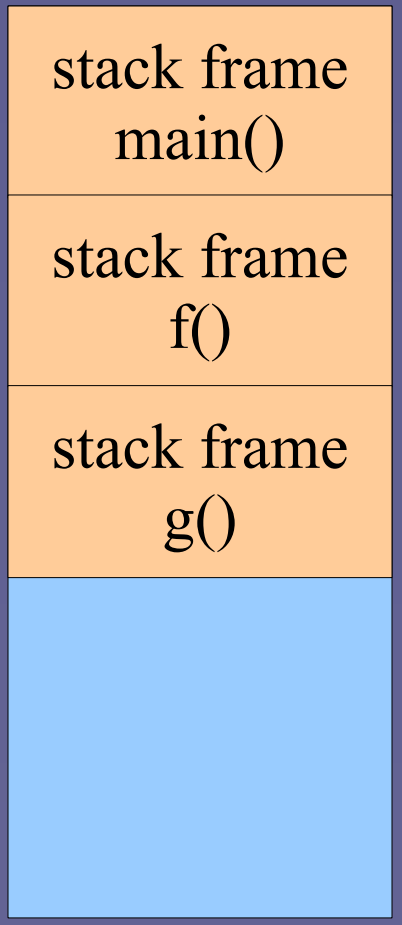


Stack frames (Activation records)

εκτελείται η main()

η main() καλεί την f()

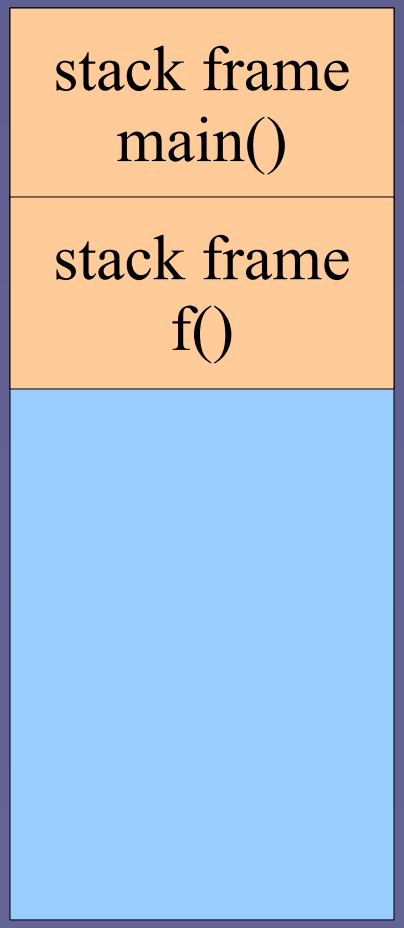
η f() καλεί την g()



Stack frames (Activation records)

εκτελείται η main()

η main() καλεί την f()



η g() επιστρέφει στην f()

Stack frames (Activation records)

εκτελείται η main()

η main() καλεί την f()

η f() επιστρέφει στην main()

η g() επιστρέφει στην f()

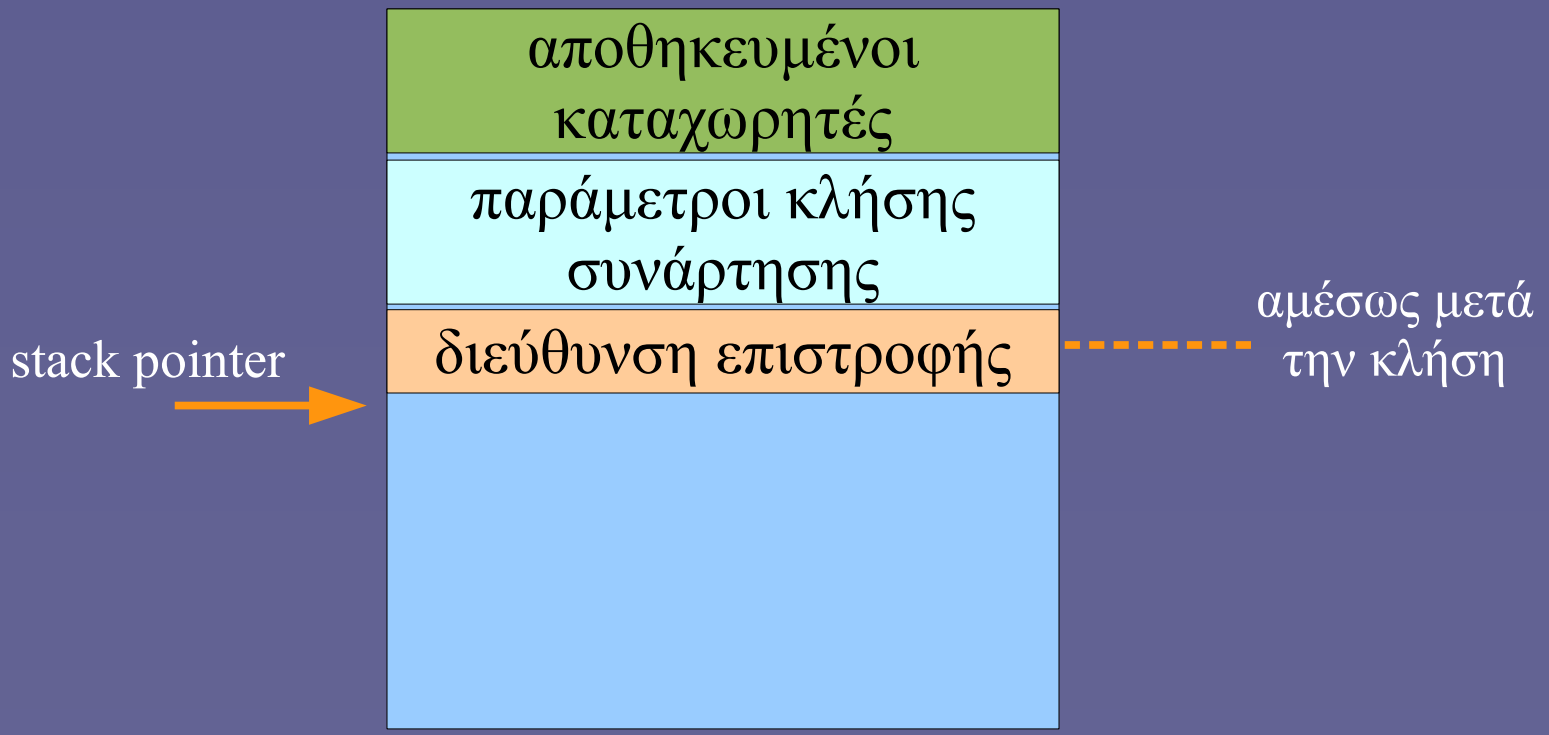
Διαδικασία κλήσης συνάρτησης (1)

- Η καλούσα συνάρτηση
  - Αποθηκεύει καταχωρητές που πιθανόν να αλλάξει η καλούμενη συνάρτηση
  - Περνάει τις παραμέτρους κλήσης στο stack frame (ή σε καταχωρητές)
  - Χρησιμοποιεί εντολή μηχανής τύπου “call”
    - Διακλάδωση στην καλούμενη συνάρτηση
    - Με ταυτόχρονη αποθήκευση της διεύθυνσης επιστροφής (stack frame ή καταχωρητές)
- Μετά την επιστροφή
  - Αποκατάσταση τιμών καταχωρητών, αποδέσμευση χώρου stack

Διαδικασία κλήσης συνάρτησης (2)

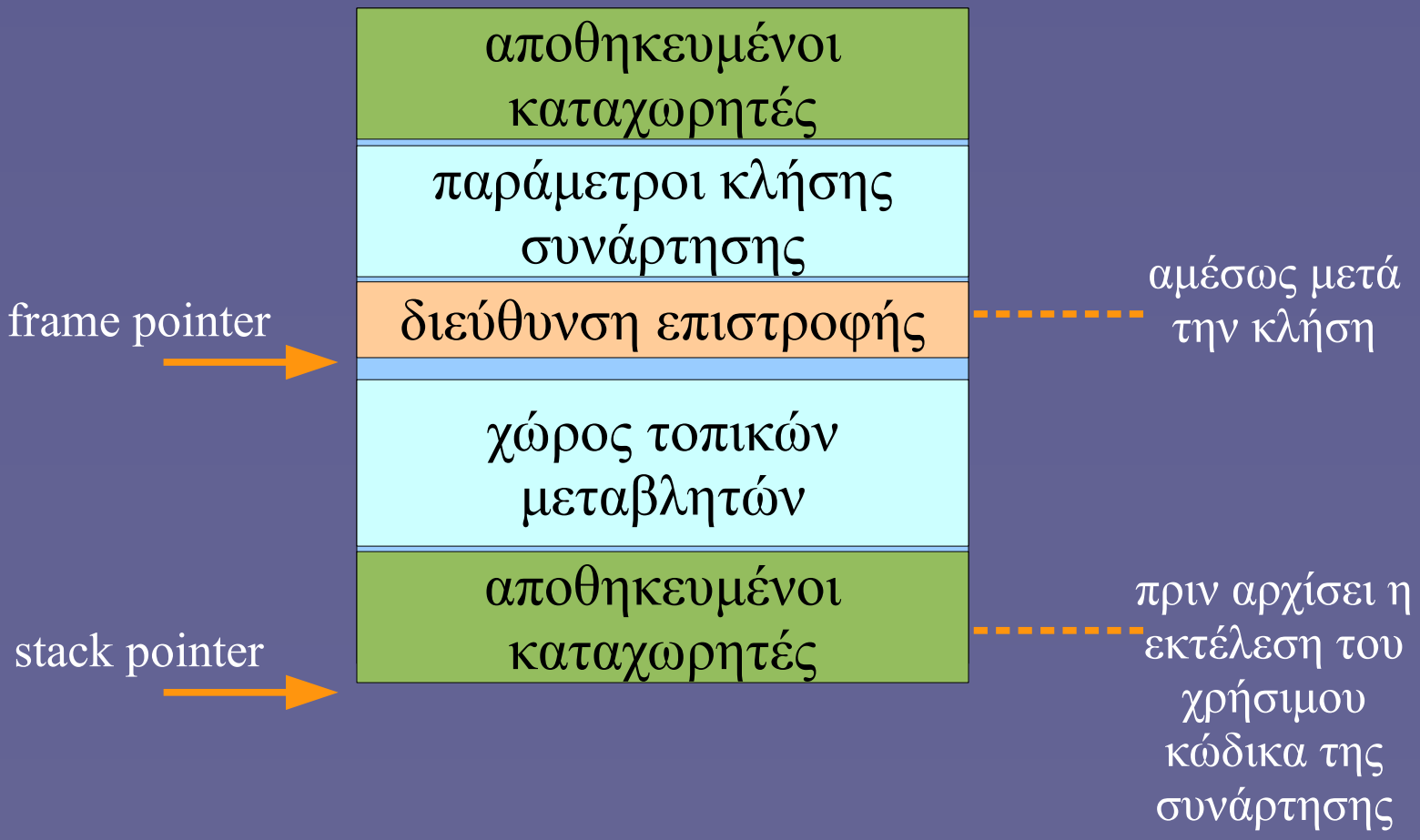
- Η καλούμενη συνάρτηση
  - Δημιουργεί χώρο για τις τοπικές μεταβλητές στο stack
  - Υπολογίζει τη νέα τιμή του fp και αποθηκεύει την παλιά
  - Αποθηκεύει καταχωρητές που πιθανόν να αλλάξει
- Στη συνέχεια εκτελείται ο κώδικας της συνάρτησης
- Πριν το τέλος
  - Αποδέσμευση χώρου τοπικών μεταβλητών, αποκατάσταση τιμών καταχωρητών, fp
  - Χρήση εντολής μηχανής τύπου “return”
    - Διακλάδωση στην αποθηκευμένη διεύθυνση επιστροφής

Παράδειγμα stack frame
(η συνάρτηση μόλις έχει κληθεί)



Παράδειγμα stack frame

(κατά την έναρξη εκτέλεσης του χρήσιμου κώδικα της συνάρτησης)



“Calling convention”

- Ο ακριβής τρόπος κλήσης των συναρτήσεων
  - Ποιες εντολές και ποιοι καταχωρητές χρησιμοποιούνται
  - Η ακολουθία ενεργειών πριν και μετά την κλήση/επιστροφή
  - Πώς είναι η ακριβής μορφή του stack frame
- Εξαρτάται από την αρχιτεκτονική (ISA) και το λειτουργικό σύστημα

Συναρτήσεις και RISC-V ISA

- Δεν υπάρχουν ειδικοί καταχωρητές για τη στοίβα
- Συγκεκριμένοι καταχωρητές γενικού σκοπού χρησιμοποιούνται «κατά σύμβαση» κατά την κλήση των συναρτήσεων
  - x1 → ra (return address)
  - x2 → sp (stack pointer)
  - x8 → fp (ή s0) (frame pointer)
  - x10-x17 → a0-a7 (argument registers, ορίσματα και επιστρεφόμενη τιμή

Συναρτήσεις και RISC-V ISA

- «Κατά σύμβαση» η καλούμενη συνάρτηση πρέπει να διατηρήσει την τιμή ορισμένων καταχωρητών
  - Να τους αποθηκεύσει και να τους αποκαταστήσει στην αρχική τιμή πριν επιστρέψει
  - sp, fp και ορισμένοι άλλοι καταχωρητές
  - Ο κώδικας που εκτελεί τα παραπάνω ονομάζεται «πρόλογος» και «επίλογος» της συνάρτησης
    - Περικλείει τον κώδικα του χρήστη στη συνάρτηση

Εντολές κλήσης και επιστροφής

- Κλήση συνάρτησης με εντολή jal (jump and link)
  - jal ra, funcaddr (ψευδοεντολή call funcaddr)
  - ra ← pc + 4 (next instruction), pc ← pc ± offset to funcaddr
- Επιστροφή με εντολή jalr (jump and link register)
  - jalr x0, ra, 0 (ψευδοεντολή jr ra ή ret)
  - x0 ← pc + 4 (next instruction), pc ← ra ± 0

Διαχείριση στοίβας

- Η στοίβα «μεγαλώνει» προς χαμηλότερες διευθύνσεις
  - π.χ. addi sp, sp, -32 (δέσμευση χώρου για stack frame)
  - και addi sp, sp, 32 (αποδέσμευση χώρου stack frame πριν την επιστροφή)
- Η προσπέλαση των τοπικών μεταβλητών της συνάρτησης γίνεται με τη βοήθεια του fp (ή αλλιώς, s0)
  - π.χ. sw a1, -20(s0)
    - λειτουργία: a1 → mem[s0 - 20]