Εισαγωγή στο xv6 Kernel & Προσθήκη System Call

Χρήστος Φείδας
fidas@upatras.gr

Ευάγγελος Λάμπρου
e.lamprou@upnet.gr

University of Patras

1 Εισαγωγή

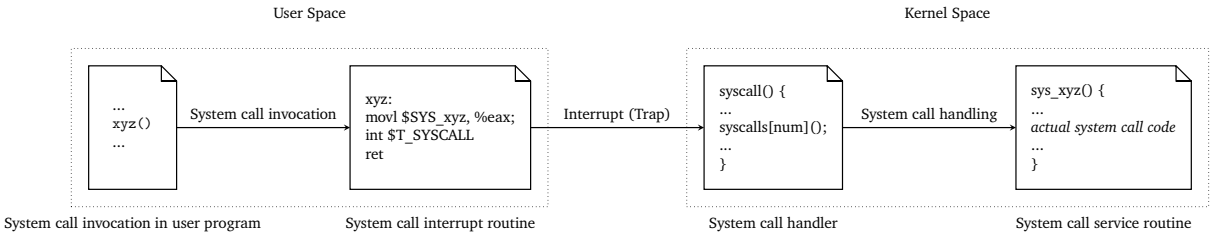
Ο πυρήνας xv6 (xv6 kernel) [2] είναι μια μικρή υλοποίηση ενός πυρήνα λειτουργικού συστήματος βασισμένο στο λειτουργικό σύστημα Unix v6. Είναι ένας πολύ καλός τρόπος αρχάριοι μηχανικοί συστημάτων να εξοικιωθούν με την ανάγνωση και συγγραφή κώδικα λειτουργικών συστημάτων. Ολόκληρο το πρότζεκτ έχει έκταση ~ 6000 γραμμών `C`, με μέρος του κώδικα γραμμένο σε `assembly`. Υπάρχει πλούσιο περιεχόμενο online για να μελετήσετε εις βάθος τις λεπτομέρειες των λειτουργιών του πυρήνα xv6 [3, 1].

Στόχος των εργασιών αυτών είναι η εξοικοίωση με μέρη της υλοποίησης ενός πύρηνα και η πλοήγηση μέσα σε μία μεγάλη βάση κώδικα.

2 User Space & Kernel Space

Ο διαχωρισμός μεταξύ χώρου χρήστη (user space) και χώρου πυρήνα (kernel space) είναι ένας από τους σημαντικότερους μηχανισμούς που παρέχει ένα λειτουργικό σύστημα. Ο χώρος χρήστη είναι ο χώρος στον οποίο όλες οι διεργασίες του χρήστη εκτελούνται. Ο χώρος πυρήνα είναι όπου γίνονται όλες οι ευαίσθητες λειτουργίες του συστήματος, όπως η διαχείριση της μνήμης, η διαχείριση των διεργασιών, η διαχείριση των συσκευών κ.α. Ο χώρος πυρήνα είναι προστατευμένος από το χώρο χρήστη και η επικοινωνία μεταξύ των δύο γίνεται από καθορισμένα σημεία επαφής (interfaces). Ένα από αυτά τα σημεία επαφής είναι οι κλήσεις συστήματος (system calls).

Όταν μία διεργασία όπως ένας task manager τρέχει στον υπολογιστή μας, γίνεται μία «συζήτηση» μεταξύ αυτής και του πυρήνα. Η διεργασία ζητάει από τον πυρήνα πληροφορίες για τις διεργασίες και τις συσκευές που υπάρχουν στο σύστημα. Ο πυρήνας απαντάει στην διεργασία με τις πληροφορίες που ζήτησε. Αυτή η συζήτηση γίνεται μέσω των κλήσεων συστήματος. Συνύθως, οι κλήσεις συστήματος είναι «κρυμμένες» πίσω από τη βασική βιβλιοθήκη της εκάστοτε γλώσσας που χρησιμοποιούμε. (π.χ. `libc` στην `C`, όπου η συνάρτηση `printf` καλεί την κλήση συστήματος `write`).



Σχήμα 1: Η επικοινωνία εφαρμογών χρήστη με το λειτουργικό σύστημα μέσω κλήσεων συστήματος (system calls).

3 System Calls στο xv6

Η επικάλεση ενός system call από μία διεργασία στο xv6 ακολουθεί την εξής ακολουθία:

1. Ένα πρόγραμμα χρήστη καλεί μία system call (π.χ `read`)
2. Ο αριθμός που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη system call αποθηκεύεται στον καταχωρητή `EAX` και καλείται στον επεξεργαστή interrupt (trap)
3. Το λειτουργικό σύστημα αντιπετωπίζει αυτό το trap διαβάζωντας τον αριθμό του trap το οποίο καλέστηκε. Έπειτα, καλεί την αντίστοιχη system call ανάλογα με τον αριθμό που βλέπει αποθηκευμένο στον καταχωρητή `EAX`.

Παρακάτω φαίνεται ο `assembly` κώδικας ο οποίος εκτελείται όταν καλείται μία system call από μία διεργασία χρήστη. Ο ορισμός του κώδικα για την κάθε διαφορετική system call γίνεται με τη χρήση της μακροεντολής (macro) `SYSCALL`.

`ulib/usys.S`

```
#define SYSCALL(name)          \
  .globl name;                 \
  name:                        \
    movl $SYS_ ## name, %eax; \ // move SYSCALL number into EAX register
    int $T_SYSCALL;            \ // execute processor interrupt
    ret

SYSCALL(fork)
SYSCALL(exit)
SYSCALL(read)
```

Σημείωση: Ο κώδικας του xv6 που αφορά τα system calls βρίσκεται:

- Ο user-space κώδικας στα αρχεία `include/user.h` και `ulib/usys.S`
- Ο kernel-space κώδικας στα αρχεία `include/syscall.h` και `kernel/syscall.c`

4 Προετοιμασία

Για την εκπόνηση των εργασιών προτείνεται να δουλέψετε σε μηχάνημα που τρέχει Linux. Συγκεκριμένα, για την ελαχιστοποίηση των τεχνικών προβλημάτων προτείνεται να χρησιμοποιήσετε το Debian Linux distribution.

4.1 Προτεινόμενο Διάβασμα

- Διαβάστε από το βιβλίο του xv6 [1] το κεφάλαιο 1 (*Operating system organisation*) και το κεφάλαιο 3 (*Traps, interrupts, and drivers*) μέχρι την ενότητα *Drivers*.
- Δείτε το επεξηγηματικό βίντεο το οποίο εξηγεί πώς καλείται μία system call στο xv6 μέσα από μία εφαρμογή χρήστη.
- Δείτε ένα επεξηγηματικό βίντεο για το πώς λειτουργούν οι system calls στο xv6.

Σημείωση Στα δοθέντα βίντεο, ο κώδικας που παρουσιάζεται από τη RISC-V έκδοση του xv6. Η δικιά μας έκδοση είναι για την αρχιτεκτονική x86. Οι διαφορές μεταξύ των δύο εκδόσεων είναι πρακτικά αμελητέες, με μόνες εξαιρέσεις τα σημεία του πηγαίου κώδικα γραμμένα σε `assembly` όπως οι ονοματολογίες των καταχωρητών (registers).

4.2 Προετοιμασία Συστήματος

Για να σετάρετε μία εικονική μηχανή που τρέχει Debian Linux, μπορείτε να ακολουθήσετε αυτό τον οδηγό.

Αφού είστε μέσα στο Linux σύστημά σας, πρέπει να κατεβάσετε ορισμένα πακέτα που θα χρειαστείτε για την εκπόνηση των εργασιών.

Command Line

```
$ sudo apt-get install build-essential gdb git qemu qemu-utils qemu-system-x86
```

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης των εργασιών συνίσταται να κρατάτε εκδόσεις της δουλειάς σας χρησιμοποιώντας το `git` ώστε να γίνεται πιο εύκολα ο εντοπισμός λαθών μεταξύ των διαφόρων εκδόσεων του κώδικά σας. Μία σύντομη εισαγωγή για το εγαλείο μπορείτε να βρείτε εδώ.

Μέσα στον φάκελο `xv6` θα βρείτε τον πηγαίο κώδικα του xv6. Ο κώδικας είναι οργανωμένος σε φακέλους με τον εξής τρόπο:

- `kernel`: Κώδικας του πυρήνα.
- `include`: Αρχεία κεφαλίδων που χρησιμοποιούνται από τον πυρήνα και τις εφαρμογές.
- `ulib`: Βασικές βιβλιοθήκες που χρησιμοποιούνται από τις εφαρμογές χρήστη.
- `user`: Κώδικας εφαρμογών χρήστη. Αυτές είναι εφαρμογές όπως αυτές που τρέχουν σε user space και αλληλεπιδρούν με τον πυρήνα μέσω των κλήσεων συστήματος.
- `tools`: Εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση του xv6 (π.χ. `mkfs` το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του image από το οποίο θα κάνει boot το λειτουργικό σύστημα.).

5 Ασκήσεις

Άσκηση 1

Βρείτε το αρχείο στον πηγαίο κώδικα του xv6 όπου ορίζονται οι κλήσεις συστήματος οι οποίες θα είναι διαθέσιμες σε προγράμματα χρήση. Έπειτα, διαλέξτε ένα από τα προγράμματα χρήστη στον φάκελο `user`. Εξηγήστε τη λειτουργία του κάνοντας συγκεκριμένες αναφορές στα system calls που καλεί.

Άσκηση 2

Δημιουργήστε ένα πρόγραμμα χρήστη για το xv6.

Μέσα στο φάκελο `user`, δημιουργήστε ένα αρχείο με ό'τι όνομα θέλετε. Εκεί, γράψτε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα `C` το οποίο θα κάνει κάτι χρήσιμο. Δώστε προσοχή σε ποιες συναρτήσεις έχετε πρόσβαση. Εδώ, δεν μπορείτε να χρησιμοποήσετε τη βασική βιβλιοθήκη της `C` που ξέρετε αλλά τη βασική βιβλιοθήκη που έχει δημιουργηθεί για το xv6 (`ulib.c`).

Έπειτα, επεξεργαστείτε κατάλληλα το αρχείο `Makefile` ώστε να προστεθεί το πρόγραμμα στο image του xv6 κατά την κατασκευή του (πρέπει να προσθέσετε το όνομα του προγράμματός σας στη λίστα

`USER_PROGS`).

Εκτλέστε `make qemu` και χρησιμοποιήστε το πρόγραμμα που δημιουργήσατε μέσα στο xv6.

Σημείωση: Μπορείτε να βρείτε τις συναρτήσεις στις οποίες έχετε πρόσβαση σε περιβάλλον χρήστη στο αρχείο `include/user.h`.

Άσκηση 3

Αναζητώντας μέσα στον πηγαίο κώδικα του xv6, βρείτε την κλήση συστήματος `uptime`.

1. Βρείτε όλα τα σημεία του κώδικα του πυρήνα στα οποία γίνεται αναφορά σε αυτή.
2. Εξηγήστε την υλοποίησή της.

Άσκηση 4

Βρείτε τη συνάρτηση μέσα στον kernel κώδικα όπου τελικά εκτελούνται οι system calls. Καταγράψτε τη σειρά των ενεργειών που γίνονται όταν καλείται ένα system call.

Άσκηση 5

Προσθέστε μία κλήση συστήματος η οποία θα επιστρέφει τον αγαπημένο σας αριθμό. Η κλήση που θα φτιάξετε πρέπει να έχει το εξής πρωτότυπο: `int getfavnum(void)`. Μία τέτοια κλήση δεν έχει κανέναν πρακτικό σκοπό αφού δεν εκμεταλεύεται κάποια πληροφορία ή πόρο που κατέχει το λειτουργικό σύστημα. Στόχος εδώ είναι να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο προστίθενται κλήσεις συστήματος στο xv6.

Άσκηση 6

Προσθέστε μία κλήση συστήματος η οποία θα εκτελεί λειτουργία «shutdown». Η κλήση που θα φτιάξετε πρέπει να έχει το εξής πρωτότυπο: `void halt(void)`. Έπειτα, φτιάξτε ένα πρόγραμμα χρήστη με όνομα `shutdown` το οποίο θα καλεί την κλήση συστήματος που φτιάξατε, ώστε χρήστες του xv6 να μπορούν πλέον να κάνουν shutdown το σύστημα χωρίς να χρειάζεται να το κάνουν από το host μηχάνημα.

Σε αυτή τη κλήση συστήματος θα πρέπει να επικοινωνήσετε άμεσα με το hardware της εικονικής μηχανής (στην περίπτωσή μας το QEMU). Για την απενεργοποίηση του συστήματος το hardware περιμένει σε κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση (port) να υπάρξει μία συγκεκριμένη τιμή. Οι αριθμοί για αυτά τα δύο ορίζονται από τον κατασκευαστή. Οδηγίες για την τιμή που πρέπει να στείλετε σε ποια πόρτα έχουν καταγραφεί για διάφορους emulators εδώ. Εξηγήστε τη λειτουργία της συνάρτησης `outw` την οποία θα χρησιμοποιήσετε.

Σημείωση: Η συνάρτηση `outw` είναι ήδη υλοποιημένη στο xv6 και βρίσκεται στο αρχείο `include/x86.h`.

Άσκηση 7

Προσθέστε μία κλήση συστήματος η οποία θα επιστρέφει το πόσες φορές έχει εκτελεστεί μία συγκεκριμένη κλήση συστήματος η οποία θα περνιέται σαν όρισμα. Η κλήση που θα φτιάξετε πρέπει να έχει το εξής πρωτότυπο: `int getcount(int syscall)`.

Άσκηση 8

Προσθέστε μία κλήση συστήματος η οποία θα τερματίζει μια τυχαία διεργασία με πρότυπο `int killrandom(void)`.

Θα χρειαστεί να προσθέσετε μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών στο kernel. Πώς μπορείτε να βρείτε τα PID όλων των τρέχοντων διεργασιών στο σύστημα;

Σημείωση: Για να σκοτώσετε μία διεργασία δωθέντος ενός συγκεκριμένου PID μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την κλήση συστήματος `kill`.

Αναφορές

[1] Russ Cox, Frans Kaashoek και Robert Morris. *The Design of the xv6 x86 Operating System*. 2019. URL: https://pdos.csail.mit.edu/6.828/2018/xv6/book-rev10.pdf.

[2] Russ Cox, Frans Kaashoek και Robert Morris. *xv6, a simple Unix-like teaching operating system*. MIT, 2012. URL: https://pdos.csail.mit.edu/6.828/2022/xv6.html.

[3] Harry H. Porter III. *xv6 video series*. 2021. URL: https://www.youtube.com/playlist?list=PLbtzT1TYeoMhTPzyTZboW_j7TPAnjv9XB.