

Σκοπός

Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι η εξοικείωσή σας με τον προγραμματισμό συστήματος σε Unix περιβάλλον και συγκεκριμένα με τη δημιουργία νημάτων και τη δικτυακή επικοινωνία.

Θα αναπτύξετε μία multithreaded network εφαρμογή η οποία θα αναλαμβάνει την εκτέλεση εργασιών (jobs) που θα δίνονται μέσω δικτύου από το χρήστη. Η δουλειά της εφαρμογής είναι να βάζει worker threads να αναλαμβάνουν την εκτέλεση εργασιών (**jobs**) και την επιστροφή των εξόδων τους στο χρήστη, αλλά με έλεγχο του ρυθμού ροής τους (flow control). Για το λόγο αυτό, βασική έννοια είναι ο τρέχων βαθμός παραλληλίας (concurrency). Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ότι ο βαθμός παραλληλίας είναι 4. Αυτό σημαίνει ότι 4 worker threads θα δημιουργηθούν για να τρέξουν τις 4 πρώτες διαθέσιμες εργασίες που έχουν υποβληθεί στον εξυπηρέτη (ή όσες υπάρχουν, αν έχουν υποβληθεί λιγότερες από 4). Οι υπόλοιπες εργασίες που έχουν υποβληθεί θα μπαίνουν σε έναν ενταμιευτή (buffer). Αν μία εργασία από τις 4 τερματίσει, τότε θα πρέπει ένα worker thread να αρχίσει να εκτελεί την πρώτη από τον ενταμιευτή. Αν ο βαθμός παραλληλίας αλλάξει, η εφαρμογή θα προσαρμοστεί αντίστοιχα, χωρίς να σταματήσει εργασίες που ήδη τρέχουν, σε περίπτωση μείωσης του βαθμού παραλληλίας.

Όπως και στην πρώτη εργασία, η εφαρμογή θα προσφέρει τη λειτουργικότητά της στο χρήστη μέσω δύο διεργασιών,

- του jobCommander μέσω του οποίου ο χρήστης αλληλεπιδρά με την εφαρμογή και
- του jobExecutorServer που αναλαμβάνει την διαχείριση και εκτέλεση των εντολών

jobCommander (βάρος: 20%)

Ο jobCommander δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να αλληλεπιδράσει με τον jobExecutorServer μέσω απλών εντολών (commands). Οι εντολές δίνονται ως ορίσματα κατά την κλήση του jobCommander και στέλνονται μέσω διαδικτύου στον jobExecutorServer. Συγκεκριμένα, ο jobCommander θα παίρνει τα ακόλουθα ορίσματα:

```
prompt> ./jobCommmander [serverName] [portNum] [jobCommanderInputCommand]
```

Σημείωση: Να μην αλλάξετε τη σειρά

όπου:

- **serverName:** το όνομα μηχανήματος που τρέχει ο jobExecutorServer στον οποίο θα συνδεθεί. Θα πρέπει να γίνεται resolve το name, όχι IPs.
- **portNum:** αριθμός θύρας που ακούει ο jobExecutorServer
- **jobCommanderInputCommand:** μια από τις εντολές που δέχεται ο jobCommander με τη μορφή που περιγράφεται παρακάτω.

Ο κύκλος ζωής του jobCommander είναι μία μόνο εντολή (command). Δηλαδή, η εκτέλεσή του ολοκληρώνεται όταν μεταβιβάσει με επιτυχία την εντολή στον jobExecutorServer και λάβει το μήνυμα απάντησης (το οποίο συμπεριλαμβάνει πιθανόν την έξοδο της εργασίας στην περίπτωση της issueJob) από τον jobExecutorServer.

Οι εντολές του jobCommander είναι οι ακόλουθες (ίδιες αλλά απλοποιημένες από την πρώτη εργασία). Παρακαλείσθε για την χρήση των εντολών όπως ακριβώς προδιαγράφονται ώστε να περνούν από πιθανά scripts που θα χρησιμοποιηθούν κατά την εξέταση. Δε θα βαθμολογηθούν εντολές με διαφορετικές προδιαγραφές.

issueJob <job>:

Μέσω αυτής της εντολής εισάγονται εργασίες (jobs) στο σύστημα που πρόκειται να εκτελεστούν. Η εργασία είναι μια συνηθισμένη γραμμή εντολών Unix. Ο jobExecutorServer αναθέτει ένα μοναδικό αναγνωριστικό <jobID, job> στην εργασία. Το jobID θα πρέπει να ακολουθεί το πρότυπο **job_XX** όπου XX ένας αύξων μοναδικός αριθμός (χωρίς leading zeros) που αυξάνεται για κάθε νέα εργασία που δέχεται ο jobExecutorServer. Επιστρέφεται μήνυμα στον jobCommander ως εξής:

```
JOB <jobID, job> SUBMITTED
```

και στη συνέχεια, επιστρέφεται η έξοδος της εντολής όταν τρέξει και τερματίσει.

Όπως θα δείτε και παρακάτω στην ανάλυση της λειτουργικότητας για τις ομάδες νημάτων, το μήνυμα "JOB <jobID, job> SUBMITTED" και η έξοδος της εργασίας που έχει υποβληθεί για εκτέλεση θα ερθουν ασύγχρονα στον πελάτη (αλλωστε αποστέλλονται από διαφορετικά νήματα). Ο πελάτης job Commander θα περιμένει και τα δύο για να τερματίσει.

Ο jobCommander εκτυπώνει το μήνυμα και την έξοδο της εργασίας στην κονσόλα με τη σειρά και τον χρόνο που του έρχονται σε αυτόν.

setConcurrency <N>:

Η παράμετρος αυτή θέτει το βαθμό παραλληλίας, δηλαδή το μέγιστο αριθμό ενεργών νημάτων (worker threads) που εκτελούν εργασίες ανά πάσα χρονική στιγμή. Η προκαθορισμένη τιμή είναι 1. Η εντολή μπορεί να αποσταλεί και κατά τη διάρκεια εκτέλεσης εργασιών και θα αλλάξει τη συμπεριφορά του εξυπηρέτη από την λήψη της και μετά. Επιστρέφεται μήνυμα στον jobCommander ως εξής

```
CONCURRENCY SET AT N
```

Ο jobCommander εκτυπώνει το μήνυμα στην κονσόλα.

stop <jobID>:

Αφαιρείται από τον ενταμιευτή των υπό εκτέλεση εργασιών, η εργασία με το συγκεκριμένο αναγνωριστικό jobID. (Σε αντίθεση με την πρώτη εργασία, η εντολή stop είναι μόνο για εργασίες στον ενταμιευτή. Εργασίες που ήδη εκτελούνται θα τις αφήνουμε να τερματίζουν κανονικά). Επιστρέφεται μήνυμα στον jobCommander ως εξής:

JOB <jobID> REMOVED

ή

JOB <jobID> NOTFOUND

αν δε βρέθηκε στον ενταμιευτή (δεν ενδιαφέρει αν είναι λάθος, τρέχει ή έχει ήδη τρέξει.)

Ο jobCommander εκτυπώνει το μήνυμα στην κονσόλα.

poll:

Για κάθε εργασία που είναι σε κατάσταση αναμονής (queued) δηλαδή στον ενταμιευτή, επιστρέφει το ζεύγος <jobID,job> το οποίο ο jobCommander εκτυπώνει στην κονσόλα. (Όπως με την εντολή stop, η εντολή poll είναι μόνο για εργασίες στον ενταμιευτή).

Ο jobCommander εκτυπώνει τα ζεύγη, ένα ανά γραμμή, στην κονσόλα.

exit:

Τερματίζεται η λειτουργία του jobExecutorServer. Ο jobExecutorServer πριν τερματίσει επιστρέφει στον jobCommander το μήνυμα:

SERVER TERMINATED

Ο jobCommander εκτυπώνει το μήνυμα στην κονσόλα.

Σενάριο εκτέλεσης

Ακολουθεί ένα σενάριο εκτέλεσης του jobCommander:

```
jobCommander linux01.di.uoa.gr 2035 issueJob ls -l
/path/to/directory1

jobCommander linux01.di.uoa.gr 2035 setConcurrency 2

jobCommander linux01.di.uoa.gr 2035 issueJob wget aUrl

jobCommander linux01.di.uoa.gr 2035 issueJob grep "keyword"
/path/to/file1

jobCommander linux01.di.uoa.gr 2035 issueJob cat /path/to/file2

jobCommander linux01.di.uoa.gr 2035 issueJob ./progDelay 20

jobCommander linux01.di.uoa.gr 2035 issueJob ./executable arg1
arg2

jobCommander linux01.di.uoa.gr 2035 poll
```

```
jobCommander linux01.di.uoa.gr 2035 stop job_1  
jobCommander linux01.di.uoa.gr 2035 stop job_15  
jobCommander linux01.di.uoa.gr 2035 exit
```

Multi-threaded network jobExecutorServer (βάρος: 80%)

Ο πολυνηματικός εξυπηρετητής δικτύου(σε γλώσσα C) που θα ονομάσετε jobExecutorServer θα εκτελείται από τη γραμμή εντολής ως εξής:

```
prompt> jobExecutorServer [portnum] [bufferSize] [threadPoolSize]
```

όπου τα ορίσματα είναι:

- **portnum:** ο αριθμός θύρας που ακούει ο εξυπηρετητής.
- **bufferSize:** το μέγεθος ενός ενταμιευτή που θα κρατάει τα στοιχεία των πελατών που περιμένουν να εξυπηρετηθούν. Πρέπει να είναι > 0.
- **threadPoolSize:** Ο συνολικός αριθμός των worker threads στο thread pool.

Για παράδειγμα, αν τρέξετε το πρόγραμμα σας με τα ακόλουθα ορίσματα:

```
prompt> jobExecutorServer 7856 8 5
```

τότε ο εξυπηρετητής θα ακούει στη θύρα 7856 και θα κατασκευάσει/χρησιμοποιήσει έναν ενταμιευτή που κρατάει μέχρι 8 συνδέσεις/εργασίες που περιμένουν εξυπηρέτηση. Επίσης θα δημιουργηθούν 5 worker threads στο thread pool

Ο jobExecutorServer θα έχει τρία είδη νημάτων, το αρχικό

- **main thread**
- **controller threads** και
- **worker threads**

Main thread

Το αρχικό main thread θα δημιουργεί threadPoolSize worker threads. Θα ακούει για συνδέσεις από jobCommander πελάτες, δηλαδή θα δέχεται συνδέσεις με την accept κλήση συστήματος. Όταν συνδέεται ένας jobCommander πελάτης το main thread θα δημιουργεί ένα controller thread.

Controller threads

Τα controller threads μπορεί να είναι παραπάνω από ένα. Κάθε φορά που πραγματοποιείται μία σύνδεση ξεκινά ένα νέο Controller thread το οποίο κάποια στιγμή - όταν ολοκληρώσει την δράση του - θα τελειώσει. Το κάθε controller thread θα διαβάζει από τη σύνδεση την εντολή του πελάτη `jobCommander` και θα εκτελεί την εντολή ή θα εισάγει στον κοινόχρηστο buffer την εργασία για εκτέλεση, όπως περιγράφεται παρακάτω για την κάθε τύπο εντολής:

Λειτουργία Controller thread για εντολή `issueJob`

Το controller thread θα δημιουργεί ένα μοναδικό `jobID` για την εργασία που ζητάει ο πελάτης να τρέξει και θα τοποθετεί σε έναν ενταμιευτή συγκεκριμένου μεγέθους (που ορίζεται από το `bufferSize`) την τριπλετα `<jobID, job, clientSocket>`, όπου το `jobID` είναι το μοναδικό αναγνωριστικό για την εργασία που ζητάει ο πελάτης, το `job` είναι η συγκεκριμένη εργασία, και το `clientSocket` είναι ο περιγραφέας αρχείου (file descriptor) για το socket που επιστρέφει η `accept()` για επικοινωνία με τον συγκεκριμένο πελάτη. Στη συνέχεια το controller thread επιστρέφει στον πελάτη το μήνυμα:

JOB `<jobID, job>` SUBMITTED

Λειτουργία Controller thread για εντολή `setConcurrency`

Το controller thread ενημερώνει την τιμή μιας κοινόχρηστης μεταβλητής `concurrencyLevel` που αρχικά έχει τιμή 1.

Στέλνει στον πελάτη το μήνυμα

CONCURRENCY SET AT N

Λειτουργία Controller thread για εντολή `stop`

Αν το αίτημα είναι **stop** `<jobID>`, το controller thread αφαιρεί το αντίστοιχο job από την κοινόχρηστη ουρά και στέλνει στον πελάτη το μήνυμα

JOB `<jobID>` REMOVED

ή

JOB `<jobID>` NOTFOUND όπως περιγράφηκε ανωτέρω.

Λειτουργία Controller thread για εντολή `poll`

Το controller thread διατρέχει τον κοινόχρηστο ενταμιευτή, μαζεύει τα ζεύγη `<jobID, job>` των εντολών του συγκεκριμένου πελάτη, και τα επιστρέφει στον πελάτη σε μήνυμα.

Λειτουργία Controller thread για εντολή `exit`

Το controller thread τερματίζει τον `jobExecutorServer`. Ο τερματισμός του `jobExecutorServer` θα πραγματοποιηθεί **μετά** την ολοκλήρωση όλων των εργασιών που τρέχουν και την επιστροφή των εξόδων τους στον αντίστοιχο πελάτη. Ο ενταμιευτής αδειάζει χωρίς να τρέξουν

οι εργασίες που περιέχει και οι πελάτες που έχουν υποβάλει τις εργασίες θα ενημερώνονται με μήνυμα

SERVER TERMINATED BEFORE EXECUTION

Worker threads

Η δουλειά των worker threads είναι:

- να διαβάζουν τις εργασίες από τον κοινόχρηστο ενταμιευτή (που είχαν τοποθετηθεί εκεί από controller thread),
- να τρέχουν τις εργασίες
- να στέλνουν την έξοδο των εντολών στους πελάτες.

Ένα worker thread ξυπνά όταν υπάρχει τουλάχιστον μια τριπλέτα <jobID, job, clientSocket> στον ενταμιευτή. (δηλαδή τουλάχιστον ένας πελάτης έχει συνδεθεί στον εξυπηρετητή και έχει στείλει issueJob αίτημα).

Όταν ξυπνήσει το worker thread, ελέγχει αν το τρέχον concurrency level του επιτρέπει να αφαιρέσει και να εκτελέσει μια εργασία από τον ενταμιευτή. Αν του το επιτρέπει, αφαιρεί μια τριπλέτα από τον ενταμιευτή και την εκτελεί. Καλεί την fork() κλήση συστήματος (Σημείωση: στο child process που δημιουργείται, θα υπάρχουν αντίγραφο μόνο του νήματος που κάλεσε την fork()).

Το child process αναλαμβάνει δύο πράγματα:

1. την εκτέλεση της εργασίας μέσω κάποιας εκ των συναρτήσεων της οικογένειας exec*() (execv(), execvp κλπ.) και
2. την ανακατεύθυνση της εξόδου της εντολής σε ένα αρχείο.

Πρώτα δημιουργεί ένα νέο αρχείο με όνομα "pid.output" όπου το pid είναι το process id του παιδιού. Ύστερα, θα πρέπει να κάνει χρήση της dup2() κλήσης ώστε ο STDOUT file descriptor (1) να δείχνει στο νέο αρχείο. Τέλος, καλεί την exec*() call. Με αυτόν τον τρόπο, εκτελείται η εντολή και η έξοδος θα αποθηκεύεται στο αρχείο pid.output.

Το parent process θα περιμένει να τερματίσει το child process. Στη συνέχεια, θα διαβάζει το αρχείο pid.out και θα στέλνει τα περιεχόμενα στον πελάτη μέσω του clientSocket file descriptor. Για λόγους ευκρίνειας των αποτελεσμάτων θα προσθέσει πριν και μετά την έξοδο το αναγνωριστικό jobid (start/end) όπως φαίνεται παρακάτω.

```
-----jobID output start-----
```

```
..
```

```
..εξοδος εργασίας
```

```
..
```

-----jobID output end-----

Αφού τελειώσει η μεταφορά του αρχείου στον πελάτη, κλείνει το clientSocket και αφαιρεί το αρχείο pid.output.

Σχέση controller/worker threads

Τα controller threads και τα worker threads έχουν σχέση παραγωγού-καταναλωτή και έτσι στην υλοποίησή σας θα πρέπει οι προσβάσεις τους στο κοινό ενταμιευτή να συγχρονίζονται. Συγκεκριμένα, ένα controller thread πρέπει να **μπλοκάρεται** και να περιμένει όταν ο ενταμιευτής είναι γεμάτος ενώ ένα worker thread πρέπει να **περιμένει** όταν ο ενταμιευτής είναι άδειος. Με αυτή τη προσέγγιση, αν υπάρχουν περισσότερα worker threads από εργασίες στον ενταμιευτή, τότε κάποια από τα worker threads θα μπλοκάρονται, περιμένοντας νέες issueJob εντολές να φτάσουν στον εξυπηρετητή και να τοποθετηθούν στον ενταμιευτή νέες εργασίες, ενώ αν υπάρχουν περισσότερα νέες issueJob εντολές από ότι worker threads, τότε θα τοποθετούνται στον ενταμιευτή μέχρι που να υπάρχει ένα διαθέσιμο worker thread.

Σε αυτήν την εργασία, θα πρέπει να χρησιμοποιήσετε μεταβλητές συνθήκης στην υλοποίησή σας για την πρόσβαση σε κοινούς πόρους (π.χ. buffer κλπ.).

Αν η υλοποίησή σας κάνει οτιδήποτε busy-waiting, θα υπάρξει σημαντική ποινή.

Hint: σκεφτείτε προσεκτικά ποιο είναι το condition που αποτρέπει ένα worker thread ή ένα controller thread από το να έχει πρόσβαση στην κοινόχρηστη ουρά.

Διαδικαστικά

- Το πρόγραμμά σας θα πρέπει να γραφεί σε C (ή C++) και σας θα πρέπει να τρέχει στα Linux workstations του Τμήματος. Κώδικας που δε μεταγλωττίζεται εκεί, θεωρείται ότι δεν μεταγλωττίζεται. Δε θα γίνει αποδεκτή η εξέταση της εργασίας σε άλλον υπολογιστή.
- Για επιπρόσθετες ανακοινώσεις, παρακολουθείτε το forum του μαθήματος στο piazza.com.
Η πλήρης διεύθυνση είναι <https://piazza.com/uoa.gr/spring2024/k24/home>. Η παρακολούθηση του φόρουμ στο Piazza είναι υποχρεωτική.
- Ο κώδικάς σας θα πρέπει να αποτελείται από τουλάχιστον δύο (και κατά προτίμηση περισσότερα) διαφορετικά αρχεία. Η χρήση του separate compilation είναι επιτακτική και ο κώδικάς σας θα πρέπει να έχει ένα Makefile.
- Βεβαιωθείτε πως ακολουθείτε καλές πρακτικές software engineering κατά την υλοποίηση της άσκησης. Η οργάνωση, η αναγνωσιμότητα και η ύπαρξη σχολίων στον κώδικα αποτελούν κομμάτι της βαθμολογίας σας.
- Η υποβολή θα γίνει μέσω eclass.
- Ο κώδικάς σας θα πρέπει να κάνει compile στα εκτελέσιμα jobCommander και jobExecutorServer όπως **ακριβώς** ορίζει η άσκηση.

Τι πρέπει να παραδοθεί

- Όλη η δουλειά σας (πηγαίος κώδικας, Makefile και README) σε ένα tar.gz file με ονομασία OnomaEponymoProject1.tar.gz. Προσοχή να υποβάλλετε μόνο κώδικα, Makefile, README και όχι τα binaries. Η άσκησή σας θα γίνει compile από την αρχή πριν βαθμολογηθεί.
- Όποιες σχεδιαστικές επιλογές κάνετε, θα πρέπει να τις περιγράψετε σε ένα README (απλό text αρχείο) που θα υποβάλλετε μαζί με τον κώδικά σας. Το README χρειάζεται να περιέχει μια σύντομη και περιεκτική εξήγηση για τις επιλογές που έχετε κάνει στον σχεδιασμό του προγράμματός σας σε 1-2 σελίδες ASCII κειμένου. Συμπεριλάβετε την εξήγηση και τις οδηγίες για το compilation και την εκτέλεση του προγράμματός σας.
- Ο κώδικας που θα υποβάλλετε θα πρέπει να είναι δικός σας. Απαγορεύεται η χρήση κώδικα που δεν έχει γραφεί από εσάς ή κώδικας που έχει γραφτεί με τη βοήθεια μηχανών τύπου chatGPT.
- Καλό θα είναι να έχετε ένα backup .tar.gz της άσκησής σας όπως ακριβώς αυτή υποβλήθηκε σε κάποιο εύκολα προσπελάσιμο μηχάνημα (server του τμήματος, github, cloud).
- Η σωστή υποβολή ενός σωστού tar.gz που περιέχει τον κώδικα της άσκησής σας και ό,τι αρχεία χρειάζονται είναι αποκλειστικά ευθύνη σας. **Άδεια tar/tar.gz ή tar/tar.gz που έχουν λάθος και δε γίνονται extract δε βαθμολογούνται.**

Τι θα βαθμολογηθεί

- Η συμμόρφωση του κώδικά σας με τις προδιαγραφές της άσκησης.
- Η οργάνωση και η αναγνωσιμότητα (μαζί με την ύπαρξη σχολίων) του κώδικα.
- Η χρήση Makefile και το separate compilation.

Άλλες σημαντικές παρατηρήσεις

- Οι εργασίες είναι ατομικές.
- Όποιος υποβάλλει / δείχνει κώδικα που δεν έχει γραφτεί από την ίδια/τον ίδιο **μηδενίζεται** στο μάθημα.
- Αν και αναμένεται να συζητήσετε με φίλους και συνεργάτες το πώς θα επιχειρήσετε να δώσετε λύση στο πρόβλημα, αντιγραφή κώδικα (οποιασδήποτε μορφής) είναι κάτι που δεν επιτρέπεται. Οποιοσδήποτε βρεθεί αναμειγμένος σε αντιγραφή κώδικα απλά παίρνει μηδέν στο μάθημα. Αυτό ισχύει για όσους εμπλέκονται ανεξάρτητα από το ποιος έδωσε/πήρε κλπ. Τονίζουμε πως θα πρέπει να λάβετε τα κατάλληλα μέτρα ώστε να είναι προστατευμένος ο κώδικάς σας και να μην αποθηκεύεται κάπου που να έχει πρόσβαση άλλος χρήστης (π.χ., η δικαιολογία «Το είχα βάλει σε ένα github repo και μάλλον μου το πήρε από εκεί», δεν είναι δεκτή.)
- Οι ασκήσεις προγραμματισμού μπορούν να δοθούν με καθυστέρηση το πολύ 3 ημερών και με ποινή 5% για κάθε μέρα αργοπορίας. Πέραν των 3 αυτών ημερών, δεν μπορούν να κατατεθούν ασκήσεις.
- Το πρόγραμμά σας θα πρέπει να γραφτεί σε C ή C++. Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε μόνο εντολές οι οποίες είναι διαθέσιμες στα μηχανήματα Linux του τμήματος.

Πρόγραμμα που πιθανόν μεταγλωττίζεται ή εκτελείται στο προσωπικό σας υπολογιστή αλλά όχι στα μηχανήματα Linux του τμήματος, θεωρείται ότι δε μεταγλωττίζεται ή εκτελείται αντίστοιχα.