Εθνικο & Καποδιστριακο Πανεπιστημιο Αθηνων
Τμημα Πληροφορικης & Τηλεπικοινωνιων
Μαθημα: **Παραλληλα Συστηματα**

Εργασία 2 (υποχρεωτική) – Προγραμματισμός με OpenMP

Ακαδημαϊκο Ετος 2024 – 2025
(εκφωνηση) Τριτη 10 Δεκεμβριου 2024
(παραδοση στο eclass μεχρι) Τριτη **7 Ιανουαριου 2025**

Πληροφορίες για τις Υποχρεωτικές Εργασίες του μαθήματος

- Κάθε ομάδα μπορεί να αποτελείται **από 1 ή 2 φοιτητές**. Όλα τα μέλη της ομάδας πρέπει να έχουν ισότιμη συμμετοχή και να γνωρίζουν τις λεπτομέρειες της υλοποίησης της ομάδας.
- Για την εξεταστική Σεπτεμβρίου δε θα δοθούν άλλες εργασίες. Τον Σεπτέμβριο εξετάζεται μόνο το γραπτό.
- Επίσημη υπολογιστική πλατφόρμα του μαθήματος είναι το δίκτυο των υπολογιστών του Τμήματος με λειτουργικό σύστημα Linux Ubuntu (linux01.di.uoa.gr έως linux30.di.uoa.gr).
- Για την ανάπτυξη των προγραμμάτων σας καλείστε να χρησιμοποιήσετε τη γλώσσα προγραμματισμού C.
- Μαζί με τον κώδικά σας καλείστε να υποβάλετε και τα σχετικά αρχεία Makefile.
- Στην αναφορά σας καλείστε να δώσετε πληροφορίες σχετικά με το όνομα του υπολογιστικού συστήματος που χρησιμοποιείτε, καθώς επίσης και το μοντέλο επεξεργαστή, τον αριθμό των πυρήνων, την έκδοση του λειτουργικού συστήματος, και την έκδοση του μεταγλωττιστή. Για τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάζετε, καλείστε να αναφέρετε ρητά στα εκάστοτε σημεία της αναφοράς τις εισόδους που χρησιμοποιήσατε. Καλείστε να εκτελέσετε κάθε πείραμα (το οποίο ορίζεται ως η εκτέλεση ενός προγράμματος για συγκεκριμένο αριθμό νημάτων και παραμέτρους εισόδου) πολλές φορές (για παράδειγμα, 4 φορές) και να παρουσιάσετε τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων (σύσταση: δημιουργήστε scripts για την εκτέλεση των πειραμάτων, ακόμα και για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και την δημιουργία γραφημάτων).
- Προαιρετικά, μπορείτε να υποβάλετε και τα scripts που χρησιμοποιήσατε για να τρέξετε τα πειράματα και να δημιουργήσετε τα σχετικά γραφήματα.
- Καλείστε να προσεγγίσετε την κάθε άσκηση στην αναφορά σας ως εξής: περιγραφή προβλήματος, σύντομη περιγραφή της λύσης σας, παράθεση πειραματικών αποτελεσμάτων (χρήση πινάκων ή γραφημάτων), και σχολιασμός αποτελεσμάτων.
- Σε περίπτωση αντιγραφής θα μηδενίζονται όλες οι ομάδες που μετέχουν σε αυτή.
- Η παράδοση της **Εργασίας** πρέπει να γίνει μέχρι τα **μεσάνυχτα της προθεσμίας ηλεκτρονικά** και μόνο στο eclass (να ανεβάσετε ένα μόνο αρχείο zip ή rar με την αναφορά σας σε PDF και τον κώδικά σας). **Μην περιμένετε μέχρι την τελευταία στιγμή.**

Άσκηση 2.1

Σε αυτή την άσκηση καλείστε να παραλληλοποιήσετε το Παιχνίδι της Ζωής (Game of Life) χρησιμοποιώντας OpenMP. Το Παιχνίδι της Ζωής αναπτύχθηκε το 1970 από τον John Conway. Το παιχνίδι καταδεικνύει ότι μερικοί απλοί τοπικοί κανόνες μπορούν να οδηγήσουν σε ενδιαφέρουσα μεγάλης κλίμακας συμπεριφορά ζωής (γέννηση, αναπαραγωγή, θάνατος). Παίζεται σε ένα πλέγμα δύο διαστάσεων (NxN) από κελιά ή κύτταρα, τα οποία μπορούν να βρίσκονται σε μια από δυο καταστάσεις: ζωντανά (alive) ή κενά (dead). Το παιχνίδι δεν έχει παίκτες, δηλαδή δεν απαιτεί εισαγωγή δεδομένων κατά την εξέλιξή του, αλλά αυτή εξαρτάται αποκλειστικά από το αρχικό σχέδιο του πλέγματος. Κάθε κελί θεωρείται πως έχει οκτώ γείτονες (δεξιά, αριστερά, πάνω, κάτω και διαγώνια), οι οποίοι επηρεάζουν την κατάστασή του. Το σύνολο των ζωντανών κελιών αποτελεί τον πληθυσμό του πλέγματος. Η εξέλιξη γίνεται σε διακριτά βήματα, τις γενιές, και η ανανέωση του πλέγματος από γενιά σε γενιά γίνεται «ταυτόχρονα», δηλαδή η κατάσταση κάθε κελιού στην επόμενη γενιά εξαρτάται αποκλειστικά από την κατάσταση του ιδίου και των οκτώ γειτόνων του στη παρούσα γενιά, βάση ορισμένων κανόνων. Το παιχνίδι αρχίζει με μια τυχαία επιλογή των κατειλημμένων θέσεων. Από αυτήν την αρχική γενιά, η επόμενη γενιά υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους κανόνες:

- Εάν ένας οργανισμός (κατειλημμένη θέση) έχει λιγότερους από 2 γειτονικούς οργανισμούς, ο οργανισμός πεθαίνει από μοναξιά.
- Εάν ένας οργανισμός έχει 2 ή 3 γειτονικούς οργανισμούς, ο οργανισμός επιζεί στην επόμενη γενιά.
- Εάν ένας οργανισμός έχει περισσότερους από 3 γειτονικούς οργανισμούς, ο οργανισμός πεθαίνει λόγω υπερπληθυσμού.
- Εάν μία μη κατειλημμένη θέση έχει ακριβώς 3 γειτονικούς οργανισμούς, αυτή η θέση θα καταληφθεί στην επόμενη γενιά από έναν νέο οργανισμό, δηλαδή ένας οργανισμός γεννιέται.

Το πρόγραμμά σας θα πρέπει να δέχεται σαν ορίσματα: (α) τον αριθμό των γενιών, (β) το μέγεθος του πλέγματος, (γ) το αν θα εκτελεστεί ο σειριακός ή ο παράλληλος αλγόριθμος, και (δ) τον αριθμό των νημάτων που θα χρησιμοποιηθούν.

Δοκιμάστε να εκτελέσετε το πρόγραμμά σας για διαφορετικά μεγέθη πλεγμάτων (64 × 64, 1024 × 1024, 4096 × 4096) και διαφορετικό αριθμό νημάτων και παρουσιάστε τα σχετικά αποτελέσματα (θεωρώντας 1000 γενιές).

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το Παιχνίδι της Ζωής μπορείτε να βρείτε στους συνδέσμους https://en.wikipedia.org/wiki/Conway%27s_Game_of_Life Και https://www.conwaylife.com/.

Άσκηση 2.2

Για την επίλυση μεγάλων γραμμικών συστημάτων, συχνά χρησιμοποιούμε την απαλοιφή Gauss ακολουθούμενη από μια αντικατάσταση προς τα πίσω. Η απαλοιφή Gauss μετατρέπει ένα γραμμικό σύστημα n × n σε άνω τριγωνικό χρησιμοποιώντας τις παρακάτω πράξεις στις γραμμές:

- Πρόσθεση ενός πολλαπλάσιου μίας γραμμής σε άλλη γραμμή
- Αντιμετάθεση δύο γραμμών
- Πολλαπλασιασμό μίας γραμμής με μια μη μηδενική σταθερά

Ένα άνω τριγωνικό σύστημα έχει μόνο μηδενικούς συντελεστές κάτω από τη διαγώνιο που εκτείνεται από την άνω αριστερή γωνία τού συστήματος στην κάτω δεξιά.

Για παράδειγμα, το γραμμικό σύστημα:

$$\begin{aligned} 2x_0 - 3x_1 &= 3 \\ 4x_0 - 5x_1 + x_2 &= 7 \\ 2x_0 - x_1 - 3x_2 &= 5 \end{aligned}$$

μπορεί να απλοποιηθεί στην άνω τριγωνική μορφή:

$$\begin{aligned} 2x_0 - 3x_1 &= 3 \\ x_1 + x_2 &= 1 \\ -5x_2 &= 0 \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, αυτό το σύστημα μπορεί να λυθεί εύκολα: βρίσκουμε το x_2 χρησιμοποιώντας την τελευταία εξίσωση, μετά βρίσκουμε το x_1 από τη δεύτερη εξίσωση και, τέλος, βρίσκουμε το x_0 χρησιμοποιώντας την πρώτη εξίσωση.

Μπορούμε να χρησιμοποιηθούν διάφοροι σειριακοί αλγόριθμοι για την αντικατάσταση προς τα πίσω. Θεωρούμε ότι η «δεξιά πλευρά» του συστήματος αποθηκεύεται στον πίνακα b, οι συντελεστές των αγνώστων αποθηκεύονται στο διδιάστατο πίνακα A, και οι λύσεις αποθηκεύονται στον πίνακα x.

Ένας αλγόριθμος που υλοποιεί την αντικατάσταση προς τα πίσω διατρέχει το σύστημα πρώτα «κατά γραμμή» και έχει τη μορφή:

```
for (row = n-1; row >= 0; row--) {
      x[row] = b[row];
      for (col = row+1; col < n; col++)
            x[row] -= A[row][col]*x[col];
      x[row] /= A[row][row];
}
```

Ένας εναλλακτικός αλγόριθμος, που διατρέχει το σύστημα πρώτα «κατά στήλη», είναι ο παρακάτω:

```
for (row = 0; row < n; row++)
      x[row] = b[row];

for (col = n-1; col >= 0; col--) {
      x[col] /= A[col][col];
      for (row = 0; row < col; row++)
            x[row] -= A[row][col]*x[col];
}
```

Εξετάστε αν ο εξωτερικός και ο εσωτερικός βρόχος του «κατά γραμμή» αλγορίθμου μπορεί να παραλληλοποιηθεί. Αντίστοιχα, εξετάστε αν ο εξωτερικός και ο εσωτερικός βρόχος του «κατά στήλη» αλγορίθμου μπορεί να παραλληλοποιηθεί.

Παραλληλοποιήσετε τους δύο παραπάνω αλγόριθμους με τη χρήση OpenMP. Πιο συγκεκριμένα, καλείστε να υλοποιήσετε ένα πρόγραμμα το οποίο αρχικοποιεί κατάλληλα τον άνω τριγωνικό πίνακα δύο διαστάσεων A και τον πίνακα b, και στη συνέχεια καλεί τη σειριακή ή παράλληλη υλοποίηση του «κατά γραμμή» αλγορίθμου ή του «κατά στήλη» αλγορίθμου (σύμφωνα με τα αντίστοιχα ορίσματα εκτέλεσης). Το πρόγραμμά σας θα πρέπει να δέχεται σαν ορίσματα: (α) το μέγεθος του γραμμικού συστήματος n, (β) το αν θα εκτελεστεί ο σειριακός ή ο παράλληλος αλγόριθμος της αντικατάστασης προς τα πίσω, (γ) το αν θα εκτελεστεί ο «κατά σειρά» ή «κατά γραμμή» αλγόριθμος της αντικατάστασης προς τα πίσω, και (δ) τον αριθμό των νημάτων που θα χρησιμοποιηθούν.

Αξιολογήστε την επίδοση των δύο διαφορετικών αλγορίθμων καθώς και την επεκτασιμότητα τους για κατάλληλα μεγέθη πινάκων (π.χ. n=10000). Προαιρετικά αναλύστε τον αντίκτυπο εναλλακτικών προσεγγίσεων παραλληλοποίησης.

Πειραματιστείτε με τον όρο schedule(runtime) και δοκιμάστε τους αλγόριθμους με διάφορα χρονοδιαγράμματα; Ποια είναι η επιλογή που μειώνει περισσότερο το χρόνο εκτέλεσης για τον κάθε αλγόριθμο;

Άσκηση 2.3 (προαιρετική)
Σε αυτή την άσκηση καλείστε να παραλληλοποιήσετε το Παιχνίδι της Ζωής (Game of Life) χρησιμοποιώντας χρησιμοποιώντας την οδηγία task. Συγκρίνετε την επίδοση αυτής της υλοποίησης με αυτή της Άσκησης 2.1.