Σχεδίαση Ενσωματωμένων Συστημάτων

1η εργαστηριακή άσκηση 2019-2020

ΝΤΟΥΡΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ 03112905

Ζητούμενο 1ο

Ερωτημα 1

Λειτουργικό Σύστημα	Έκδοση πυρήνα Linux
Ubuntu 18.04 LTS	4.15.0.72

L1d cache	L1i cache	L2 cache	L3 cache	RAM	Cores per socket	Threads per core	CPU Freq
32K	32K	256K	8192K	8G	4	2	625.122 MHz

> Τα παραπάνω βρέθηκαν με χρήση των εντολών:

```
$ uname -a
$ lscpu
$ lshw -short
```

Ερωτημα 2

Για τον υπολογισμό του χρόνου εκτέλεσης της συνάρτησης ***phods_motion_estimation()***, η οποία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου, ενσωματώθηκε η συνάρτηση ***gettimeofday()*** στον αρχικό κώδικα.

```
void phods_motion_estimation(int current[N][M], int previous[N][M],
    int vectors_x[N/B][M/B],int vectors_y[N/B][M/B])
{
    double time;
    struct timeval ts,tf;
    gettimeofday(&ts,NULL);
    int x, y, i, j, k, l, p1, p2, q2, distx, disty, S, min1, min2, bestx, besty;

    .
    .
    .

    gettimeofday(&tf,NULL);
    time=(tf.tv_sec-ts.tv_sec)+(tf.tv_usec-ts.tv_usec) * 0.000001;
    printf("%lf\n", time);
}
```

Εκτελώντας το Python script,

```
$ python3 time.py phods 10
```

παίρνουμε 10 μετρήσεις για το χρόνο εκτέλεσης της ***phods_motion_estimation()***.

Μέτρηση	Χρόνος (sec)
1	0.006229
2	0.006223
3	0.006094
4	0.006143
5	0.007439
6	0.007150
7	0.006117
8	0.006336
9	0.008273
10	0.006904

Minimum	Maximum	Average
0.006094 sec	0.008273 sec	0.006691 sec

Ερωτημα 3

Merged loops for x and y

Αρχικά παρατηρείται πως τα κομμάτια που υπολογίζουν τα ***distx*** και ***disty*** βρίσκονται σε βρόχους εκτέλεσης με ίδια άκρα και είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Συνεπώς τα κάναμε **merge** σε έναν κοινό βρόχο.

```
for(k=0; k<B; k++)
{
    for(l=0; l<B; l++)
    {
        p1 = current[B*x+k][B*y+l];

        if((B*x + vectors_x[x][y] + i + k) < 0 ||
        (B*x + vectors_x[x][y] + i + k) > (N-1) ||
        (B*y + vectors_y[x][y] + l) < 0 ||
        (B*y + vectors_y[x][y] + l) > (M-1))
        {
            p2 = 0;
```

```
        } else {
            p2 = previous[B*x+vectors_x[x][y]+i+k][B*y+vectors_y[x][y]+l];
        }

        if((B*x + vectors_x[x][y] + k) <0 ||
        (B*x + vectors_x[x][y] + k) > (N-1) ||
        (B*y + vectors_y[x][y] + i + l) < 0 ||
        (B*y + vectors_y[x][y] + i + l) > (M-1))
        {
            q2 = 0;
        } else {
            q2 = previous[B*x+vectors_x[x][y]+k][B*y+vectors_y[x][y]+i+l];
        }

        distx += abs(p1-p2);
        disty += abs(p1-q2);
    }
}
```

Αυτό, βέβαια, έδωσε μία ανεπαίσθητη βελτίωση στο χρόνο που όμως λόγω της μικρής απόκλισης που έχουν ούτως η άλλως οι μετρήσεις, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί.

Ύστερα παρατηρήσαμε ότι μέσα στα loops των x και y, τα ***S*** και ***i*** δεν κάνουν loop εώς κάποιο όριο που εξαρτάται από το input, αλλά πάνω σε σταθερές τιμές, οπότε χρησιμοποιήσαμε macros για να τα κάνουμε **unroll**.

Loop unrolling

```
for(x=0; x<N/B; x++)
{
    for(y=0; y<M/B; y++)
    {
        FOR_LOOP_S(4);
        FOR_LOOP_S(2);
        FOR_LOOP_S(1);
    }
}
```

FOR_LOOP_I(i)

```
#define FOR_LOOP_I(i)                                                           \
    distx = 0;                                                                  \
    disty = 0;                                                                  \
    for(k=0; k<B; k++)                                                          \
    {                                                                           \
        for(l=0; l<B; l++)                                                      \
        {                                                                       \
            p1 = current[B*x+k][B*y+l];                                         \
            if((B*x + vectors_x[x][y] + i + k) < 0 ||                           \
            (B*x + vectors_x[x][y] + i + k) > (N-1) ||                          \
            (B*y + vectors_y[x][y] + l) < 0 ||                                  \
            (B*y + vectors_y[x][y] + l) > (M-1))                                \
            {                                                                   \
                p2 = 0;                                                         \
            } else {                                                            \
                p2 = previous[B*x+vectors_x[x][y]+i+k][B*y+vectors_y[x][y]+l];  \
            }                                                                   \
            if((B*x + vectors_x[x][y] + k) <0 ||                                \
            (B*x + vectors_x[x][y] + k) > (N-1) ||                              \
            (B*y + vectors_y[x][y] + i + l) < 0 ||                              \
            (B*y + vectors_y[x][y] + i + l) > (M-1))                            \
            {                                                                   \
                q2 = 0;                                                         \
```

```
            } else {                                                        \
                q2 = previous[B*x+vectors_x[x][y]+k][B*y+vectors_y[x][y]+i+l];  \
            }                                                               \
            distx += abs(p1-p2);                                            \
            disty += abs(p1-q2);                                            \
        }                                                                   \
    }                                                                       \
    if(distx < min1)                                                        \
    {                                                                       \
        min1 = distx;                                                       \
        bestx = i;                                                          \
    }                                                                       \
    if(disty < min2)                                                        \
    {                                                                       \
        min2 = disty;                                                       \
        besty = i;                                                          \
    }
```

FOR_LOOP_S(s)

```
#define FOR_LOOP_S(s)                                                       \
    min1 = 255*B*B;                                                         \
    min2 = 255*B*B;                                                         \
    FOR_LOOP_I(-s);                                                         \
    FOR_LOOP_I(0);                                                          \
    FOR_LOOP_I(s);                                                          \
    vectors_x[x][y] += bestx;                                               \
    vectors_y[x][y] += besty;
```

Αυτό, όμοια με το προηγούμενο loop merging έκανε το πρόγραμμα ελάχιστα καλύτερο.

Data reuse

Τέλος, παρατηρήθηκε πώς στις παραπάνω μακροεντολές γίνεται πρόσβαση σε στοιχείο του πίνακα **vectors_x[x][y]** πολλαπλές φορές μέσα σε κάθε επανάληψη, χωρίς αυτό να έχει αλλάξει τιμή. Οι εντολές πρόσβασης στη μνήμη είναι, ως γνωστόν, αυτές που επιβαρύνουν περισσότερο την εκτέλεση ενός προγράμματος. Γι' αυτό τροποποιήθηκε ο κώδικας ώστε αυτό το στοιχείο να υπολογίζεται μόνο μία φορά σε κάθε επανάλυψη του συνολικού διπλού βρόχου. Ύστερα όταν χρησιμοποιείται δεν γίνεται ξανά πρόσβαση στην εξωτερική μνήμη γιατι η τιμή βρίσκεται στην μνήμη cache του επεξεργαστή.

```
for(x=0; x<N/B; x++)
{
    for(y=0; y<M/B; y++)
    {
        int __vectors_x__ = vectors_x[x][y];
        FOR_LOOP_S(4);
        FOR_LOOP_S(2);
        FOR_LOOP_S(1);
    }
}
```

Στη συνέχεια αντικαταστήσαμε και στις μακροεντολές FOR_LOOP_I και FOR_LOOP_S με ***__vectors_x__*** όπου ***vectors_x[x][y]***, παίρνοντας έτσι τον τελικό βελτιστοποιημένο κώδικα ***phods_opt.c***.

Εκτελώντας το Python script,

```
$ python3 time.py phods_opt 10
```

παίρνουμε τώρα το μέσο χρόνο εκτέλεσης της ***phods_motion_estimation()*** για τον βελτιστοποιημένο κώδικα, ο οποίος είναι **0.003063 sec**.

phods.c (average)	phods_opt.c (average)	Βελτίωση
0.006691 sec	**0.003063 sec**	54%

Ερώτημα 4

Για την εύρεση του βέλτιστου **Block size** χρειάστηκε η τροποποίηση του κώδικα ώστε να δέχεται σαν παράμετρο το μέγεθος **B**.

```
if (argc == 1)
{
    B = 16;
}
else if (argc == 2)
{
    B = atoi(argv[1]);
}
else
{
    printf("phods_optimized usage: ./phods block_size\n");
    exit(1);
}
```

Ύστερα τρέχοντας

```
$ python3 block.py phods_opt 10
```

παίρνουμε μετρήσεις για τον χρόνο εκτέλεσης ανάλογα με το μέγεθος του Block. Επιλέχθηκαν μεγέθη B που είναι διαιρέτες του M(176) και N(144).

Μέγεθος Block	Μέσος χρόνος εκτέλεσης
1	0.005813
2	0.004046
4	0.003349
8	0.003317
16	0.003266

Η καλύτερη επίδοση επιτυγχάνεται για μέγεθος Block 16.

Ερώτημα 5

Για την αναζήτηση του καλύτερου Block size, ερευνάται πλέον και Block όχι τετραγωνικό, αλλά ορθογώνιο, διαστάσεων **Bx x By**.

Για αυτόν τον σκοπό έγινε και η τελική προσαρμογή του κώδικα ώστε να δέχεται πλέον 2 διαφορετικές διαστάσεις για το Block. Αυτός υπάρχει στο αρχείο ***phods_opt_2dimensions.c***. Τώρα τρέχουμε το ίδιο script με όρισμα το νέο εκτελέσιμο, ώστε να ερευνήσουμε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των Bx και By, όπου αυτά είναι οι διαιρέτες των N και M αντίστοιχα.

```
$ python3 block.py phods_opt_2dimensions 10
```

με output

```
Block size 1 x 1 : 0.005696 sec
Block size 1 x 2 : 0.005639 sec
Block size 1 x 4 : 0.005520 sec
Block size 1 x 8 : 0.005523 sec
Block size 1 x 11 : 0.005404 sec
Block size 1 x 16 : 0.005450 sec
Block size 1 x 22 : 0.005545 sec
Block size 1 x 44 : 0.005698 sec
Block size 1 x 88 : 0.005284 sec
Block size 1 x 176 : 0.005492 sec
Block size 2 x 1 : 0.004215 sec
Block size 2 x 2 : 0.004365 sec
Block size 2 x 4 : 0.004381 sec
Block size 2 x 8 : 0.004276 sec
Block size 2 x 11 : 0.004322 sec
Block size 2 x 16 : 0.004441 sec
Block size 2 x 22 : 0.004345 sec
Block size 2 x 44 : 0.004382 sec
Block size 2 x 88 : 0.004373 sec
Block size 2 x 176 : 0.004597 sec
Block size 3 x 1 : 0.003958 sec
Block size 3 x 2 : 0.003870 sec
Block size 3 x 4 : 0.003835 sec
Block size 3 x 8 : 0.003658 sec
Block size 3 x 11 : 0.003746 sec
Block size 3 x 16 : 0.003796 sec
Block size 3 x 22 : 0.003761 sec
Block size 3 x 44 : 0.003844 sec
Block size 3 x 88 : 0.003775 sec
Block size 3 x 176 : 0.003821 sec
Block size 4 x 1 : 0.003781 sec
Block size 4 x 2 : 0.003561 sec
Block size 4 x 4 : 0.003654 sec
Block size 4 x 8 : 0.003609 sec
Block size 4 x 11 : 0.003688 sec
Block size 4 x 16 : 0.003569 sec
Block size 4 x 22 : 0.003626 sec
Block size 4 x 44 : 0.003591 sec
Block size 4 x 88 : 0.003703 sec
Block size 4 x 176 : 0.003620 sec
Block size 6 x 1 : 0.003572 sec
Block size 6 x 2 : 0.003358 sec
Block size 6 x 4 : 0.003682 sec
Block size 6 x 8 : 0.003593 sec
Block size 6 x 11 : 0.003359 sec
Block size 6 x 16 : 0.003417 sec
Block size 6 x 22 : 0.003365 sec
Block size 6 x 44 : 0.003470 sec
Block size 6 x 88 : 0.003456 sec
Block size 6 x 176 : 0.003437 sec
Block size 8 x 1 : 0.003306 sec
Block size 8 x 2 : 0.003490 sec
Block size 8 x 4 : 0.003377 sec
Block size 8 x 8 : 0.003526 sec
Block size 8 x 11 : 0.003136 sec
Block size 8 x 16 : 0.003275 sec
Block size 8 x 22 : 0.003511 sec
Block size 8 x 44 : 0.003601 sec
Block size 8 x 88 : 0.003332 sec
Block size 8 x 176 : 0.003442 sec
```

```
Block size 9 x 1 : 0.003197 sec
Block size 9 x 2 : 0.003561 sec
Block size 9 x 4 : 0.003053 sec
Block size 9 x 8 : 0.003262 sec
Block size 9 x 11 : 0.003433 sec
Block size 9 x 16 : 0.003448 sec
Block size 9 x 22 : 0.003326 sec
Block size 9 x 44 : 0.003192 sec
Block size 9 x 88 : 0.003124 sec
Block size 9 x 176 : 0.003206 sec
Block size 12 x 1 : 0.003140 sec
Block size 12 x 2 : 0.003172 sec
Block size 12 x 4 : 0.003448 sec
Block size 12 x 8 : 0.003083 sec
Block size 12 x 11 : 0.003137 sec
Block size 12 x 16 : 0.003137 sec
Block size 12 x 22 : 0.003290 sec
Block size 12 x 44 : 0.003304 sec
Block size 12 x 88 : 0.003169 sec
Block size 12 x 176 : 0.003223 sec
Block size 16 x 1 : 0.003170 sec
Block size 16 x 2 : 0.003163 sec
Block size 16 x 4 : 0.003304 sec
Block size 16 x 8 : 0.003074 sec
Block size 16 x 11 : 0.003204 sec
Block size 16 x 16 : 0.003247 sec
Block size 16 x 22 : 0.003245 sec
Block size 16 x 44 : 0.003261 sec
Block size 16 x 88 : 0.003299 sec
Block size 16 x 176 : 0.003133 sec
Block size 18 x 1 : 0.002835 sec
Block size 18 x 2 : 0.003026 sec
Block size 18 x 4 : 0.003132 sec
Block size 18 x 8 : 0.003144 sec
Block size 18 x 11 : 0.003247 sec
Block size 18 x 16 : 0.003406 sec
Block size 18 x 22 : 0.003207 sec
Block size 18 x 44 : 0.003038 sec
Block size 18 x 88 : 0.003035 sec
Block size 18 x 176 : 0.002932 sec
Block size 24 x 1 : 0.003172 sec
Block size 24 x 2 : 0.003134 sec
Block size 24 x 4 : 0.002981 sec
Block size 24 x 8 : 0.003130 sec
Block size 24 x 11 : 0.003322 sec
Block size 24 x 16 : 0.002953 sec
Block size 24 x 22 : 0.003060 sec
Block size 24 x 44 : 0.003101 sec
Block size 24 x 88 : 0.003400 sec
Block size 24 x 176 : 0.003032 sec
Block size 36 x 1 : 0.002654 sec
Block size 36 x 2 : 0.002767 sec
Block size 36 x 4 : 0.002861 sec
Block size 36 x 8 : 0.002827 sec
Block size 36 x 11 : 0.002771 sec
Block size 36 x 16 : 0.002981 sec
Block size 36 x 22 : 0.002808 sec
Block size 36 x 44 : 0.002760 sec
Block size 36 x 88 : 0.002942 sec
Block size 36 x 176 : 0.002649 sec
Block size 48 x 1 : 0.002887 sec
Block size 48 x 2 : 0.002872 sec
Block size 48 x 4 : 0.002641 sec
Block size 48 x 8 : 0.002656 sec
Block size 48 x 11 : 0.002621 sec
```

```
Block size 48 x 16 : 0.002671 sec
Block size 48 x 22 : 0.002634 sec
Block size 48 x 44 : 0.002744 sec
Block size 48 x 88 : 0.002694 sec
Block size 48 x 176 : 0.002700 sec
Block size 72 x 1 : 0.002613 sec
Block size 72 x 2 : 0.002538 sec
Block size 72 x 4 : 0.002633 sec
Block size 72 x 8 : 0.002714 sec
Block size 72 x 11 : 0.002734 sec
Block size 72 x 16 : 0.002651 sec
Block size 72 x 22 : 0.002820 sec
Block size 72 x 44 : 0.002828 sec
Block size 72 x 88 : 0.002565 sec
Block size 72 x 176 : 0.002588 sec
Block size 144 x 1 : 0.002569 sec
Block size 144 x 2 : 0.002629 sec
Block size 144 x 4 : 0.002688 sec
Block size 144 x 8 : 0.002626 sec
Block size 144 x 11 : 0.002642 sec
Block size 144 x 16 : 0.002634 sec
Block size 144 x 22 : 0.002603 sec
Block size 144 x 44 : 0.002587 sec
Block size 144 x 88 : 0.002583 sec
Block size 144 x 176 : 0.002575 sec

Best block size: 72 x 2 : 0.002538 sec
```

Φαίνεται λοιπόν πως οι βέλτιστες διαστάσεις του Block είναι **72x2**. Βέβαια, επισημαίνεται, πως οι μετρήσεις παρουσιάζουν μία μικρή διακύμανση, όπως προαναφέρθηκε. Αυτό σε συνδυασμό με τα παραπάνω αποτελέσματα, που είναι τόσο κοντά κάποιες επιδόσεις από διαφορετικές διαστάσεις καθιστά το παραπάνω αποτέλεσμα ορθό με μία πιθανότητα μικρότερη της μονάδας.

Ερώτημα 6

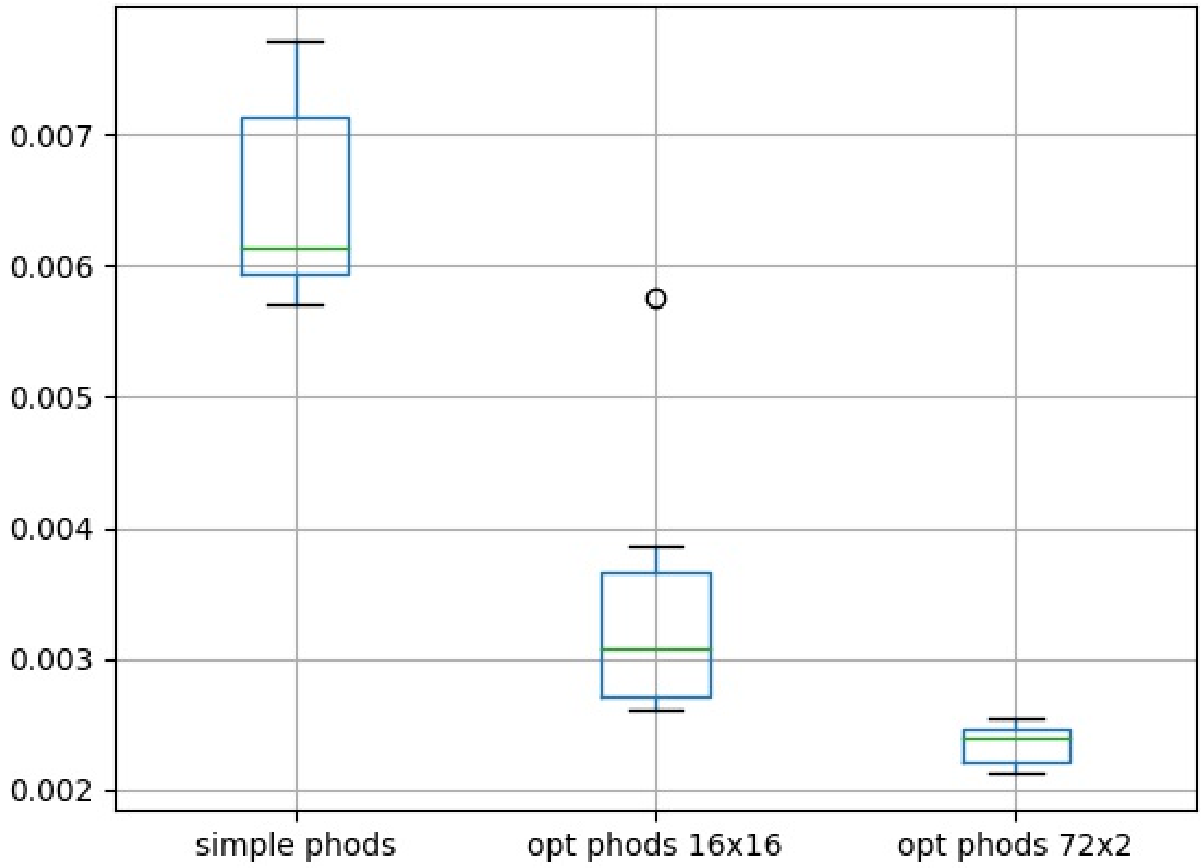
Τρέχοντας το script boxplot.py

```
$ python3 boxplot.py
```

παίρνουμε το boxplot των μετρήσεων του χρόνου εκτέλεσης της ***phods_motion_estimation()*** για τους παρακάτω κώδικες:

- phods.c
- phods_opt.c για B = 16
- phods_opt_2dimensions.c για Bx = 72 και By = 2

Είναι προφανής η υπεροχή του βελτιστοποιημένου κώδικα σε σχέση με τον απλό. Επίσης φαίνεται μια μικρή αλλα υπαρκτή βελτίωση όταν επιλεχθεί ορθόγωνιο Block διαστάσεων 72x2, με την προαναφερθήσα επισήμανση για την ορθότητα των επιλεγμένων αυτών διαστάσεων όμως.



Ζητούμενο 2ο

Ερώτημα 1

Αντίστοιχα με το πρώτο ζητούμενο εισάγουμε τη συνάρτηση **gettimeofday()** στον κώδικα του αρχείου **tables.c** ώστε να μπορεί να γίνει μέτρηση με ακρίβεια microsecond του χρόνου εκτέλεσης του βασικού for loop του κώδικα.

```
gettimeofday(&ts,NULL);

/*
This is the basic loop of tables.c. Isolate it in file tables_orio.c,
in which all the parameters for Design Space Exploration (DSE) and loop
transformations should be defined.
*/
for (i=0; i<=N-1; i++)
{
    //This loop needs to be modified after Orio's execution...
    y[i] = y[i] + a1*x1[i] + a2*x2[i] + a3*x3[i];
}

gettimeofday(&tf,NULL);
time=(tf.tv_sec-ts.tv_sec)+(tf.tv_usec-ts.tv_usec)*0.000001;
printf("%lf", time);
```

Εκτελώντας το python script,

```
$ python3 time.py tables 10
```

παίρνουμε τον ελάχιστο, μέγιστο και μέσο χρόνο εκτέλεσης:

Minimum	Maximum	Average
0.533641 sec	0.568850 sec	0.541579 sec

Ερώτημα 2

Εδώ θα βελτιστοποιήσουμε τον κώδικα του αρχείου tables.c με χρήση του εργαλείου **Orio**. Συγκεκριμένα θα βρεθεί το βέλτιστο loop unrolling για το for loop που μας ενδιαφέρει χρησιμοποιώντας 3 διαφορετικές τεχνικές.

Exhaustive

Τρέχοντας

```
$ sudo orcc tables_orio_exhaustive.c
```

παράγεται το αρχείο **_tables_orio_exhaustive.c** που περιέχει το loop unrolling me **UF (unroll factor) = 6**.

```
for (i=0; i<=N-6; i=i+6) {
  y[i]=y[i]+a1*x1[i]+a2*x2[i]+a3*x3[i];
  y[(i+1)]=y[(i+1)]+a1*x1[(i+1)]+a2*x2[(i+1)]+a3*x3[(i+1)];
  y[(i+2)]=y[(i+2)]+a1*x1[(i+2)]+a2*x2[(i+2)]+a3*x3[(i+2)];
  y[(i+3)]=y[(i+3)]+a1*x1[(i+3)]+a2*x2[(i+3)]+a3*x3[(i+3)];
  y[(i+4)]=y[(i+4)]+a1*x1[(i+4)]+a2*x2[(i+4)]+a3*x3[(i+4)];
  y[(i+5)]=y[(i+5)]+a1*x1[(i+5)]+a2*x2[(i+5)]+a3*x3[(i+5)];
}
for (i=N-((N-(0))%6); i<=N-1; i=i+1)
  y[i]=y[i]+a1*x1[i]+a2*x2[i]+a3*x3[i];
```

Simplex

Τρέχοντας

```
$ sudo orcc tables_orio_simplex.c
```

παράγεται το αρχείο **_tables_orio_simplex.c** που περιέχει το loop unrolling me **UF = 5**.

```
for (i=0; i<=N-5; i=i+5) {
  y[i]=y[i]+a1*x1[i]+a2*x2[i]+a3*x3[i];
  y[(i+1)]=y[(i+1)]+a1*x1[(i+1)]+a2*x2[(i+1)]+a3*x3[(i+1)];
  y[(i+2)]=y[(i+2)]+a1*x1[(i+2)]+a2*x2[(i+2)]+a3*x3[(i+2)];
  y[(i+3)]=y[(i+3)]+a1*x1[(i+3)]+a2*x2[(i+3)]+a3*x3[(i+3)];
  y[(i+4)]=y[(i+4)]+a1*x1[(i+4)]+a2*x2[(i+4)]+a3*x3[(i+4)];
}
for (i=N-((N-(0))%5); i<=N-1; i=i+1)
  y[i]=y[i]+a1*x1[i]+a2*x2[i]+a3*x3[i];
```

Ερώτημα 3

Αφου ενσωματώσουμε το βελτιστοποιημένο for loop στο αρχείο tables.c παίρνουμε τα αρχεία **tables_opt_exhaustive.c** και **tables_opt_simplex.c**

Τρέχοντας το Python script με ορίσματα τους βελτιστοποιημένους κώδικες

```
$ python3 time.py tables_opt_exhaustive 10
$ python3 time.py tables_opt_simplex 10
```

παίρνουμε του χρόνους εκτέλεσης για τους νέους κώδικες.

Minimum

tables.c	tables_opt_exhaustive	tables_opt_simplex
0.533641 sec	0.334026 sec	0.350367 sec

Maximum

tables.c	tables_opt_exhaustive	tables_opt_simplex
0.568850 sec	0.423389 sec	0.604013

Average

tables.c	tables_opt_exhaustive	tables_opt_simplex
0.541579 sec	0.353514 sec	0.419161 sec

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό η βελτιστοποίηση με **exhaustive** πετυχαίνει την καλύτερη επίδοση καθώς με αυτήν την τεχνική γίνεται πιο εξαντλητική αναζήτηση σε σχέση με την τεχνική **simplex**. Πάντως και οι δύο τεχνικές, όπως αναμένοταν, βελτιώνουν την επίδοση του αρχικού κώδικα.