นาย ภัทรพล ชัยลมรเวทย์ 62010184
นาย ภูดินนท์ เพ็งสุข 62010710

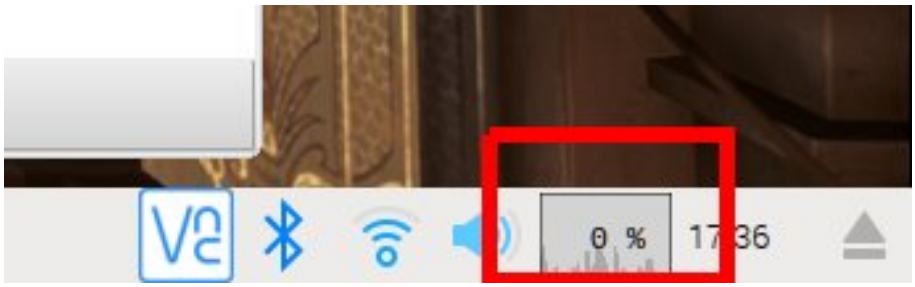
ภาคผนวก M

การทดลองที่ 13 การพัฒนาอัลกอริทึมแบบขนานด้วย OpenMP

การพัฒนาอัลกอริทึมแบบขนานบนซีพียูในปัจจุบันจำเป็นต้องอาศัยภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูง เช่น ภาษา C/C++ ภาษา Java เป็นต้น เพื่อช่วยลดเวลารัน (Run Time) ซึ่งเท่ากับเร่งความเร็ว (Speedup) ให้อัลกอริทึมหรือโปรแกรม โดยการสร้างเทรดผู้ช่วย (Worker Thread) และมอบหมายงานให้ไปรันบนซีพียูคอร์ที่ยังว่างอยู่ ผู้อ่านสามารถประยุกต์ใช้หลักการนี้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไปจนถึงเครื่องซูเปอร์คอมพิวเตอร์ตามเนื้อหาในบทที่ 8 ดังนั้น การทดลองมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- เพื่อพัฒนาโปรแกรมภาษา C ด้วยไลบรารี OpenMP ให้สามารถทำงานแบบมัลติเทรดและใช้งานซีพียูมัลติคอร์ได้เต็มที่
- เพื่อเรียนรู้การวัด CPU Utilization (%CPU) เวลาจริง (T_{real}) เวลาผู้ใช้ (T_{user}) และเวลาระบบ (T_{sys}) ในซีพียูมัลติคอร์
- เพื่อทำความเข้าใจการวัดประสิทธิภาพของอัลกอริทึมแบบขนานด้านความซับซ้อนเชิงเวลาด้วยพีชคณิต BigO และตัวชี้วัด Speedup จากเวลาที่วัดได้

M.1 การวัด CPU Utilization



รูปที่ M.1: กราฟแสดงการใช้งานซีพียู (CPU Usage Monitor) ย้อนหลังและค่าสรุป ณ เวลาปัจจุบัน ที่มา: abload.de

ผู้อ่านสามารถติดตั้งเครื่องมือและกราฟกราฟแสดงการใช้งานซีพียู (CPU Usage Monitor) ย้อนหลังและค่าสรุป ณ เวลาปัจจุบันของบอร์ด Pi3 ประกอบการทดลองที่ 13 ตามขั้นตอนเหล่านี้

1. เลื่อนเมาส์ไปบนตำแหน่งว่างของ Task Bar
2. คลิกขวา เพื่อให้เมนูต่อไปนี้ปรากฏขึ้นแล้วคลิกซ้ายเลือก Add/Remove Panel Items
3. คลิกที่แท็บ Panel Applets
4. เลื่อนรายการขึ้นลงเพื่อหารายการชื่อ CPU Usage Monitor แล้วคลิก Add
5. กดปุ่ม Up และ Down เพื่อวางตำแหน่งของ CPU Usage Monitor ในตำแหน่งที่ต้องการ โปรดสังเกตรายชื่อ เมื่อได้ตำแหน่งที่ต้องการแล้วกด Close หมายเหตุ **Spacer** หมายถึง ช่องว่างที่คั่นระหว่าง Applet ที่อยู่บน Task Bar
6. สังเกตด้านขวาของ Task Bar จะมีจอสีเทาขนาดเล็กแสดงเป็นกราฟแท่ง โดยแท่งขวาสุดคือ วินาทีล่าสุด
7. เลื่อนเมาส์ไปบนกราฟแล้วคลิกขวาเพื่อเพิ่มการแสดงผลเป็นตัวเลขหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)
8. ทดสอบการทำงานโดยการเปิดคลิปเดียวกันบน YouTube.com ที่ความละเอียดแตกต่างกัน เช่น 240p, 480p และ 720p ทีละค่าเพื่อให้เห็นค่า $\%CPU_{max}$ ที่แตกต่าง

M.2 การคูณแมทริกซ์แบบขนาน

$$C = A \times B \tag{M.1}$$

การคูณแมทริกซ์เป็นพื้นฐานของการคำนวณพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ กำหนดให้แมทริกซ์จตุรัส A ขนาด $N \times N$ สามารถเขียนในรูปแบบของอะเรย์ 2 มิติในภาษา C/C++ ได้ดังนี้

$$A = \Big(A[i][j]\Big)$$

โดยดัชนีตัวแรก i คือ หมายเลขแถว มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง N-1 ดัชนีตัวที่สอง j คือ หมายเลขคอลัมน์ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง N-1 ดังนั้น

$$A = \begin{pmatrix} A[0][0] & A[0][1] & \ldots & A[0][N-1] \\ A[1][0] & A[1][1] & \ldots & A[1][N-1] \\ \\ A[N-1][0] & A[N-1][1] & \ldots & A[N-1][N-1] \end{pmatrix}$$

เมื่อทำความเข้าใจพื้นฐานของแมทริกซ์ในรูปแบบของอะเรย์ส 2 มิติแล้ว ผู้อ่านสามารถทำการทดลองตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ย้ายและสร้างไดเรคทอรี /home/Pi/Lab13 บนโปรแกรม Terminal ด้วยคำสั่งต่อไปนี้ตามลำดับ

```
$ cd /home/Pi/
$ mkdir Lab13
$ cd Lab13
$ nano multMatrix.c
```

2. กรอกโปรแกรมต่อไปนี้ด้วยโปรแกรม nano และบันทึกในไฟล์ชื่อ **multMatrix.c** ในไดเรคทอรีที่สร้างไว้

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>
#include <omp.h>

#define N 200
float A[N][N], B[N][N], C[N][N]; // matrices of NxN elements

int main () {
/* DECLARING VARIABLES */
int i, j, k; // indices for matrix multiplication
float t_mul; // Multiply time
clock_t c_1, c_2; // start time and stop time

/* FILLING MATRICES WITH RANDOM NUMBERS */
srand ( time(NULL) );
for(i=0;i<N;i++) {
  for(j=0;j<N;j++) {
    A[i][j]= (rand()%100);
    B[i][j]= (rand()%100);
  }
}
/* MATRIX MULTIPLICATION */
printf("Max number of threads: %i \n",omp_get_max_threads());
#pragma omp parallel
  printf("Number of threads: %i \n",omp_get_num_threads());
  c_1=time(NULL); // time measure: start time
  #pragma omp parallel for private(k, j)
    for(i=0;i<N;i++) {
      for(j=0;j<N;j++) {
        C[i][j]=0.; // set initial value of resulting matrix C = 0
        for(k=0;k<N;k++) {
          C[i][j]=C[i][j]+A[i][k]*B[k][j];
        }
      }
    }
  c_2=time(NULL); // time measure: stop time
  t_mul = (float)(c_2-c_1); // Multiply time
```

```
  printf("Mutiply Time: %f \n",t1);

  /* TERMINATE PROGRAM */
  return 0;
}
```

3. exit ออกจากโปรแกรม nano เพื่อคอมไพล์โปรแกรมด้วยคำสั่งต่อไปนี้

```
$ gcc -fopenmp multMatrix.c -o mulMatrix
```

แก้ไขหากมีข้อผิดพลาดจนกว่าจะคอมไพล์โปรแกรมสำเร็จและมีไฟล์ชื่อ mulMultrix

4. ตั้งค่าจำนวนเทรด n=1 ของโปรแกรมด้วยคำสั่งต่อไปนี้

```
$ export OMP_NUM_THREADS=1
```

5. รันโปรแกรมจับเวลาด้วยคำสั่ง time ดังนี้จำนวน 5 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย ขณะทำการทดลองขอให้ผู้อ่านใช้นาฬิกาข้อมือจับเวลาไปพร้อมๆ กัน เพื่อเปรียบเทียบกับค่าของ $T_{mul,n}$ และ T_{real}

```
$ time ./mulMatrix
```

ซึ่งจะรายงานผลการจับเวลาการทำงานของทั้งโปรแกรมในแง่มุมต่างๆ

6. จดบันทึกค่า CPU Utilization สูงสุดหรือ $\%CPU_{max}$ ที่สังเกตได้ หาค่าเฉลี่ยของ $T_{mul,n}$ T_{real} T_{user} และ T_{sys} ที่ได้ลงในตารางที่ M.1

ตารางที่ M.1: เวลาและ $\%CPU_{max}$ ของการคูณแมทริซ์ที่ขนาด N และจำนวนเทรดเท่ากับ 1, 2, 4, 8 เทรด

เวลาเฉลี่ย	N=200 (วินาที)	N=400 (วินาที)	N=800 (วินาที)	N=1000 (วินาที)
n=**1 เทรด**				
$T_{mul,1}$	0.000	1.000	2.000	4.000
T_{real}	0.222	0.248	0.244	0.238
T_{user}	0.211	0.244	0.243	0.217
T_{sys}	0.012	0.002	0.001	0.020
$\%CPU_{max}$	0%	8%	5%	8%
n=**2 เทรด**				
$T_{mul,2}$	0.000	0.000	2.000	3.000
T_{real}	0.166	0.170	0.169	0.176
T_{user}	0.284	0.304	0.268	0.300
T_{sys}	0.021	0.002	0.041	0.021
$\%CPU_{max}$	10%	9%	10%	11%
n=**4 เทรด**				
$T_{mul,4}$	0.000	0.000	3.000	6.000
T_{real}	0.149	0.145	0.148	0.150
T_{user}	0.292	0.357	0.320	0.346
T_{sys}	0.012	0.011	0.011	0.011
$\%CPU_{max}$	10%	8%	10%	11%
n=**8 เทรด**				
$T_{mul,8}$	0.000	0.000	3.000	5.000
T_{real}	0.141	0.142	0.132	0.144
T_{user}	0.354	0.341	0.333	0.354
T_{sys}	0.013	0.012	0.000	0.011
$\%CPU_{max}$	10%	9%	11%	12%

7. เปลี่ยนจำนวนเทรดเท่ากับ n=2 เทรด ด้วยคำสั่งต่อไปนี้

   ```
   $ export OMP_NUM_THREADS=2
   ```

   แล้ววนกลับไปทำข้อ 5 เพื่อกรอกค่าเฉลี่ยเวลาในตารางที่ M.1 จนครบ แล้วจึงเปลี่ยนจำนวนเทรด n=4 และ 8 เทรด

8. เปลี่ยนขนาดข้อมูล N=400 แล้วกลับไปเริ่มทำข้อ 3 จนถึงข้อ 8 จนครบ N= 800 และ 1000

จากตารางที่ M.1 ผู้อ่านสามารถใช้ประกอบการคำนวณประสิทธิภาพการคำนวณแบบขนานในหัวข้อถัดไป

M.3 ความซับซ้อนของการคำนวณ (Complexity)

ผู้อ่านสามารถประยุกต์ใช้อัตราส่วนระหว่างความซับซ้อนเชิงเวลา (Run Time Complexity) $O(N_2)$ และ $O(N_1)$ ที่จำนวน n เทรดเหมือนกัน เพื่อวัดความซับซ้อนของอัลกอริทึมได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{O(N_2^3)}{O(N_1^3)} = \frac{T_{N_2,n}}{T_{N_1,n}} \tag{M.2}$$

สำหรับการคูณแมทริกซ์ $T_{N,n}$ คือ $T_{mul,n}$ เป็นระยะเวลาเฉลี่ยของการคูณแมทริกซ์ขนาด $N \times N$ ด้วยจำนวน n เทรดจากหัวข้อที่ผ่านมา ผู้อ่านสามารถคำนวณค่าอัตราส่วนของเวลาในตารางที่ M.2 เพื่อใช้วิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ M.2: อัตราส่วนเวลาการคูณแมทริซ์ที่ขนาด N และเวลาที่ขนาด 200 ที่จำนวนเทรดเท่ากับ 1, 2, 4, 8 เทรด จากสมการที่ (M.2)

	N=200	N=400	N=800	N=1000
n=1 เทรด				
$T_{N,1}/T_{200,1}$	1.00	1.00	2.200	4.600
$\sqrt[2]{T_{N,1}/T_{200,1}}$	1.00	1.00	1.483	2.145
$\sqrt[3]{T_{N,1}/T_{200,1}}$	1.00	1.00	1.300	1.633
n=2 เทรด				
$T_{N,2}/T_{200,2}$	1.00	1.00	4.666	6.333
$\sqrt[2]{T_{N,2}/T_{200,2}}$	1.00	1.00	2.160	2.516
$\sqrt[3]{T_{N,2}/T_{200,2}}$	1.00	1.00	1.671	1.850
n=4 เทรด				
$T_{N,4}/T_{200,4}$	1.00	1.00	5.000	10.000
$\sqrt[2]{T_{N,4}/T_{200,4}}$	1.00	1.00	2.236	3.162
$\sqrt[3]{T_{N,4}/T_{200,4}}$	1.00	1.00	1.709	2.154
n=8 เทรด				
$T_{N,8}/T_{200,8}$	1.00	1.00	15.000	29.000
$\sqrt[2]{T_{N,8}/T_{200,8}}$	1.00	1.00	3.872	5.385
$\sqrt[3]{T_{N,8}/T_{200,8}}$	1.00	1.00	2.466	3.072

จงเปรียบเทียบค่าผลการคำนวณของ $\sqrt[2]{T_{N_2,n}/T_{200,1}}$ และ $\sqrt[3]{T_{N_2,n}/T_{200,1}}$ ที่ได้ในตารางที่ M.2 เมื่อ N_2= 400, 800 และ 1000 และ n= 1, 2, 4 และ 8 ตามลำดับ ว่ามีค่าใกล้เคียงกับ $N_2/200$= 2, 4, 5 อย่างไร เพราะเหตุใด

M.4 ประสิทธิภาพ (Performance) ของการคำนวณแบบขนาน

ผู้อ่านสามารถวัดประสิทธิภาพ (Performance) ของอัลกอริทึมใดๆ ได้จากอัตราส่วนของเวลาเดิม (T_{old}) และเวลาใหม่ (T_{new}) ที่ได้ทำการปรับปรุงอัลกอริทึมนั้นๆ ที่มา: Patterson and Hennessy (2016)

$$\frac{Perf_{new}}{Perf_{old}} = \frac{T_{old}}{T_{new}} \tag{M.3}$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพของการคำนวณแบบแบบขนานสามารถวัดได้จากอัตราส่วนระหว่างระยะเวลา $T_{alg,1}$ ของ 1 เทรดและ $T_{alg,n}$ ของ n เทรด และตั้งชื่อเรียกว่า $Speedup(n)$ ด้วยสมการต่อไปนี้

$$Speedup(n) = \frac{T_{alg,1}}{T_{alg,n}} \tag{M.4}$$

โดย $T_{alg,n}$ คือ ช่วงการรันโปรแกรมอัลกอริทึมด้วยจำนวน n เทรด โดยไม่รวมช่วงเวลาอื่นๆ ซึ่งไม่ได้เกี่ยวข้องกับการอัลกอริทึมแบบขนาน ผู้อ่านสามารถประยุกต์ตัวชี้วัดนี้กับอัลกอริทึมการคูณแมทริกซ์ ดังนี้

$$Speedup(n) = \frac{T_{mul,1}}{T_{mul,n}} \tag{M.5}$$

โดย $T_{mul,n}$ คือ ช่วงการรันโปรแกรมคำนวณแมทริกซ์จริงๆ ด้วยจำนวน n เทรด ที่ขนาด N เท่ากันโดยไม่รวมช่วงเวลาสุ่มค่าตั้งต้น และการแสดงผลอื่นๆ ผู้อ่านคำนวณค่า $Speedup(n)$ และกรอกในตารางที่ M.3 เพื่อวิเคราะห์ผลการคำนวณที่ได้โดยตอบคำถามในกิจกรรมท้ายการทดลอง

ตารางที่ M.3: ผลการคำนวณ $Speedup(n)$ ของการคูณแมทริซ์ที่ขนาด N และจำนวนเทรดเท่ากับ 1, 2, 4, 8 เทรด จากสมการที่ (M.5)

Speedup	N=200	N=400	N=800	N=1000
n=1 เทรด $Speedup(1)$	1.00	1.00	1.00	1.00
n=2 เทรด $Speedup(2)$	0	1.67	1.95	1.97
n=4 เทรด $Speedup(4)$	0	1.67	3.73	3.79
n=8 เทรด $Speedup(8)$	0	5.00	3.73	4.00

จำนวนเทรด และ จำนวนซีพียูคอร์ มีผลต่อค่า Speedup อย่างไร วิเคราะห์ทั้งหมด 3 กรณีดังนี้

(1) • จำนวนเทรด < จำนวนซีพียูคอร์

(2) • จำนวนเทรด = จำนวนซีพียูคอร์

(3) • จำนวนเทรด > จำนวนซีพียูคอร์

M.5 กิจกรรมท้ายการทดลอง

1. เหตุใดการทดลองจึงต้องใช้การหาค่าเฉลี่ยเวลาต่างๆ
2. T_{sys} หมายถึง เวลาซีพียูทำงานประเภทไหน CPU จะทำงานในส่วนของ kernel (รูปแบบภาษาเครื่อง)
3. T_{user} หมายถึง เวลาซีพียูทำงานประเภทไหน CPU จะทำงานทั้งหมด ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับ kernel
4. T_{real} มีความสัมพันธ์กับ T_{mul} อย่างไร
5. T_{user} มีความสัมพันธ์กับ T_{mul} และจำนวนเทรด n อย่างไร
6. เหตุใดค่าเฉลี่ยเวลา T_{user} จึงไม่แตกต่างกัน ที่ N คงที่
7. เวลาส่วนใหญ่ของการรัน T_{real} T_{user} และ T_{sys} สัมพันธ์กันอย่างไร จงสร้างสมการ
8. จำนวนเทรดที่เพิ่มขึ้นทำให้การคำนวณเร็วขึ้นอย่างไร มีข้อจำกัดหรือไม่
9. ที่ขนาดข้อมูล N=1000 จำนวนเทรดที่เพิ่มขึ้นทำให้ T_{user} เปลี่ยนแปลงอย่างไร มีข้อจำกัดหรือไม่
10. ที่ขนาดข้อมูล N ต่างๆ ค่า $\%CPU_{max}$ มีการเปลี่ยนแปลงและมีความสัมพันธ์กับจำนวนเทรด n อย่างไร
11. ขนาดข้อมูล N ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อ $Speedup(n)$ ที่ n=1, 2, 4 และ 8 หรือไม่ อย่างไร