

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของการสร้างภาพตัดขวางอัลกอริธึมทางพีชคณิตสำหรับทางเดินแสงแบบกรวยบนระบบคลัสเตอร์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกวัดเวลาที่ใช้ในการทดลองสร้างภาพตัดขวางบนระบบคลัสเตอร์จากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และในส่วนที่สองจะเป็นการสร้างภาพตัดขวางจากข้อมูลของภาพถ่ายเอ็กซเรย์จริง

6.2 ระบบคลัสเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ระบบคลัสเตอร์เป็นระบบที่มีโครงสร้างแบบหลายหน่วยประมวลผล และมีหน่วยความจำกระจาย(Distributed Memory)

- โครงสร้างของระบบทางฮาร์ดแวร์

โครงสร้างทางด้านฮาร์ดแวร์ของระบบที่ใช้ในการคำนวณนั้น เป็นคลัสเตอร์แบบเนื้อเดียว (Homogenous Cluster) ก็จะมีหน่วยประมวลผล ปริมาณหน่วยความจำ และส่วนประกอบอื่น ๆ เหมือนกัน ระบบที่สร้างขึ้นมานี้ประกอบด้วยเครื่อง PC X86 โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์รุ่น HPx2100 จำนวน 5 เครื่อง ชนิดที่มีสองหน่วยประมวลผลในหนึ่งเครื่อง หน่วยประมวลผล (CPU) เป็น Intel Xeon 2.4 GHz หน่วยความจำชนิด ECC จำนวน 1 GB เชื่อมต่อกันด้วยเครือข่ายภายในความเร็ว 1 Gbit/sec

- โครงสร้างของระบบทางซอฟต์แวร์

ระบบคลัสเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ใช้ระบบปฏิบัติการ Suse Linux 8.0 และใช้ gcc เป็นตัวแปลภาษาและได้ติดตั้งมาพร้อมกับตัว Linux อยู่แล้ว ในงานวิจัยนี้แนะนำให้ใช้ระบบคลัสเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการเป็นลินุกซ์เนื่องจาก

- เป็นระบบปฏิบัติการที่แจกให้ใช้ฟรี
- สามารถทำเป็นระบบคลัสเตอร์ได้จากซอฟต์แวร์และไลบรารีที่มีแจกให้ใช้ฟรีบนระบบอินเทอร์เน็ต โดยที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนซอฟต์แวร์เพิ่มเติมในการสร้างระบบคลัสเตอร์
- มีประสิทธิภาพและความแน่นอนสูง

- มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง
- มีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนระบบสูง
- โปรแกรมที่พัฒนาบนระบบลินุกซ์สามารถย้ายไปทำงานบนระบบยูนิกซ์ตระกูลอื่นได้ง่าย
- ระบบคลัสเตอร์ส่วนมากใช้ลินุกซ์เป็นระบบปฏิบัติการ ซึ่งเมื่อมีปัญหาสามารถขอคำปรึกษาจากผู้ดูแลระบบเหล่านั้นได้
- โปรแกรมที่เกี่ยวกับระบบคลัสเตอร์ส่วนมากพัฒนาบนระบบลินุกซ์สามารถแก้ไขแก่น (Kernel) ของระบบปฏิบัติการเพื่อปรับปรุงโครงสร้างของระบบปฏิบัติการได้ และสามารถพัฒนาระบบคลัสเตอร์โดยเพิ่มระบบการทำงานเข้าไปในแก่นของระบบปฏิบัติการโดยตรงได้

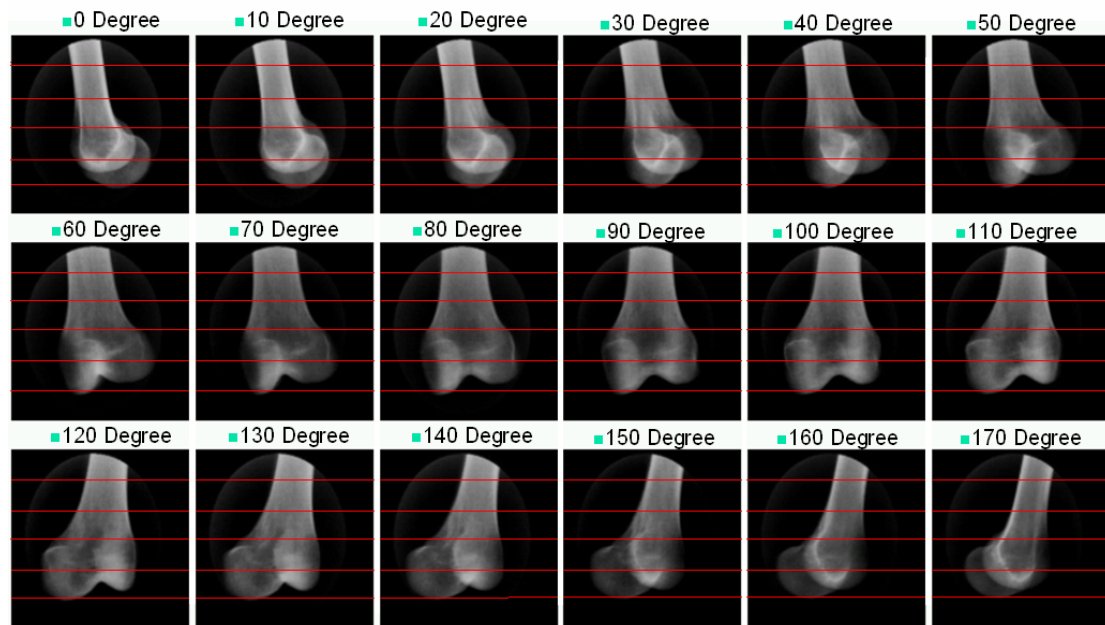
และในส่วนของซอฟต์แวร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างสถานะแวดล้อมแบบขนานนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ MPICH ซึ่งเป็นคลังชุดคำสั่งที่ถูกพัฒนาขึ้นตามมาตรฐาน MPI ซึ่งมีชุดคำสั่งต่าง ๆ ให้เลือกใช้งานอย่างเพียงพอ อีกทั้งยังสามารถใช้งานได้หลากหลายระบบปฏิบัติการ

6.3 การออกแบบโปรแกรมการสร้างภาพตัดขวาง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพัฒนาการสร้างภาพตัดขวางโดยวิธีอัลกอริธึมเชิงพีชคณิตสำหรับทางเดินแสงแบบกรวยบนระบบคลัสเตอร์เพื่อเพิ่มความเร็วในการสร้างภาพตัดขวางได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ในวิธีการที่นำเสนอให้หลักการที่ว่ากระบวนการสร้างภาพตัดขวางสามารถแบ่งย่อยข้อมูลในการประมวลผลได้แม้ข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการประมวลผลนั้นจะขึ้นต่อกันในแต่ละส่วนของการทำงาน และไม่มีคามจำเป็นต้องมีการสื่อสารระหว่างงานย่อย (Embarrassingly Parallel Computations)

6.3.1 การแบ่งงานในการสร้างภาพตัดขวาง

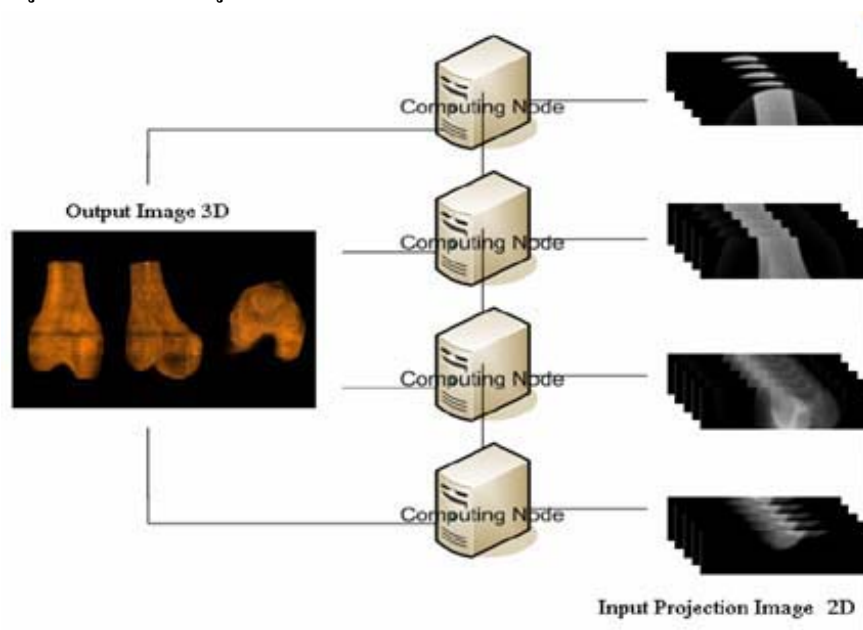
เนื่องจากระบบคอมพิวเตอร์แบบคลัสเตอร์ในการทดลองเป็นแบบคลัสเตอร์แบบเนื้อเดียวและมีหน่วยความจำเป็นแบบรวมศูนย์กลาง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้การแบ่งงานที่เป็นการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนย่อย ๆ ตามความสูงของโปรเจกชันดังรูปที่ 6.1 และความสูงของกอนปริมาตร ซึ่งจัดสรรให้แต่ละโหนดมีข้อมูลที่รับผิดชอบต่างกัน และมีข้อมูลบัฟเฟอร์กลางในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงเมื่อโหนดต่างๆประมวลผลดังนั้นการทำงานของแต่ละโหนด(Node) จึงสามารถมีเวลาในการทำงานใกล้เคียงกัน เนื่องจากความเร็วของหน่วยประมวลผลมีความเร็วใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งงานให้เครื่องละเท่าๆกันได้ ทำให้ระบบทำงานไปพร้อมๆกัน



รูปที่ 6.1 การแบ่งข้อมูลอินพุตตามความสูงของโปรเจกชัน

6.3.2 การรวมกลุ่มงาน

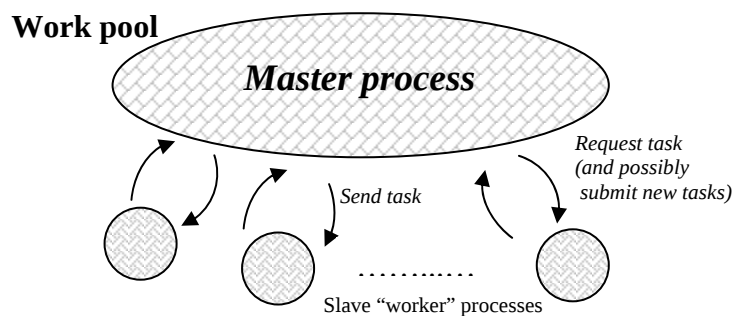
การรวมกลุ่มของงานในการการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพีชคณิตสำหรับทางเดินแสงแบบกรวย เนื่องจากการสร้างภาพตัดขวางด้วยวิธีนี้เป็นกระบวนการแบบวิธีการทำงานซ้ำและข้อมูลในแต่ละขั้นตอนนั้นขึ้นต่อกัน ดังนั้นเมื่อแบ่งข้อมูลตามความรับผิดชอบของแต่ละหน่วยประมวลผลแล้ว การกำหนดงาน (Task) จะเป็นการส่งคำสั่งและส่งกระจายออกไปทุกโหนดเพื่อให้ทุกหน่วยประมวลผลได้ทราบว่าในขณะนี้ แต่ละโหนดกำลังทำงานอะไรอยู่ เพื่อให้ทุกโหนดทำข้อมูลที่รับผิดชอบอยู่จนเสร็จสิ้น ก่อนจะทำในคำสั่งต่อไป



รูปที่ 6.2 ข้อมูลที่ทำการแบ่งจะถูกส่งไปยังเครื่องเพื่อประมวลผล แต่ละโหนด

6.3.3 การสื่อสารในระบบ

เนื่องจากงานที่ถูกแบ่งในการสร้างภาพตัดขวางไม่จำเป็นต้องมีการสื่อสารระหว่างกลุ่มงานด้วยกัน การออกแบบการสื่อสารจึงไม่มีความยุ่งยาก ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้หลักการของศูนย์รวมงาน (Work pool) และใช้การสมดุลงาน(Load Balancing)เป็นแบบศูนย์กลางคำสั่ง(Centralize Dynamic load balancing) ซึ่งระบบนี้ประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์หลาย ๆ เครื่อง เชื่อมต่อกันผ่านทางเครือข่ายความเร็วสูง และมีคอมพิวเตอร์หนึ่งทำหน้าที่เป็นผู้กระจายงานเรียกว่า Manager และทำงานไปพร้อมกับเครื่องอื่น ๆ ซึ่งเรียกว่า Worker และ นั่นคือ เครื่องManagerจะเป็นผู้กำหนดงานให้กับเครื่อง Worker ทุกๆตัวและเมื่อแต่ละเครื่อง Worker ทำงานเสร็จแล้ว Worker นั้นจะการร้องขอเพื่อของานใหม่จากเครื่อง Manager ซึ่งลำดับของคำสั่งที่ใช้ใช้นั้นจะมีลักษณะเป็นการวนรอบของการสั่งงาน ซึ่งเรียกการแบ่งงานแบบนี้ว่าราวด์-โรบิน(Round robin algorithm) ซึ่งระบบราวด์-โรบินนี้ จะทำงานเหมือนกับระบบปฏิบัติการ (Operating System) ในเครื่องประมวลผลเดี่ยว ตัวอย่างของอัลกอริธึมแบบราวด์-โรบินแสดงประกอบรูปที่ 6.3 คือ หากมีโหนดทั้งหมด 6 โหนด แต่จำนวนงานมี 20 ชิ้น ดังนั้นโหนดที่ 0 จะรับผิดชอบ 0, 6, 12 และ 18; โหนดที่ 1 จะรับผิดชอบ 1, 7, 13, 19; โหนดที่ 2 จะรับผิดชอบ 2, 8, 14; โหนดที่ 3 จะรับผิดชอบ 3, 9, 15; โหนดที่ 4 จะรับผิดชอบ 4, 10, 16; โหนดที่ 5 จะรับผิดชอบ 5, 11, 17;



รูปที่ 6.3 การทำงานของระบบศูนย์รวมงาน (Work pool)

6.4 การวัดประสิทธิภาพของการสร้างภาพตัดขวางบนระบบคลัสเตอร์

การวัดเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพเชิงปริมาตรในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการวัดเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพจริงๆเท่านั้นซึ่งจะไม่รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการอ่านภาพมาเก็บไว้ในหน่วยความจำและการตั้งค่าระบบ (Initialization) ของ MPI ซึ่งกระบวนการทั้งสองจะถูกทำครั้งเดียวในการสร้างภาพ เมื่อต้องทำการสร้างภาพในมุมมองใหม่จะไม่ต้องทำกระบวนการทั้งสองอีก แนวโน้มของเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพด้วยวิธีการที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เป็นดังสมการ 6.1

$$T = \frac{100}{p} \quad (6.1)$$

เมื่อ T คือเปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพ

p คือจำนวนเครื่องที่ใช้ประมวลผลในระบบคลัสเตอร์

เวลาที่ใช้ในการประมวลผลจะมีลักษณะตามสมการ 6.2

$$T_p = t_{comp} + t_{comm} \quad (6.2)$$

เมื่อ T_p คือเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพ

t_{comp} คือเวลาที่ใช้ในการประมวลผล

t_{comm} คือเวลาที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างโพรเซส

ระบบคลัสเตอร์เป็นระบบที่การสื่อสารระหว่างโพรเซสจะผ่านระบบเครือข่ายซึ่งความเร็วของการสื่อสารจะขึ้นอยู่กับชนิดและคุณภาพของอุปกรณ์ระบบเครือข่าย อุปกรณ์เครือข่ายที่ดีควรจะทำให้ t_{comm} มีค่าน้อยๆ เพราะเมื่อเกิดการสื่อสารระหว่างหลายๆ โพรเซสในระบบคลัสเตอร์ t_{comm} จะมีค่ามากขึ้นตามจำนวนของการสื่อสารเหล่านั้นด้วยซึ่งจะส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการสร้างภาพมากขึ้น กราฟในอุดมคติของเวลาที่ใช้ในการสร้างภาพเทียบกับจำนวนเครื่องที่ใช้ในการประมวลผลบนระบบคลัสเตอร์ซึ่งให้ $t_{comm} = 0$ แสดงดังรูปที่ 6.4

นอกจากการวัดเวลาที่ใช้ในการประมวลผลแล้วยังสามารถวัดประสิทธิภาพได้จากค่าอัตราการเพิ่มของความเร็ว (Speedup) ของการสร้างภาพได้จากสมการ 6.3

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} \quad (6.3)$$

เมื่อ S_p คืออัตราการเพิ่มของความเร็วที่ใช้ในการสร้างภาพ

T_1 เวลาที่ใช้ในการสร้างภาพบนเครื่องหนึ่งเครื่องด้วยอัลกอริทึมแบบลำดับ

T_p เวลาที่ใช้ในการสร้างภาพบนเครื่องจำนวน p เครื่องด้วยอัลกอริทึมแบบขนานบนระบบคลัสเตอร์

กราฟในอุดมคติของอัตราการเพิ่มความเร็วในการสร้างภาพเทียบกับจำนวนเครื่องที่ใช้ในการประมวลผลบนระบบคลัสเตอร์ แสดงดังรูปที่ 6.6 และค่าสุดท้ายสำหรับการวัดประสิทธิภาพคือค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ของการสร้างภาพได้ดังสมการ 6.4

$$E_p = \frac{S_p}{p} = \frac{T_1}{pT_p} = 1 \quad (6.4)$$

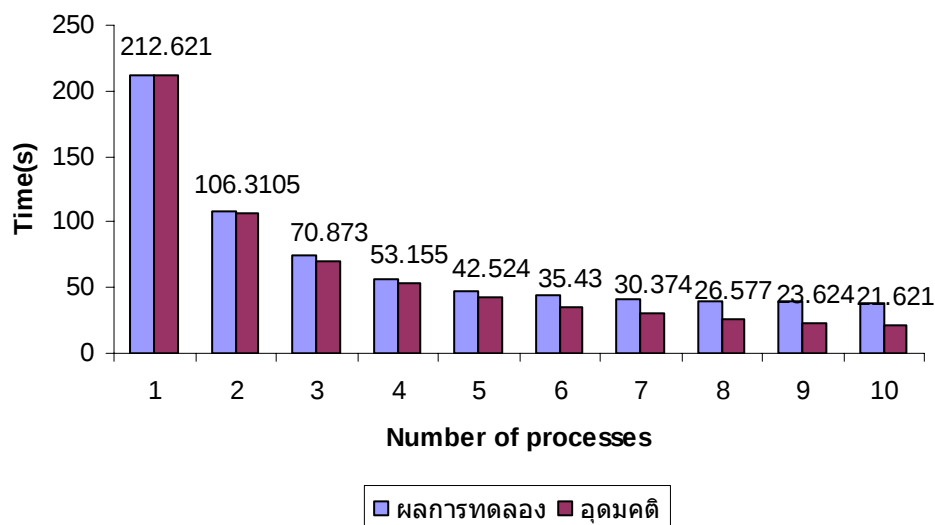
กราฟในอุดมคติของประสิทธิภาพในการสร้างภาพเทียบกับจำนวนเครื่องที่ใช้ในการประมวลผลบนระบบคลัสเตอร์ แสดงดังรูปที่ 6.6

6.5 การทดลองและผลการทดลอง

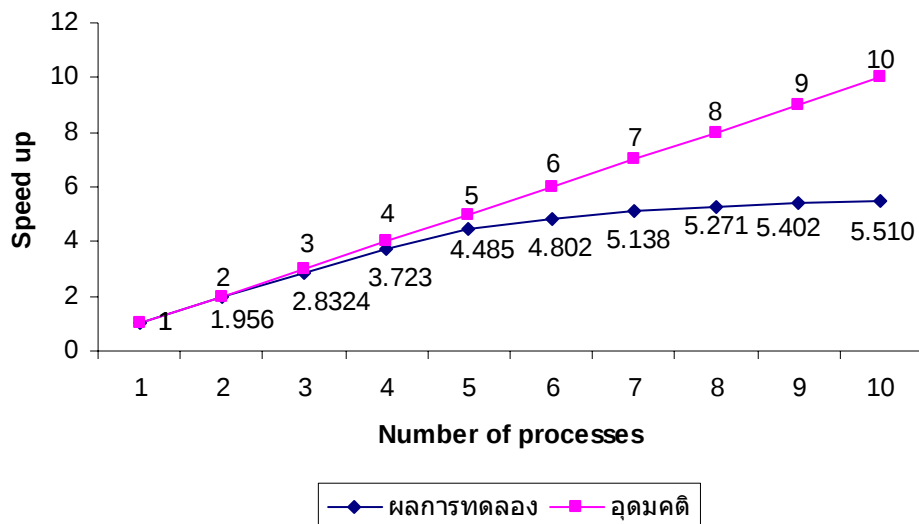
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองโดยมุ่งความสนใจไปที่การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้อัลกอริธึมเชิงพีชคณิตสำหรับทางเดินแสงแบบกรวย โดยจะมีการทดลองเปรียบเทียบทางด้านเวลาและความถูกต้องระหว่าง การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้อัลกอริธึมเชิงพีชคณิตสำหรับทางเดินแสงแบบกรวยบนระบบประมวลผลเดี่ยวกับการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้อัลกอริธึมเชิงพีชคณิตสำหรับทางเดินแสงแบบกรวยบนระบบคลัสเตอร์ และสุดท้ายคือแสดงผลในการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้ภาพเอ็กซเรย์

6.5.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับอุดมคติ

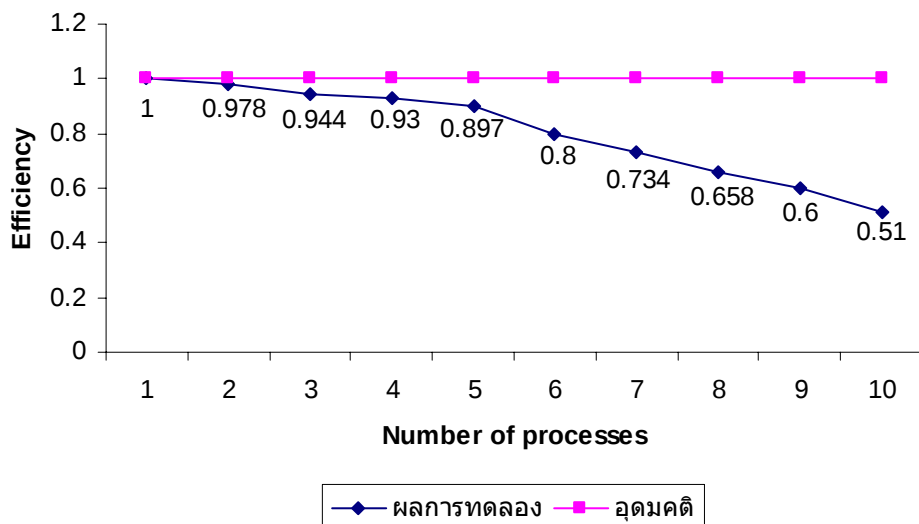
การทดลองในหัวข้อนี้จะเป็นการวัดประสิทธิภาพของระบบที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบกับระบบที่เป็นอุดมคติโดยข้อมูลเริ่มต้นคือ ข้อมูลโปรเจกชัน ของสร้างภาพตัดขวางจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดของโปรเจกชันเท่ากับ 256x256 พิกเซล จำนวน 40 มุม ในการทดลองจะได้ผลลัพธ์เป็นภาพตัดขวางขนาดปริมาตร 256x256x256 voxels โดยเปรียบเทียบเวลาระหว่างการทำงานของโปรแกรมบนระบบคลัสเตอร์และการทำงานของโปรแกรมบนระบบคลัสเตอร์อุดมคติ



รูปที่ 6.4 แผนภูมิแสดงเวลาที่ลดลงของการทดลองเปรียบเทียบกับระบบอุดมคติ



รูปที่ 6.5 แผนภูมิแสดงอัตราการเพิ่มความเร็วของการทดลองเปรียบเทียบกับระบบอุดมคติ



รูปที่ 6.6 แผนภูมิแสดงอัตราการเพิ่มความเร็วของการทดลองเปรียบเทียบกับระบบอุดมคติ

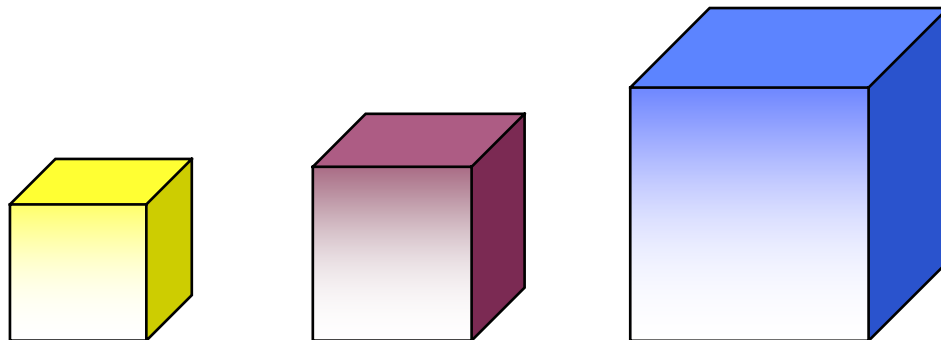
แผนภูมิที่ 6.5-6.7 เวลาที่จำนวนโปรเซส (Number of processes) หมายถึง เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ใช้การแบ่งกลุ่มของข้อมูล ดังนั้นจำนวนโปรเซสคือจำนวนของกลุ่มข้อมูลที่ใช้ประมวลผลบนระบบคลัสเตอร์

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนของโปรเซสเพิ่มขึ้นความเร็วในการสร้างภาพตัดขวางจะเพิ่มขึ้น จนถึงระดับหนึ่งความเร็วของระบบจะเริ่มคงที่ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากเวลาที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างโปรเซสเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากแผนภูมิจะเห็นได้ว่าแนวโน้มเมื่อแบ่งโปรเซสออกมามากกว่าจำนวนโหนด จะทำให้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นเริ่มคงที่ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 6.2 ดังนั้น ในการทดลองต่อไปจึงขอแสดงการแบ่งจำนวนโปรเซสเท่ากับจำนวนโหนด

6.5.2 การทดลองเปรียบเทียบเมื่อขนาดก้อนปริมาตรต่างกัน

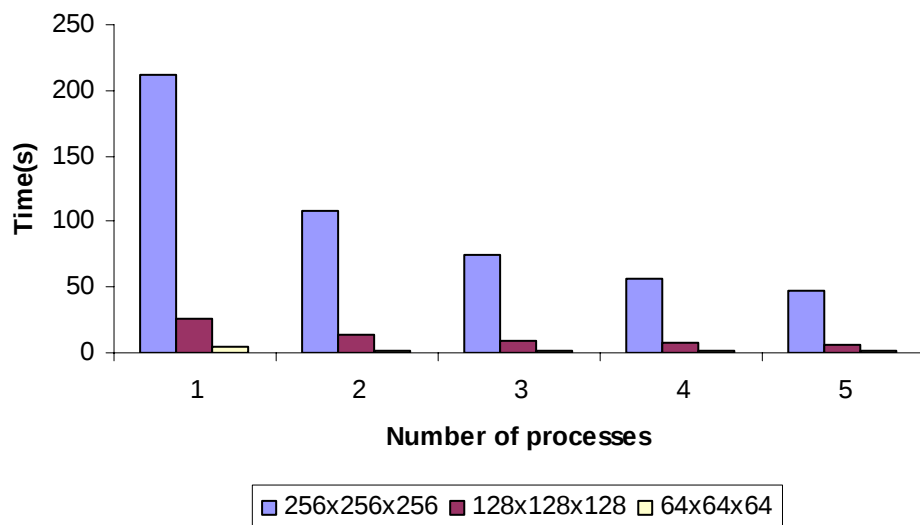
เงื่อนไขอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจในการทดลองคือ ขนาดของก้อนปริมาตรที่จะทำการสร้างภาพกลับ เพื่อจะทดสอบผลกระทบที่มีต่อความเร็วในการทำงานของระบบ โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

- ตัวแปรต้น ขนาดของก้อนปริมาตรที่จะทำการสร้างภาพกลับ
 - ตัวแปรตาม เวลาที่ใช้ในการประมวลผล
 - ตัวแปรควบคุม อีทเทอเรชัน = 3, ขนาดโปรเจ็คชัน = 40 โปรเจ็คชัน
- ขนาดของปริมาตรที่แบ่งจะมีทั้งหมด 4 ขนาด ดังตาราง

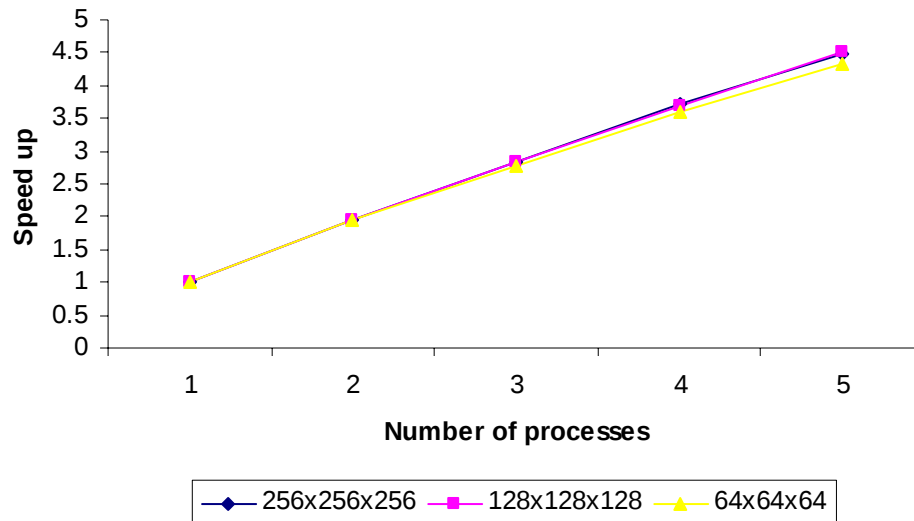


ขนาด ³ (Voxels)	Kbytes
64	256
128	2048
256	16384

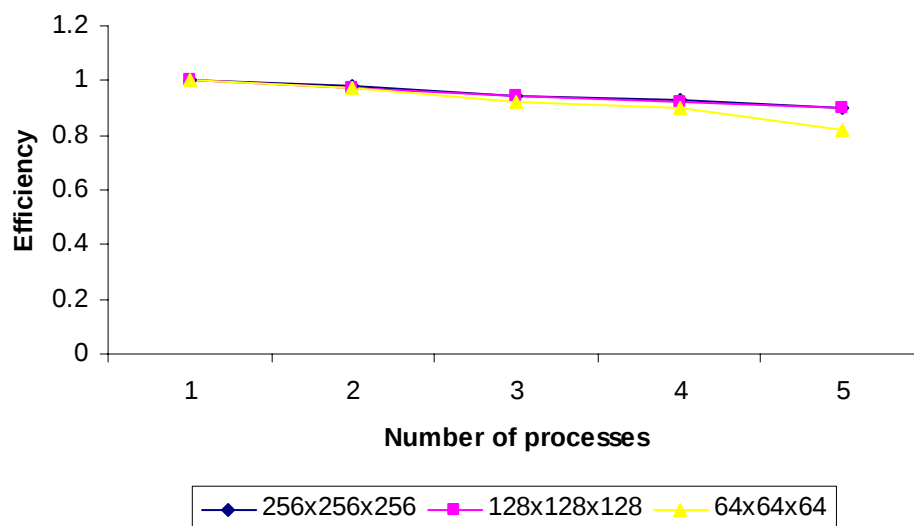
รูปที่ 6.7 ขนาดของปริมาตรที่แบ่งในการทดลอง



รูปที่ 6.8 แผนภูมิแสดงเวลาของระบบที่ใช้ในการสร้างภาพเมื่อปริมาตรต่างกัน



รูปที่ 6.9 แผนภูมิแสดงความเร็วของระบบที่ใช้ในการสร้างภาพเมื่อปริมาตรต่างกัน



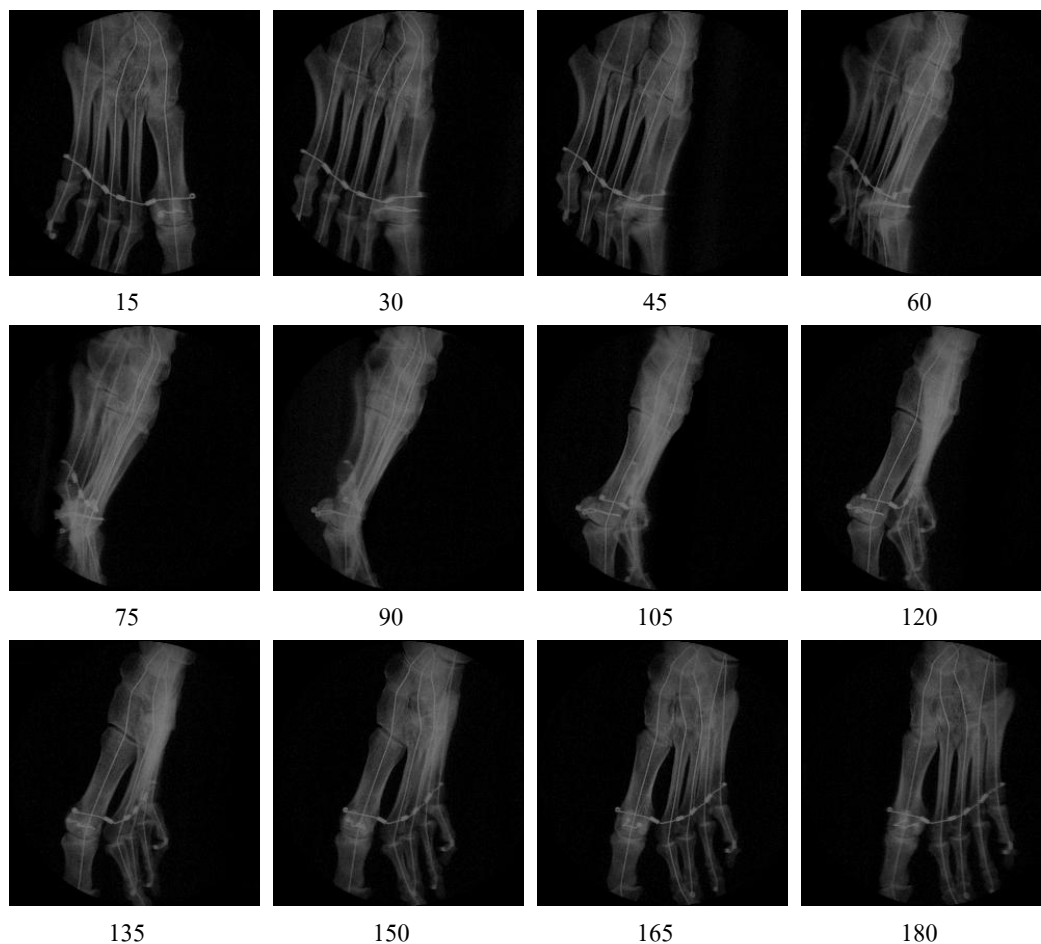
รูปที่ 6.10 แผนภูมิแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบที่ใช้ในการสร้างภาพเมื่อปริมาตรต่างกัน

แผนภูมิที่ 6.8-6.10 เวลาที่จำนวนโปรเซส (Number of processes) หมายถึงเนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ใช้การแบ่งกลุ่มของข้อมูล ดังนั้นจำนวนโปรเซสคือจำนวนของกลุ่มข้อมูลที่ใช้ประมวลผลบนระบบคลัสเตอร์

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ผลกระทบทางขนาดของปริมาตรนั้น ในด้านเวลา เมื่อก่อนปริมาตรขนาดเล็กลง การประมวลผลก็จะใช้เวลาน้อย ส่วนผลด้านความเร็วและค่าประสิทธิภาพ โดยพิจารณาจากแผนภูมิด้านความเร็ว และค่าประสิทธิภาพ จะเห็นได้ว่ากราฟมีค่าใกล้เคียงกันมาก

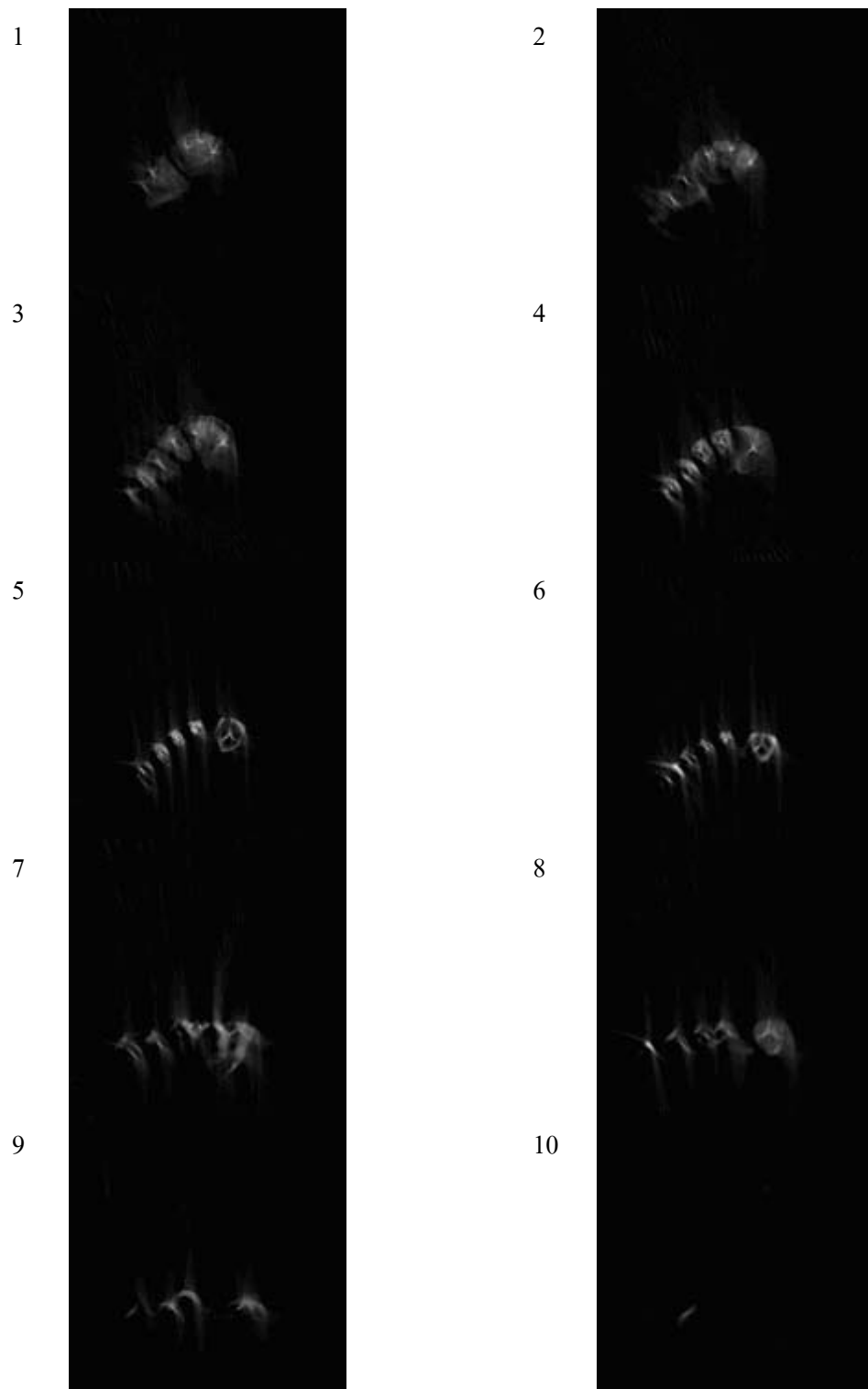
6.5.3 การสร้างภาพตัดขวางจากภาพถ่ายเอ็กซเรย์

ในการสร้างภาพตัดขวางจากภาพถ่ายเอ็กซเรย์นั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกับชุดภาพถ่ายเอ็กซเรย์ขนาด 256x256 พิกเซล ของเท้าขวา ซึ่งข้อมูลเริ่มต้นเป็นภาพเอ็กซเรย์จำนวน 60 มุม และทำการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพีชคณิตสำหรับทางเดินแสงแบบกรวยบนระบบคลัสเตอร์ ในการประมวลผลจำนวน 5 อิทเทอเรชัน

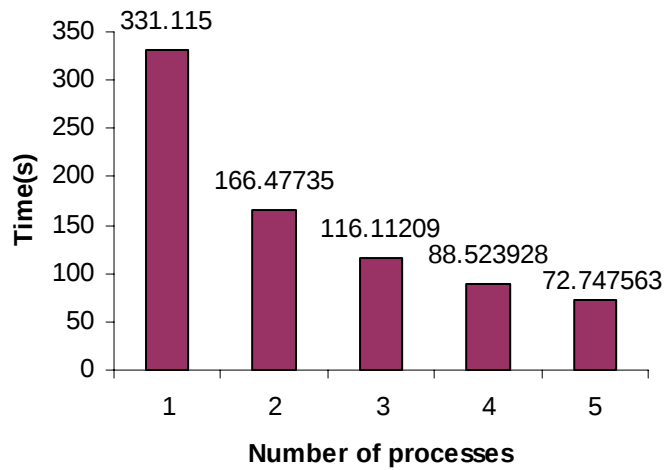


รูปที่ 6.11 ตัวอย่างของข้อมูลอินพุตซึ่งเป็นรูปเอ็กซเรย์ รูปเท้าขวาที่มุมต่าง ๆ กัน

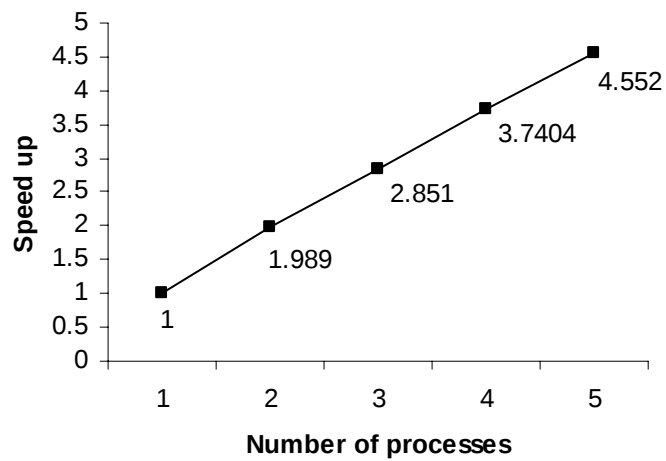
ในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบการสร้างภาพตัดขวางจากภาพถ่ายเอ็กซเรย์ในรูปที่ 6.18 ถึงรูปที่ 6.20 โดยวิธีฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน (FBP) และวิธี SART 5 iteration ที่ประมวลผลบนระบบคลัสเตอร์ หลังจากได้ภาพผลลัพธ์ซึ่งเป็นข้อมูลเมตริกซ์เชิงปริมาตร แล้วจึงนำข้อมูลเมตริกซ์เชิงปริมาตรที่ได้มาสร้างเป็นภาพ 3 มิติ ด้วยการสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยวิธีมาร์ชชิงคิวบ์ และการสร้างภาพเชิงปริมาตร



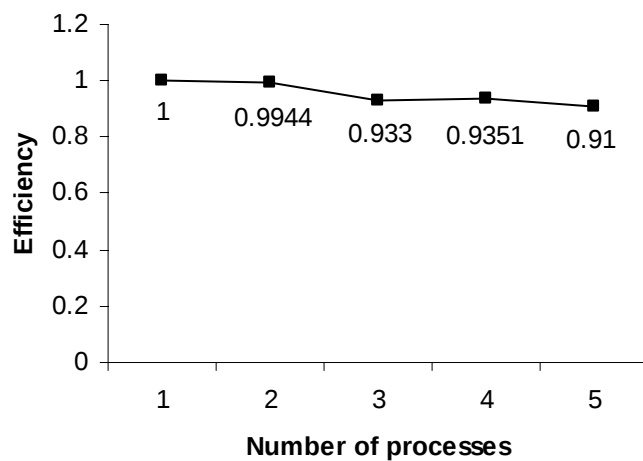
รูปที่ 6.12 ภาพผลลัพธ์ซึ่งเป็นภาพตัดขวางรูปเท้าวาที่สไลด์ต่างกันการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้อัลกอริธึมเชิงพีชคณิตสำหรับทางเดินแสงแบบกรวยบนระบบคลัสเตอร์



รูปที่ 6.13 แผนภูมิแสดงเวลาที่ลดลงของการทดลองการสร้างภาพตัดขวางด้วยภาพถ่ายเอ็กซเรย์

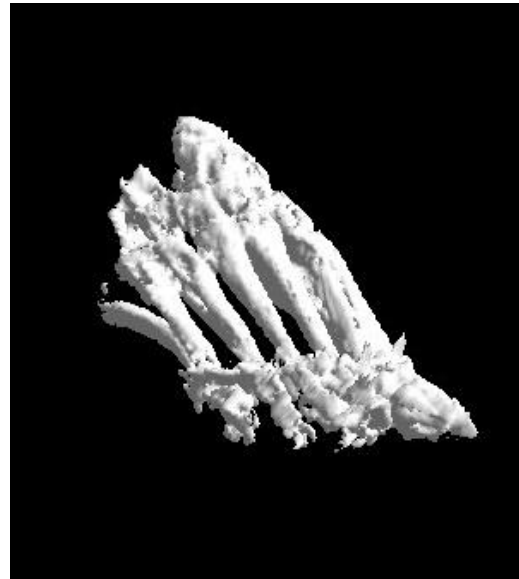
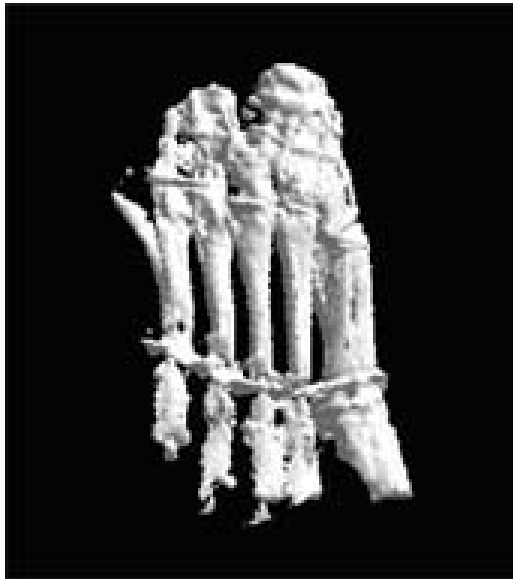


รูปที่ 6.14 แผนภูมิแสดงอัตราการเพิ่มความเร็วของการสร้างภาพตัดขวางด้วยภาพถ่ายเอ็กซเรย์

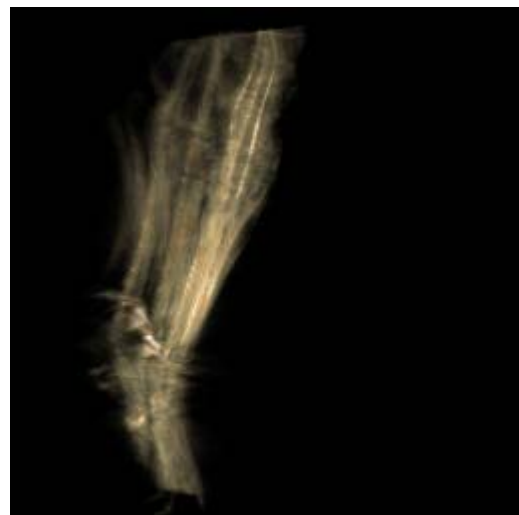


รูปที่ 6.15 แผนภูมิแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบในการสร้างภาพตัดขวางด้วยภาพถ่ายเอ็กซเรย์

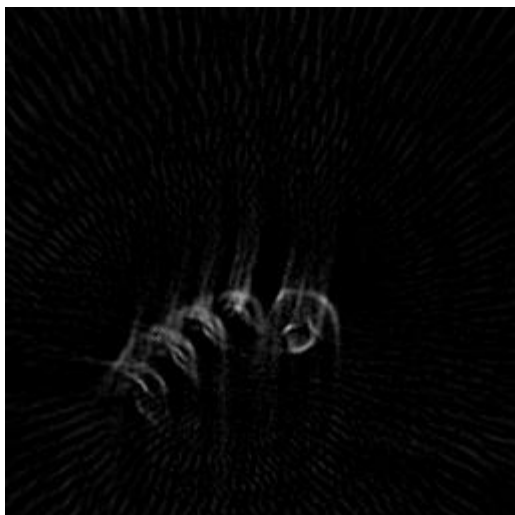
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าในรูปที่ 6.12 นั้นแสดงให้เห็นถึงภาพตัดขวางของรูปเท้าขวา ซึ่งมีลักษณะของภาพตัดขวางค่อนข้างสมบูรณ์และมีสัญญาณรบกวนน้อย ซึ่งตรงตามคุณสมบัติของการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพีชคณิต ส่วนในเรื่องของเวลานั้น ได้นำมาใช้ประมวลผลบนระบบคลัสเตอร์ ซึ่งเวลาในการประมวลผลลดลง 78 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องประมวลผลเดี่ยว และมีความเร็วเพิ่มขึ้นประมาณ 4.5 เท่าและมีค่าประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากจำนวนโปรเซสเพิ่มขึ้นจึงมีการสื่อสารมากขึ้น



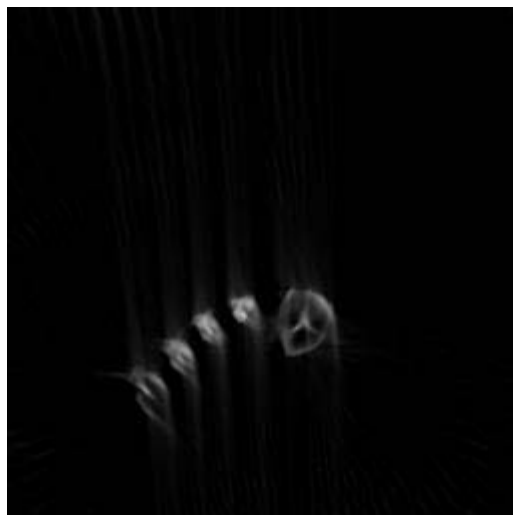
รูปที่ 6.16 ข้อมูลผลลัพธ์การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพีชคณิตสำหรับทางเดินแสง
แบบกรวยบนระบบคลัสเตอร์ โดยแสดงผลด้วยการสร้างภาพเชิงพื้นผิวด้วยวิธีมาร์ชชิงคิวบ์



รูปที่ 6.17 ข้อมูลผลลัพธ์การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้อัลกอริทึมเชิงพีชคณิตสำหรับวิเคราะห์
ทางเดินแสงแบบกรวยบนระบบคลัสเตอร์ โดยแสดงผลด้วยการสร้างภาพเชิงปริมาตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.18 ข้อมูลภาพผลลัพธ์ของภาพตัดขวางของรูปเท้าชาวสโลว์ที่ 124 เปรียบเทียบกัน

(ก) ภาพผลลัพธ์จากการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้วิธีฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน

(ข) ภาพผลลัพธ์จากการสร้างภาพตัดขวางโดย SART บนระบบคลัสเตอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.19 ข้อมูลภาพผลลัพธ์เมื่อประยุกต์ใช้การสร้างภาพเชิงพื้นผิวของรูปเท้าชาด้วยวิธีมาร์ชชิง - คิวบ์เปรียบเทียบกัน

(ก) ภาพผลลัพธ์จากการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้วิธีฟิลเตอร์แบ็คโปรเจกชัน

(ข) ภาพผลลัพธ์จากการสร้างภาพตัดขวางโดย SART บนระบบคลัสเตอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.20 ข้อมูลภาพผลลัพธ์เมื่อประยุกต์ใช้การสร้างภาพเชิงปริมาตรของรูปเท้าขวาเปรียบเทียบกัน

(ก) ภาพผลลัพธ์จากการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้วิธีฟิลเตอร์เบ็คโปรเจกชัน

(ข) ภาพผลลัพธ์จากการสร้างภาพตัดขวางโดย SART บนระบบคลัสเตอร์