

การสืบค้นวิทยุสามมิติแบบบางส่วนโดยใช้เรปกราฟ

นายวรวิทย์ อารีวิจิตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

REEB GRAPH BASED PARTIAL SHAPE RETRIEVAL FOR 3D OBJECT

Mr. Warawit Areevijit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Computer Engineering

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

วารวิทย์ อารีวิจิตร : การสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนโดยใช้เรปกราฟ.
(REEB GRAPH BASED PARTIAL SHAPE RETRIEVAL FOR 3D
OBJECT) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. พิษณุ คหนองชัยยศ, 79 หน้า.

ปัจจุบันวัตถุสามมิติได้มีการใช้อย่างแพร่หลายและมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในคลังข้อมูลดิจิทัล จึงมีงานวิจัยเป็นจำนวนมากที่ให้ความสนใจในการเพิ่มความเร็วและประสิทธิภาพในการสืบค้นวัตถุสามมิติ อย่างไรก็ตามงานส่วนใหญ่ที่ผ่านยังไม่สามารถเทียบได้กับการสืบค้นเอกสารซึ่งเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันในแง่ของความสะดวกและความหลากหลายในการสืบค้น ปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากงานส่วนใหญ่ที่ผ่านมาไม่รองรับการหาความเหมือนแบบบางส่วน ซึ่งคือความเหมือนกันของส่วนย่อยของวัตถุ จากเหตุนี้ทำให้ไม่รองรับการสืบค้นด้วยบางส่วนของวัตถุ และไม่สามารถแยกแยะวัตถุออกเป็นประเภทย่อยได้ ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้เป็นคุณลักษณะเด่นในการสืบค้นเอกสารในปัจจุบัน

วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการสืบค้นแบบบางส่วนสำหรับวัตถุสามมิติประเภทเมช ซึ่งรองรับการเปลี่ยนแปลงแบบวัตถุแข็งเกร็ง และทนต่อการเปลี่ยนแปลงท่าทางของวัตถุ โดยใช้คุณสมบัติทางโครงสร้าง และคุณสมบัติทางพื้นผิวในการอธิบายรูปร่างของวัตถุ ในงานนี้จะใช้เรปกราฟตามระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยในการแสดงคุณสมบัติทางโครงสร้าง และใช้ในการแบ่งส่วนวัตถุออกเป็นส่วนย่อยที่มีความหมายในเชิงทอพอโลยีและเพื่อเพิ่มความความแม่นยำในการเปรียบเทียบจะอธิบายแต่ละส่วนย่อยด้วยคุณสมบัติทางพื้นผิว การเปรียบเทียบระหว่างวัตถุจะถูกคำนวณผ่านการหากราฟย่อยสามมิติที่ใหญ่ที่สุดเพื่อจับคู่ส่วนย่อยที่เข้าคู่กันและยังคงรักษาข้อมูลทางทอพอโลยีไว้ การทดสอบอัลกอริทึมจะทดสอบบนวัตถุหลากหลายประเภทที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบวัตถุแข็งเกร็งและการเปลี่ยนแปลงท่าทางที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถสืบค้นวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงท่าทางและมีความซับซ้อนได้ดี และมีความเร็วในระดับที่ผู้ใช้ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมนี้ไม่เหมาะสมกับวัตถุที่มีลักษณะเว้า และวัตถุที่มีลักษณะเป็นก้อน อัลกอริทึมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพเชิงเวลาเป็น $O(n \log n)$ ในการสร้างตัวแทนข้อมูลวัตถุสามมิติเมื่อ n คือจำนวนจุดยอดของเมช และมีประสิทธิภาพเชิงเวลาเป็น $O(m')$ ในการเปรียบเทียบแต่ละครั้งโดย m คือจำนวนจุดยอดของเรปกราฟ การสืบค้นโดยเฉลี่ยแล้วจะมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเฉลี่ยเป็น 0.348

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2554

5370485921 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS : 3D MODEL RETRIEVAL/STRUCTURAL SHAPE DESCRIPTOR

WARAWIT AREEVIJIT : REEB GRAPH BASED PARTIAL SHAPE

RETRIEVAL FOR 3D OBJECT. ADVISOR : ASST. PROF. PIZZANU

KANONGCHAIYOS, Ph.D., 79 pp.

Nowadays, there are many 3D objects in digital libraries. Many approaches have been proposed in order to improve the speed and effectiveness of the retrieval. However, these approaches are not sufficient compared to the text-based retrieval. Because most of the existing 3D retrieval solutions are not support the similarity between part of object, that is partial similarity. Therefore, it is unable to query by the part of object and also cannot diagnose the element of object as text based retrieval. In this thesis, we present an algorithm for partial shape retrieval on a collection of 3D polygonal meshes. The proposed algorithm is invariant against rigid transformations and robust against different pose by using structure properties and geometric properties to represent shapes. Structure property is represented by a Reeb graph which uses an integral geodesic distance as a Morse function, whereas geometric property is represented by a Pose invariant Shape Signature. The main idea is to use Reeb graph for decomposing shape into many meaningful sub parts. Then describe each sub part with geometric property. The similarity is computed based on the Approximate Maximum Common Sub graph for matching each subpart between query shape and other while preserving topology. We evaluate our algorithm on various different model classes and deformation. The experimental results indicate better accuracy compared to the previous method in the case of deformable object. We have conclude that our approach is fast and sufficient for practical use. However, our algorithm is not suitable for concave objects and convex hull objects. The computational cost of the algorithm is $O(n \log n)$ for describing a shape and $O(m^4)$ for each matching with n is the number of vertices in mesh and m is the number of node in Reeb graph. The Mean Average Precision of this algorithm is about 0.348.

Department.....**Computer Engineering**..... Student's Signature.....
 Field of Study.....**Computer Engineering**..... Advisor's Signature.....
 Academic Year 2011

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปฏิญานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเมตตาช่วยเหลือของ ผศ.ดร. พิษณุ คนองชัยยศ ที่ปรึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งช่วยชี้แนะ สั่งสอน และให้ความช่วยเหลือในหลาย ๆ เรื่อง ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณอาจารย์มา ณ ที่นี้

ขอบพระคุณ ผศ.นครทิพย์ พร้อมพูล อาจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ ชินธเนศ และอาจารย์ ดร.ชุตินันต์ เกตวิบูลย์เวช ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบปฏิญานิพนธ์ในครั้งนี้ และให้ข้อคิดและข้อเสนอแนะต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ ทุกๆความเห็น และความช่วยเหลือของเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้องๆ ในห้องวิจัยคอมพิวเตอร์กราฟิก

ขอขอบคุณภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้สนับสนุนเรื่องทุนการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จในครั้งนี้ และคอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุนและให้กำลังใจ ตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 ผลงานตีพิมพ์จากงานวิจัย.....	5
1.7 คำจำกัดความ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1.1 เมชหลายเหลี่ยม (POLYGONAL MESH)	6
2.1.2 ทอพอโลยี (TOPOLOGY).....	7
2.1.3 ทฤษฎีมอร์ส (MORSE THEORY).....	7
2.1.4 เรบกราฟ (REEB GRAPH).....	8
2.1.5 ระยะทางจีโอเดสิก (GEODESIC DISTANCE).....	9

2.1.6	อัลกอริทึมของดิจิทัลสตรา	10
2.1.7	พลัดฟิลอัลกอริทึม	10
2.1.8	ฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่าง.....	11
2.1.9	การตรวจสอบการตัดกันของรังสีตัดกับสามเหลี่ยม.....	11
2.1.10	กราฟย่อยสามมิติที่ใหญ่ที่สุดระหว่างกราฟ	13
2.1.11	แผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน (PRECISION AND RECALL DIAGRAM).....	15
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.2.1	การสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วน	17
2.2.2	การแทนวัตถุด้วยเรขาคณิต	19
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	20
3.1	ภาพรวมของการทำงาน	20
3.2	การแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรขาคณิต	22
3.2.1	การหาค่าระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุ	22
3.2.2	การสร้างเรขาคณิตด้วยการแบ่งหน้าวัตถุสามมิติแบบเอกรูป.....	24
3.2.3	การปรับปรุงเรขาคณิต.....	25
3.2.3.1	ทำความสะอาดข้อมูลก่อนการคำนวณ	25
3.2.3.2	แบ่งหน้าระดับชั้นค่าจีโอเดสิกบนวัตถุสามมิติแบบไม่เป็นเอกรูป	26
3.2.3.3	รวมส่วนย่อยของวัตถุที่มีดีกรีเท่ากัน	27
3.2.4	การระบุกราฟอวัฏจักรระบุทิศทาง.....	28
3.3	การอธิบายรูปร่างแต่ละส่วนย่อยของวัตถุ.....	29
3.3.1	การหาค่าฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่างบนพื้นผิววัตถุ.....	29
3.3.2	การกำหนดค่าระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยสำหรับแต่ละส่วนย่อย	33
3.3.3	การสร้างฮิสโตแกรมสองมิติ	33
3.4	การเปรียบเทียบและการวัดความเหมือนระหว่างวัตถุสามมิติ.....	35

3.5	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลา	40
3.5.1	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาในขั้นตอนการสร้างตัวแทนข้อมูลของ วัตถุสามมิติ.....	40
3.5.1.1	ประสิทธิภาพเชิงเวลาในการแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรปกราฟ	40
3.5.1.2	ประสิทธิภาพเชิงเวลาในการอธิบายรูปร่างแต่ละส่วนย่อยของวัตถุสามมิติ ...	42
3.5.1.3	สรุปผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาในขั้นตอนการสร้างตัวแทน ข้อมูลของวัตถุสามมิติ	43
3.5.2	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาในขั้นตอนการเปรียบเทียบและวัด ความเหมือนระหว่างวัตถุสามมิติ	43
บทที่ 4	การทดลองและวิเคราะห์ผล	44
4.1	ภาพรวมของการทดลอง.....	44
4.2	สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง.....	44
4.3	การทดสอบเวลาที่ใช้สืบค้น.....	49
4.3.1	วิธีการทดสอบเวลาที่ใช้สืบค้น.....	50
4.3.2	ผลการทดสอบเวลาที่ใช้สืบค้น	50
4.3.3	วิเคราะห์ผลการทดสอบเวลาที่ใช้สืบค้น.....	51
4.4	การทดสอบประสิทธิผลการสืบค้นแบบบางส่วน.....	52
4.4.1	วิธีการทดสอบประสิทธิผลการสืบค้นแบบบางส่วน	52
4.4.2	ผลการทดสอบประสิทธิผลการสืบค้นแบบบางส่วน.....	53
4.4.3	วิเคราะห์ผลการทดสอบ	55
4.5	การทดสอบประสิทธิผลการสืบค้นแบบโดยรวม	57
4.5.1	วิธีการทดสอบประสิทธิผลการสืบค้นแบบโดยรวม	57
4.5.2	ผลการทดสอบประสิทธิผลการสืบค้นแบบโดยรวม	58
4.5.3	วิเคราะห์ผลการทดสอบ	61

4.6	การทดสอบการปรับพารามิเตอร์.....	64
4.6.1	การทดสอบค่าถ่วงน้ำหนัก.....	64
4.6.1.1	วิธีการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนัก.....	65
4.6.1.2	ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนัก.....	67
4.6.1.3	การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนัก.....	69
4.6.2	การทดสอบค่าระดับชั้นตั้งต้น.....	71
4.6.2.1	วิธีการทดสอบค่าระดับชั้นตั้งต้น.....	71
4.6.2.2	ผลการทดสอบค่าระดับชั้นตั้งต้น.....	72
4.6.2.3	วิเคราะห์ผลการทดสอบค่าระดับชั้นตั้งต้น.....	72
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ.....	75
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	75
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	75
	รายการอ้างอิง.....	76
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	79

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	แผนงานในการดำเนินงานวิจัย.....	4
ตารางที่ 3.1	รหัสเทียบแสดงการหากราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุด	37
ตารางที่ 3.2	รหัสเทียบแสดงการหากราฟย่อยสามัญ.....	38
ตารางที่ 3.3	รหัสเทียบแสดงขั้นตอนการปรับปรุง <i>CANDIDATES</i>	39
ตารางที่ 4.1	กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการสร้างตัวแทนข้อมูล.....	50
ตารางที่ 4.2	กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการเปรียบเทียบ	51
ตารางที่ 4.3	ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสืบค้นแบบบางส่วนในแต่ละวัตถุสามมิติสืบค้น โดยเทียบกับงานที่ใกล้เคียง	54
ตารางที่ 4.4	ผลการทดสอบประสิทธิภาพโดยรวมของการสืบค้นแบบบางส่วนโดย เปรียบเทียบกับงานที่ใกล้เคียง	55
ตารางที่ 4.5	ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสืบค้นแบบบางส่วนในแต่ละวัตถุสามมิติสืบค้น ซึ่งวัตถุสามมิติที่เกี่ยวข้องมีการเปลี่ยนแปลงท่าทางมาก	56
ตารางที่ 4.6	ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสืบค้นแบบบางส่วนในแต่ละวัตถุสามมิติสืบค้น ซึ่งวัตถุสามมิติที่เกี่ยวข้องมีการเปลี่ยนแปลงท่าทางน้อย	57
ตารางที่ 4.7	ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสืบค้นแบบโดยรวมของวัตถุสามมิติสืบค้น ทั้ง 20 ประเภท	59
ตารางที่ 4.8	ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการสืบค้นวัตถุสามมิติในแต่ละประเภท.....	60
ตารางที่ 4.9	ผลการทดสอบความแม่นยำและการเรียกคืนของวัตถุสามมิติโดยรวม ของวัตถุสามมิติทุกประเภท	61
ตารางที่ 4.10	ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการสืบค้นวัตถุสามมิติเทียบกับ ความซับซ้อนของรูปร่าง	62
ตารางที่ 4.11	รูปแบบของการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ	66
ตารางที่ 4.12	แผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืนของการสืบค้นที่มีค่าระดับชั้นตั้งต้น แตกต่างกัน	72

ตารางที่ 4.13 แผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืนของการสืบค้นที่มีค่าระดับชั้นตั้งต้น	
แตกต่างกันในกรณีที่วัตถุประสงค์สามมิติสำหรับสืบค้นมีความซับซ้อนมาก	73
ตารางที่ 4.14 แผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืนของการสืบค้นที่มีค่าระดับชั้นตั้งต้น	
แตกต่างกันในกรณีที่วัตถุประสงค์สามมิติสำหรับสืบค้นมีความซับซ้อนน้อย	74

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	องค์ประกอบของเมฆหลายเหลี่ยม[9].....	6
รูปที่ 2.2	การแทนค่าด้วยเรปกราฟโดยใช้ฟังก์ชันความสูง[10]	8
รูปที่ 2.3	ระยะทางจีโอเดสิก[11].....	9
รูปที่ 2.4	ภาพตัวอย่างวงกลมที่วางทับพอดีในรูปร่าง[12]	11
รูปที่ 2.5	การตัดกันของรังสีกับสามเหลี่ยม [13].....	13
รูปที่ 2.6	กราฟย่อยสามมิติที่ใหญ่ที่สุดระหว่างกราฟ $G1$ และ $G2$ [14]	14
รูปที่ 2.7	ประเภทของวัตถุในการสืบค้นและการค้นคืน	15
รูปที่ 2.8	แผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน.....	16
รูปที่ 3.1	กระบวนการเตรียมฐานข้อมูล.....	20
รูปที่ 3.2	กระบวนการสืบค้น.....	21
รูปที่ 3.3	ระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยของวัตถุสามมิติรูปร่างคน	23
รูปที่ 3.4	การแบ่งนั้บระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยและและเรปกราฟของวัตถุสามมิติรูปร่างคนออกเป็น 8 ระดับ	24
รูปที่ 3.5	ก.การแบ่งวัตถุสามมิติแบบเอกรูป ข.ผลลัพธ์การทำความสะอาดข้อมูล ค.เรปกราฟหลังทำความสะอาดข้อมูล	26
รูปที่ 3.6	ผลลัพธ์การแบ่งนั้บระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของวัตถุสามมิติแบบไม่เป็นเอกรูป (ข.) ของเมฆรูปร่างมนุษย์ จาก การแบ่งแบบเอกรูป 8 ระดับ (ก.).....	27
รูปที่ 3.7	ผลลัพธ์การรวมส่วนย่อยของวัตถุที่มีดีกรีเท่ากัน	28
รูปที่ 3.8	กราฟอวัฏจักรระบุทิศทาง	29
รูปที่ 3.9	การยิงรังสีในลักษณะกรวย[5]	30
รูปที่ 3.10	การยิงรังสีในลักษณะโคนกว้าง 120 องศาจำนวน 30 เส้น	31
รูปที่ 3.11	ฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่างของวัตถุสามมิติรูปร่างคน	32
รูปที่ 4.1	วัตถุสามมิติสำหรับทดสอบ[8]	45

รูปที่ 4.2	การแบ่งวัตถุสามมิติสำหรับทดสอบตามการเปลี่ยนแปลงท่าทาง สีฟ้าแสดงวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงท่าทางมาก สีเหลืองแสดงวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงท่าทางน้อย	46
รูปที่ 4.3	การแบ่งวัตถุสามมิติสำหรับทดสอบตามความซับซ้อน สีฟ้าแสดงวัตถุที่มีความซับซ้อนมาก สีเหลืองแสดงวัตถุที่มีความซับซ้อนน้อย	47
รูปที่ 4.4	วัตถุสามมิติสำหรับสืบค้น [8].....	48
รูปที่ 4.5	ก.การแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงท่าทาง สีเทาแสดงวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก สีแดงแสดงวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ข.การแบ่งตามความซับซ้อน สีเทาแสดงวัตถุที่มีความซับซ้อนมาก และ สีแดงแสดงวัตถุที่มีความซับซ้อนน้อย	49
รูปที่ 4.6	วัตถุที่ใช้เวลาในการสร้างตัวอธิบายข้อมูลนานผิดปกติและพื้นผิวที่ทำให้เกิดปัญหา	52
รูปที่ 4.7	ตัวอย่างวัตถุสามมิติที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนและแตกต่างกันเล็กน้อย กับ กราฟแสดงการเชื่อมต่อระหว่างส่วนย่อย	63
รูปที่ 4.8	รูปแบบที่แตกต่างกันของข้อมูลที่แทนวัตถุสามมิติประเภทเก้าอี้	64
รูปที่ 4.9	รูปแบบที่แตกต่างกันของข้อมูลที่แทนวัตถุสามมิติประเภทโต๊ะ	64
รูปที่ 4.10	ตัวอย่างของผลลัพธ์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยเทียบกับตัวแปรค่าถ่วงน้ำหนัก.....	67
รูปที่ 4.11	ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนเปรียบเทียบ	68
รูปที่ 4.12	ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการวัดความเหมือน	68
รูปที่ 4.13	ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนเปรียบเทียบซึ่งแบ่งตามความซับซ้อนของวัตถุสามมิติสืบค้นเป็นกลุ่มที่ที่มีความซับซ้อนมาก(ก.)และซับซ้อนน้อย(ข.).....	70
รูปที่ 4.14	ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการวัดความเหมือนซึ่งแบ่งตามความซับซ้อนของวัตถุสามมิติสืบค้นเป็นกลุ่มที่ที่มีความซับซ้อนมาก(ก.)และซับซ้อนน้อย(ข.)	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ วัตถุสามมิติ(3D Objects) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายๆด้าน เช่น การแสดงผลที่สวยงามในสื่อโฆษณา เกมส์ ภาพยนตร์ การออกแบบทางวิศวกรรม การจำลอง และการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ เป็นต้น ในการออกแบบวัตถุสามมิติใหม่นั้นส่วนมากมักจะเป็นการสร้างหรือการดัดแปลงจากวัตถุสามมิติที่มีอยู่เดิม อีกทั้งเทคโนโลยีในการได้มาซึ่งวัตถุสามมิติได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและมีราคาต่ำลง [1] จากเหตุข้างต้นนี้จึงมีการเพิ่มขึ้นของวัตถุสามมิติอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดความต้องการเพิ่มขึ้นในการสืบค้นวัตถุสามมิติ อย่างไรก็ตามการสืบค้นโดยทั่วไปซึ่งใช้ข้อความหรือคำสำคัญในการสืบค้นจะไม่เหมาะสมสำหรับการสืบค้นวัตถุสามมิติ เนื่องจากเป็นการยากที่วัตถุสามมิติแต่ละชิ้นจะมีคำอธิบายที่ละเอียดพอในการอธิบายรูปร่างของวัตถุอย่างครบถ้วนและผลของการอธิบายก็อาจจะไม่เป็นที่เข้าใจของผู้ใช้[1] จากเหตุนี้แนวคิดในการสืบค้นวัตถุสามมิติโดยขึ้นกับข้อมูลของวัตถุสามมิติ (Content-based retrieval) จึงได้ถูกนำเสนอ ซึ่งจะใช้คุณลักษณะทางรูปร่างของวัตถุสามมิติในการหาวัตถุสามมิติที่เหมือนกัน การสืบค้นวัตถุสามมิติโดยขึ้นกับข้อมูลของวัตถุสามมิติจะไม่ขึ้นกับความผิดพลาดในการทำงานของมนุษย์และลดภาระของผู้ใช้ในการ ในการอธิบายวัตถุสามมิติซึ่งทำให้สามารถทำงานได้ดีกว่าการสืบค้นที่ขึ้นกับข้อความ[2]

การสืบค้นวัตถุสามมิติโดยขึ้นกับข้อมูลของวัตถุสามมิติมีขั้นตอนหลักๆ 2 ขั้นตอนคือ การอธิบายรูปร่างของวัตถุสามมิติและการเปรียบเทียบ โดยปัญหาหลักๆในการสืบค้นจะขึ้นกับขั้นตอนการอธิบายรูปร่างเป็นหลัก ปัญหาที่สำคัญได้แก่ การทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบวัตถุแข็งเกร็งเช่น การหมุน การเลื่อนตำแหน่ง และการย่อ/ขยายความสามารถในการถูกคำนวณได้อย่างรวดเร็ว การทนต่อการเปลี่ยนท่าทางของวัตถุความสามารถในการแยกแยะวัตถุ

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสืบค้นวัตถุสามมิติโดยขึ้นกับข้อมูลของวัตถุสามมิติที่ผ่านมาสามารถแบ่งประเภทของการสืบค้นได้ 2 แบบได้แก่ การสืบค้นโดยหาความเหมือนโดยรวมของวัตถุทั้งชิ้น (Global matching) และ การสืบค้นโดยหาความเหมือนบางส่วน of วัตถุ (Partial matching) โดยในงานที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะเป็นการสืบค้นโดยหาความเหมือนโดยรวมของวัตถุทั้งชิ้นซึ่งใช้การเปรียบเทียบรูปร่างโดยรวมของวัตถุเพื่อค้นคืนวัตถุที่มีรูปร่างโดยรวมเหมือนกัน[3-7] จุดเด่นของงานในกลุ่มนี้คือ ความสามารถในการคำนวณที่

รวดเร็วและความสามารถในการทำดัชนี อย่างไรก็ตามการสืบค้นในลักษณะนี้ไม่รองรับการสืบค้นวัตถุที่ใกล้เคียงแต่มีความแตกต่างกันในรายละเอียดของส่วนย่อยของวัตถุระหว่างคู่วัตถุเปรียบเทียบทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการสืบค้นเช่น การเปรียบเทียบระหว่างวัตถุสามมิติรูปร่างมนุษย์ที่มีสองขา กับมีเพียงขาเดียวจะถือว่ารูปร่างโดยรวมนั้นแตกต่างกันมาก

งานในกลุ่มของการสืบค้นโดยหาความเหมือนบางส่วนของวัตถุ[15-19] จะค้นคืนวัตถุที่มีส่วนย่อยเหมือนกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ การสืบค้นโดยหาความเหมือนโดยรวม การสืบค้นกลุ่มนี้จะครอบคลุมปัญหาที่กว้างกว่าเนื่องจากวัตถุที่มีรูปร่างโดยรวมเหมือนกันคือส่วนย่อยของคู่วัตถุที่เหมือนกันในกรณีที่ส่วนย่อยครอบคลุมวัตถุทั้งชิ้น ซึ่งทำให้มีความหลากหลายในการสืบค้นที่มากขึ้นเช่น การสืบค้นโดยใช้เฉพาะส่วนที่สนใจ การสืบค้นวัตถุสามมิติที่มีพื้นผิวไม่ครบถ้วน นอกเหนือจากนั้นการสืบค้นด้วยวิธีนี้จะใกล้เคียงกับการสืบค้นข้อมูลเอกสารที่ใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันซึ่งใช้เพียงตัวอย่างของข้อความในเอกสารในการค้นคืนเอกสารที่ใกล้เคียง แต่งานในกลุ่มยังมีปัญหาในเรื่องของความเร็วเนื่องจากมีจำนวนส่วนย่อยมากและมีการเปรียบเทียบระหว่างส่วนย่อยแต่ละชิ้นเป็นจำนวนมาก และ ในงานก่อนหน้านี้ที่ผ่านส่วนใหญ่แล้วยังไม่รองรับการเปลี่ยนแปลงท่าทางของวัตถุ

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนออัลกอริทึมสำหรับการสืบค้นโดยการหาความเหมือนบางส่วนของวัตถุโดยรูปร่างของวัตถุสามมิติจะถูกระบุส่วนย่อยด้วยเรปกราฟเพื่อให้ได้เฉพาะส่วนย่อยเท่าที่จำเป็น ส่วนย่อยแต่ละชิ้นจะถูกเชื่อมโยงกันด้วยเรปกราฟและถูกอธิบายด้วยตัวอธิบายรูปร่างโพสออบลิเวียส[5] เพื่อให้การสืบค้นรองรับการเปลี่ยนแปลงแบบวัตถุแข็งแกร่งและการเปลี่ยนแปลงท่าทางของวัตถุ ความเหมือนระหว่างบางส่วนของวัตถุจะถูกระบุผ่านการหากราฟย่อยที่ใหญ่ที่สุดระหว่างคู่เรปกราฟเปรียบเทียบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบวัตถุแข็งแกร่ง และการเปลี่ยนแปลงท่าทาง โดยใช้เรปกราฟตามระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยแบ่งส่วนวัตถุออกเป็นส่วนตามข้อมูลเชิงทอพอโลยีเพื่อให้ได้เฉพาะส่วนย่อยที่จำเป็นและใช้อธิบายข้อมูลเชิงทอพอโลยีของกลุ่มส่วนย่อยของวัตถุ แล้วอธิบายคุณสมบัติของพื้นผิวส่วนย่อยด้วยตัวอธิบายรูปร่างโพสออบลิเวียส[5] ข้อมูลตัวแทนรูปร่างจะแสดงในรูปแบบของกราฟคุณลักษณะโดยการเปรียบเทียบวัตถุจะเป็นการเปรียบเทียบส่วนย่อยของกราฟโหนดการหากราฟย่อยสามัญระหว่างกราฟที่ใหญ่ที่สุด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- ศึกษาและทดลองเฉพาะวัตถุสามมิติที่มีพื้นผิวราบลื่นและเชื่อมโยงกันเป็นชั้นเดียวกัน
- ศึกษาและทดลองเฉพาะกรณีี่ส่วนของวัตถุสามมิติสอดคล้องกัน
- ทดสอบและวัดผลโดยขึ้นกับข้อมูลทดสอบจากฐานข้อมูล[8]
- โปรแกรมที่ใช้ทำการทดลองนี้พัฒนาด้วยภาษาซีชาร์ป และ พัฒนาระบบปฏิบัติการวินโดวส์วิสต้า

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

ช่วยให้ผู้ใช้เข้าถึงข้อมูลวัตถุสามมิติได้รวดเร็วและสะดวกมากขึ้น สามารถค้นหาวัตถุที่เกี่ยวข้องกับวัตถุสืบค้นได้หลากหลายมากกว่าเดิม โดยวัตถุสามมิติสืบค้นไม่ต้องจำกัดท่าทางและการวางตัว

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยจะแบ่งออกเป็นเจ็ดขั้นตอนดังนี้ คือ ศึกษางานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง วิเคราะห์ และออกแบบอัลกอริทึม ออกแบบโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ทดสอบ พัฒนา และทดสอบโปรแกรมประยุกต์ ทดลองและประเมินผล สรุปผลการดำเนินงาน และจัดทำวิทยานิพนธ์ โดยที่แต่ละขั้นตอนมีช่วงเวลาดังนี้

		เดือนเริ่มต้น	ระยะเวลา(เดือน)	ปี 53	ปี 53	ปี 53	ปี 53	ปี 53	ปี 53	ปี 54	ปี 54	ปี 54	ปี 54	ปี 54	ปี 54	ปี 54	ปี 54	ปี 55	ปี 55	ปี 55		
1	ศึกษางานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	ก.ค.-53	8	████████████████████																		
2	วิเคราะห์ และออกแบบอัลกอริทึม	ก.ย.-53	7						████████████████████	████████████████████	████████████████████	████████████████████										
3	ออกแบบโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ทดสอบ	ม.ค.-53	6									████████████████████	████████████████████	████████████████████								
4	พัฒนา และทดสอบโปรแกรมประยุกต์	พ.ค.-54	6											████████████████████	████████████████████	████████████████████	████████████████████					
5	ทดลองและประเมินผล	ต.ค.-54	6															████████████████████	████████████████████	████████████████████		
6	สรุปผลการดำเนินงาน	ม.ค.-55	2																	████████████████████	████████████████████	
7	จัดทำวิทยานิพนธ์	ก.พ.-55	2																		████████████████████	

ตารางที่ 1.1 แผนงานในการดำเนินงานวิจัย

1.6 ผลงานตีพิมพ์จากงานวิจัย

“Reeb graph based partial shape retrieval for non-rigid 3D object” โดย Warawit Areevijit and Pizzanu Kanongchaiyos ใน Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry, 2011, pp. 573-576

1.7 คำจำกัดความ

- 1 อีสโตแกรม คือ การเสนอข้อมูลในรูปของการกระจายตัวของความน่าจะเป็น
- 2 ทอพอโลยี คือ ความสัมพันธ์ที่ว่าด้วยการเชื่อมต่อกันระหว่างข้อมูลของวัตถุ
- 3 รังสี คือ ส่วนของเส้นตรงวิ่งจากจุดเริ่มต้นไปตามทิศที่ระบุเป็นระยะอนันต์
- 4 การแบ่งนับแบบเอกรูป คือ การแบ่งออกเป็นส่วยย่อยอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดการแบ่งเท่า ๆ กัน
- 5 กราฟ คือ เซตของจุดยอดซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยเส้นเชื่อม
- 6 ส่วนย่อยของวัตถุ คือ วัตถุซึ่งเป็นซับเซตของวัตถุทั้งชิ้น
- 7 เวกเตอร์ปกติ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยระบุทิศทางของการวางตัวจากจุดสังเกต
- 8 จุดยอดฐาน คือ จุดยอดซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มจุดยอดที่มีความสัมพันธ์กัน
- 9 วัตถุสืบค้น คือ วัตถุที่ใช้เป็นต้นแบบเพื่อหาวัตถุที่ใกล้เคียงหรือเหมือนกัน
- 10 วัตถุค้นคืน คือ วัตถุที่ใกล้เคียงกับวัตถุสืบค้นและถูกนำออกมาแสดง
- 11 การสืบค้นแบบบางส่วน คือ การสืบค้นเพื่อค้นหาวัตถุที่มีส่วนย่อยของวัตถุเหมือนกัน
- 12 การสืบค้นแบบโดยรวม คือ การสืบค้นเพื่อค้นหาวัตถุที่รูปร่างโดยรวมเหมือนกัน

บทที่ 2

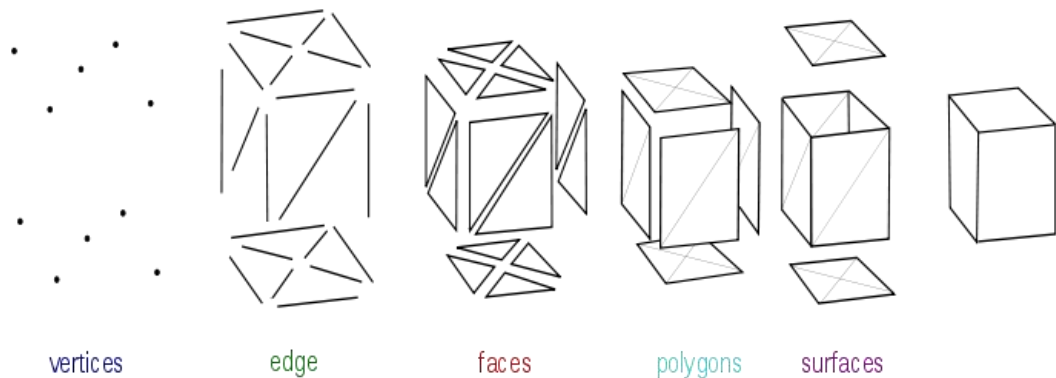
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้ เมชหลายเหลี่ยม ทอพอโลยี ทฤษฎีมอร์ส เรปกราฟ ระยะทางจีโอเดสิก ดิจค์สตราอัลกอริทึม ฟลัดฟิลด์อัลกอริทึม ฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่าง การตรวจสอบการตัดกันของรังสีตัดกับสามเหลี่ยม กราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดระหว่างกราฟ และ แผนภาพความแน่นและการเรียกคืน

2.1.1 เมชหลายเหลี่ยม (Polygonal Mesh)

เมชหลายเหลี่ยมคือการนำเสนอวัตถุสามมิติด้วยจุดยอด (vertex) เส้นเชื่อม (edge) หน้า (face) รูปหลายเหลี่ยม (polygons) และ พื้นผิว (surface) รายละเอียดข้อมูลแต่ละแบบแสดงดัง



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเมชหลายเหลี่ยม [9]

จุดยอดจะแสดงข้อมูลตำแหน่ง ตำแหน่ง เส้นเชื่อมแสดงการเชื่อมต่อกันของจุดยอดหน้าคือเซตของเส้นเชื่อมที่ติดกันและล้อมรอบพื้นที่ปิด รูปหลายเหลี่ยมคือเซตของหน้าทีติดกันพื้นผิวแสดงกลุ่มของรูปหลายเหลี่ยมหรือหน้า ที่ต่อเนื่องกัน และมีความเปรียบต่างระหว่างกันที่ราบเรียบ

2.1.2 ทอพอโลยี (Topology)

ทอพอโลยี เป็นความสัมพันธ์ที่วางด้วยการเชื่อมต่อกันระหว่างข้อมูลของวัตถุ ข้อมูลเชิงทอพอโลยีไม่เพียงแต่จะเก็บการเชื่อมต่อกันระหว่างข้อมูลเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ต่าง ๆ บนวัตถุอีกด้วย โดยที่ทอพอโลยีบนเซต X คือซับเซต $T \subseteq 2^X$ และเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้

1. ถ้า $S_1, S_2 \in Y$ แล้ว $S_1 \cap S_2 \in Y$
2. ถ้า $S_1, S_2 \in Y$ แล้ว $S_1 \cup S_2 \in Y$
3. $\emptyset, X \in Y$

ปริภูมิเชิงทอพอโลยี (Topological space) เป็นเซตของข้อมูล (X, Y) โดยที่ X เป็นเซตข้อมูลและ Y เป็นข้อมูลเชิงทอพอโลยีของเซต X

2.1.3 ทฤษฎีมอร์ส (Morse Theory)

ทฤษฎีมอร์ส จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของจุดวิกฤตบนฟังก์ชันจำนวนจริง ต่อเนื่อง กับข้อมูลเชิงทอพอโลยีของพื้นผิวนั้น ซึ่งจุดวิกฤตบนฟังก์ชันจำนวนจริงต่อเนื่องจะเป็นจุดที่ความชันมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยฟังก์ชันจำนวนจริงต่อเนื่องนี้จะเรียกว่าฟังก์ชันมอร์ส (Morse function) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นฟังก์ชัน f ที่ทำให้เมตริกซ์เฮสเซียน H สามารถหาดีเทอร์มิแนนต์ได้ไม่เท่ากับศูนย์ ณ ทุกๆจุดวิกฤต

กำหนดให้ f เป็นฟังก์ชัน n ตัวแปร

$$f = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

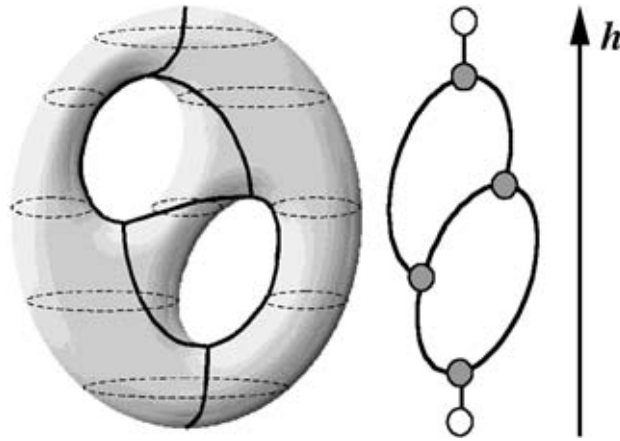
เมตริกซ์เฮสเซียน H ณ จุดวิกฤต p จะมีค่าเป็น

$$H_f(p) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(p)}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(p)}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(p)}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f(p)}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(p)}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f(p)}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f(p)}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(p)}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(p)}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}$$

บทนิยามพื้นฐานของทฤษฎีมอร์สว่าด้วย ให้ฟังก์ชัน $f: M \rightarrow R$ คือฟังก์ชันมอร์สที่อธิบายความสัมพันธ์เชิงทอพอโลยีของแมนิโฟลด์ M โดยที่แมนิโฟลด์ M คือกลุ่มของข้อมูลที่อยู่ในปริภูมิเชิงทอพอโลยี และจุดวิกฤตทุกๆจุดบนฟังก์ชัน f จะเป็นจุดที่สามารถนำมาใช้อธิบายข้อมูลเชิงทอพอโลยีได้

2.1.4 เรบกราฟ (Reeb Graph)

เรบกราฟเป็นวิธีในการแทนข้อมูลเชิงทอพอโลยีในรูปแบบของกราฟ โดยระบุตำแหน่งบนกราฟด้วยจุด (Node) และเส้นเชื่อม (Edge) โดยจุดที่อยู่บนวัตถุจะต้องมีจุดวิกฤตที่ได้จากฟังก์ชันมอร์สที่ใช้แทนข้อมูลเชิงทอพอโลยีนั้นๆ ซึ่งข้อดีของเรบกราฟคือสามารถรักษาข้อมูลเชิงทอพอโลยีไว้ได้ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัตถุก็ตาม ตัวอย่างการแทนค่าด้วยเรบกราฟโดยใช้ฟังก์ชันความสูงเป็นฟังก์ชันมอร์สแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การแทนค่าด้วยเรบกราฟโดยใช้ฟังก์ชันความสูง[10]

กำหนดให้ฟังก์ชัน $f: M \rightarrow R$ เป็นฟังก์ชันมอร์สบนแมนิโฟลด์ M ซึ่งแมนิโฟลด์เป็นข้อมูลเชิงทอพอโลยีที่สนใจ เรบกราฟของแมนิโฟลด์ M ที่ขึ้นกับฟังก์ชัน f จะสามารถนิยามได้ว่าเป็นปริภูมิผลหารของ $M \times R$ ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบสมมูล(\sim) เมื่อ

$$(X_1, f(X_1)) \sim (X_2, f(X_2))$$

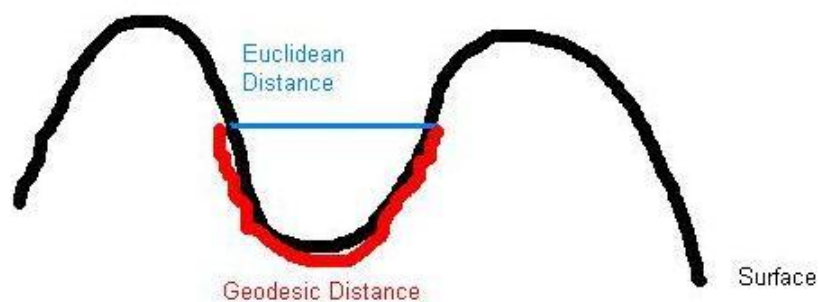
โดยที่

$$f(X_1) = f(X_2)$$

X_1, X_2 เป็นส่วนประกอบของการเชื่อมต่อเดียวกันของ $f^{-1}(f(X_1))$ และเรบกราฟสามารถแทนค่าของข้อมูล $(X_1, f(X_1))$ และ $(X_2, f(X_2))$ ได้ด้วยจุดๆเดียวเมื่อ $f(X_1) = f(X_2)$ และ X_1, X_2 เป็นส่วนประกอบของการเชื่อมต่อเดียวกัน

2.1.5 ระยะทางจีโอเดสิก (Geodesic Distance)

ระยะทางจีโอเดสิก คือ ระยะที่สั้นที่สุดตามพื้นผิวของวัตถุจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ตัวอย่างแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ระยะทางจีโอเดสิกสามารถประมาณได้ด้วยระยะทางสั้นที่สุดจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งซึ่งหาได้โดยดิเจคส์ตราอัลกอริทึม



รูปที่ 2.3 ระยะทางจีโอเดสิก[11]

2.1.6 อัลกอริทึมของดิเจคส์ตรา

อัลกอริทึมของดิเจคส์ตราเป็นอัลกอริทึมสำหรับ หาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากจุดยอดที่กำหนดไปยังจุดยอดอื่นบนกราฟที่ไม่มีเส้นเชื่อมที่เป็นลบ ซึ่งอัลกอริทึมของดิเจคส์ตรามีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดให้ค่าระยะทางของจุดเริ่มต้นเป็นศูนย์ ส่วนจุดอื่นทั้งหมดเป็นอนันต์ และ กำหนดสถานะยังไม่ถูกพบให้กับทุกจุดยอดยกเว้นจุดเริ่มต้น แล้ว กำหนดให้จุดเริ่มต้นเป็นจุดปัจจุบัน
2. พิจารณาระยะทางจากรอบข้างที่ยังไม่ถูกพบของจุดปัจจุบันกับระยะทางของจุดปัจจุบันบวกด้วยระยะทางจากจุดปัจจุบันไปยังจากรอบข้าง ถ้าระยะทางของจุดปัจจุบันบวกด้วยระยะทางจากจุดปัจจุบันไปยังจากรอบข้างมีค่าน้อยกว่าที่น้อยกว่าให้กับจากรอบข้างที่พิจารณาและเพิ่มจุดยอดในแถวคอย
3. กำหนดให้จุดปัจจุบันมีสถานะถูกพบซึ่งถือมีค่าระยะทางน้อยที่สุดแล้ว
4. กำหนดจุดในแถวคอยที่มีค่าระยะทางน้อยที่สุดและเป็นจุดที่ยังไม่ถูกพบเป็นจุดปัจจุบัน
5. ทำซ้ำข้อ 3 จนกระทั่งไม่มีจุดในแถวคอย

2.1.7 ฟลัดฟิลอัลกอริทึม

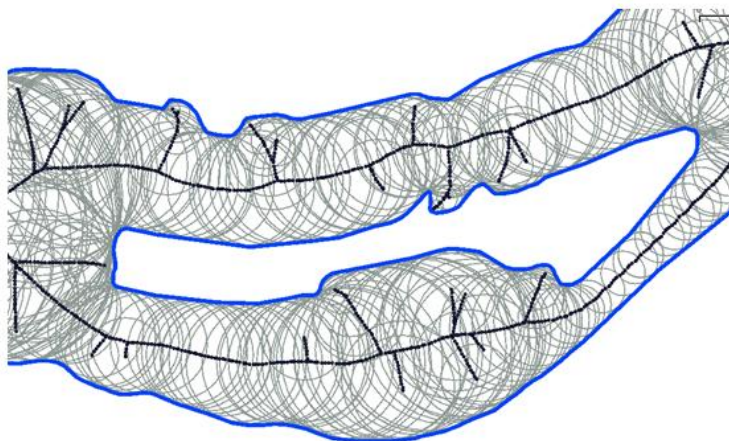
ฟลัดฟิลอัลกอริทึมเป็นอัลกอริทึมสำหรับใช้ในการหาพื้นที่ต่อเนื่องจากจุดเริ่มต้นที่กำหนด ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดแถวคอยว่างสำหรับเก็บข้อมูลจุด
2. กำหนดค่าเอกลักษณ์เฉพาะให้กับจุดเริ่มต้นแล้วเพิ่มจุดเริ่มต้นให้กับแถวคอย
3. ดึงข้อมูลจากแถวคอย
4. กำหนดค่าเอกลักษณ์เฉพาะให้กับทุก ๆ จุดที่อยู่ข้างเคียงกับจุดที่มาจากแถวคอยแล้วเพิ่มจุดเหล่านั้นให้กับแถวคอยให้กับแถวคอย
5. ทำซ้ำข้อ 3 จนกระทั่งไม่มีจุดในแถวคอย

ผลลัพธ์จะได้กลุ่มของจุดที่อยู่ติดกันซึ่งมีค่าเอกลักษณ์เฉพาะค่าเดียวกัน

2.1.8 ฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่าง

ฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่าง คือ สเกลาร์ฟังก์ชันบนพื้นผิวของของรูปร่าง ($F: M \rightarrow R$) ซึ่งแสดงถึงขนาด ของเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่วางทับพอดีในรูปร่างของวัตถุ ณ จุดสัมผัสใด ๆ บนพื้นผิวแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งฟังก์ชันนี้สามารถแสดงถึงความหนาของวัตถุ ณ ตำแหน่งนั้น



รูปที่ 2.4 ภาพตัวอย่างวงกลมที่วางทับพอดีในรูปร่าง[12]

2.1.9 การตรวจสอบการตัดกันของรังสีตัดกับสามเหลี่ยม

การตรวจสอบการตัดกันของรังสีกับสามเหลี่ยม เป็นการทดสอบว่าเส้นตรงที่วิ่งจากจุดตั้งต้นที่กำหนดในทิศทางที่ระบุไว้จะตัดกับหน้าสามเหลี่ยมในระบบพิกัด 3 มิติหรือไม่ ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจสอบการชนกัน และการวัดระยะห่าง ระหว่างวัตถุสามมิติ โดยขั้นตอนในการตรวจสอบแสดงได้ดังนี้

1. หาจุดตัดบนระนาบที่สามเหลี่ยมวางตัวกับรังสี

กำหนดให้รังสีมีสมการดังนี้

$$P = P_0 + tV$$

P คือจุดใด ๆ บนรังสี

P_0 คือจุดตั้งต้น

V คือเวกเตอร์ระบุทิศทางของรังสี

t คือความยาวของรังสี

กำหนดให้ระนาบมีสมการดังนี้

$$(X - X_0).N = 0$$

X คือจุดใดบนระนาบ

X_0 คือจุดตั้งต้นบนในสามเหลี่ยม

N คือเวกเตอร์ปกติระนาบทิศทางของระนาบที่สามเหลี่ยมวางตัว

แทนสมการรังสีในสมการระนาบเพื่อหาจุดตัดของรังสีบนระนาบที่จุด $P = X$

$$(P_0 + tV - X_0).N = 0$$

$$(P_0 - X_0).N + tV.N = 0$$

$$t = \frac{(P_0 - X_0).N}{V.N}$$

แทนค่า t ในสมการรังสีเพื่อหาจุดตัดโดยค่า t ที่พิจารณาเป็นไปได้อันเป็นรูปแบบ

ได้แก่

$t > 0$ แสดงว่ารังสีตัดกับระนาบ

$t = 0$ แสดงว่ารังสีขนานกับระนาบ

$t < 0$ แสดงว่ารังสีตัดกับระนาบในทิศทางตรงกันข้ามกับ V

2. ตรวจสอบจุดตัดบนระนาบว่าวางตัวในสามเหลี่ยมหรือไม่

พิจารณาเฉพาะกรณีที่ $t > 0$

กำหนดสมการสำหรับการตรวจสอบได้ดังนี้

$$P = T_1 + \alpha(T_2 - T_1) + \beta(T_3 - T_1)$$

$$(P - T_1) = \alpha(T_2 - T_1) + \beta(T_3 - T_1)$$

แทน $(P - T_1)$ ด้วย V_2 แทน $(T_3 - T_1)$ ด้วย V_1 และแทน $(T_2 - T_1)$

ด้วย V_0

สามารถเขียนสมการด้านบนใหม่ได้เป็น

$$V_2 = \alpha V_0 + \beta V_1$$

ระบุสองสมการใหม่ด้วยการนำ V_0 และ V_1 ไปคูณกระจายทั้งสองฝั่งของสมการ

$$V_2 \cdot V_0 = \alpha V_0 \cdot V_0 + \beta V_1 \cdot V_0$$

$$V_2 \cdot V_1 = \alpha V_0 \cdot V_1 + \beta V_1 \cdot V_1$$

แก้สมการสองตัวแปรหาค่า α และ β ได้ผลลัพธ์ดังนี้

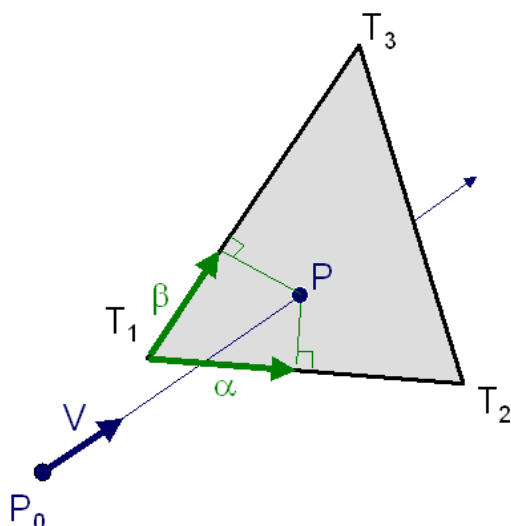
$$\alpha = \frac{((V_1 \cdot V_1)(V_2 \cdot V_0) - (V_1 \cdot V_0)(V_2 \cdot V_1))}{((V_0 \cdot V_0)(V_1 \cdot V_1) - (V_0 \cdot V_1)(V_1 \cdot V_0))}$$

$$\beta = \frac{((V_0 \cdot V_0)(V_2 \cdot V_1) - (V_0 \cdot V_1)(V_2 \cdot V_0))}{((V_0 \cdot V_0)(V_1 \cdot V_1) - (V_0 \cdot V_1)(V_1 \cdot V_0))}$$

จุด R ตกอยู่ในสามเหลี่ยมก็ต่อเมื่อ

ค่า α และ β อยู่ในช่วง $[0,1]$

ตัวแปรในสมการการตรวจสอบจุดตกบนระนาบแสดงได้ดังรูปที่ 2.5

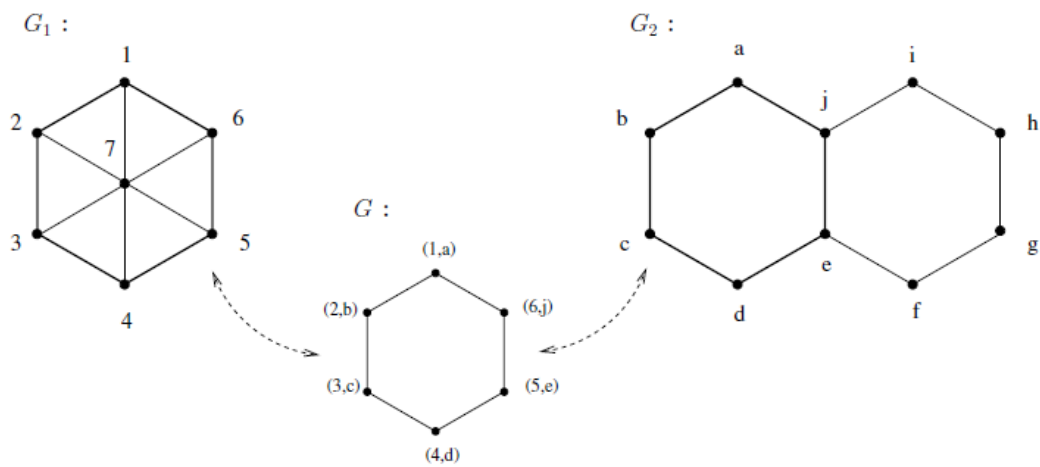


รูปที่ 2.5 การตัดกันของรังสีกับสามเหลี่ยม[13]

2.1.10 กราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดระหว่างกราฟ

กำหนดให้กราฟ G_1 และกราฟ G_2 ด้วย $G_1 = (V_1, E_1, U_{v_1}, U_{e_1})$ และ $G_2 = (V_2, E_2, U_{v_2}, U_{e_2})$ โดยที่ V, E, U_v และ U_e แทนเซตของจุดยอด เซตของเส้นเชื่อม ฟังก์ชันระบุคุณลักษณะของจุดยอด และ ฟังก์ชันระบุคุณลักษณะของเส้นเชื่อมตามลำดับ

กราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดระหว่างคู่กราฟ G_1 และ G_2 (Maximum Common Sub-graph) คือกราฟย่อยสามัญระหว่างคู่กราฟ G_1 และ G_2 ซึ่งไม่มีกราฟย่อยสามัญอื่นๆ ระหว่างคู่กราฟนี้ที่มีขนาดที่ใหญ่กว่า แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดระหว่างกราฟ G_1 และ G_2 [14]

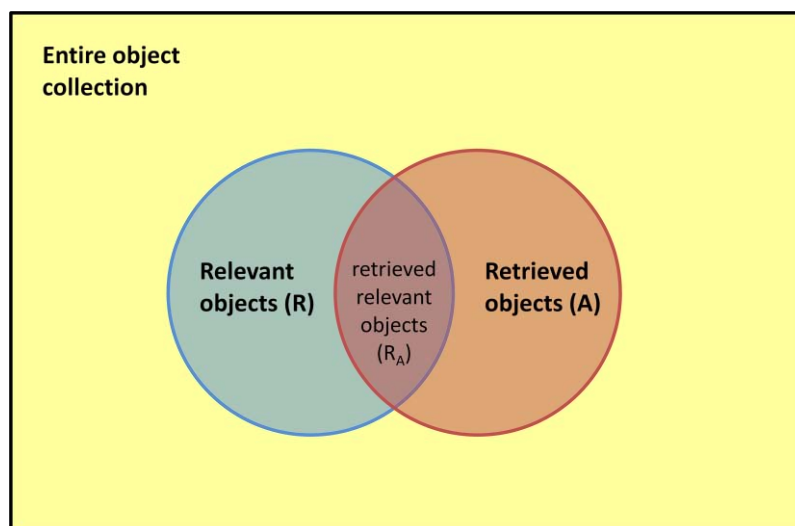
กราฟย่อยสามัญระหว่างคู่กราฟ G_1 และ G_2 (Common Sub-graph) คือกราฟ G ซึ่งมีคุณสมบัติสมมูลฐานย่อยจากกราฟ G ไปยังกราฟ G_1 และจากกราฟ G ไปยังกราฟ G_2

กราฟ G_1 จะมีคุณสมบัติสมมูลฐานย่อย (Sub-graph Isomorphism) จากกราฟ G_1 ไปยังกราฟ G_2 ก็ต่อเมื่อมีกราฟ G ซึ่งเป็นกราฟย่อยของกราฟ G_2 และกราฟ G กับกราฟ G_1 มีคุณสมบัติสมมูลฐานกัน

กราฟ G_1 กับกราฟ G_2 จะมีคุณสมบัติสมมูลฐานกันก็ต่อเมื่อมีฟังก์ชัน $F: V_1 \rightarrow V_2$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบหนึ่งต่อหนึ่งแบบทั่วถึงซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. $U_{v_1}(v) = U_{v_2}(F(v)), v \in V_1$
2. สำหรับทุกๆเส้นเชื่อม $e_1 = (v_1, v'_1) \in E_1$
จะมีเส้นเชื่อม $e_2 = (F(v_1), F(v'_1)) \in E_2$ โดยที่
 $U_{e_1}(e_1) = U_{e_2}(e_2)$ และ $v_1, v'_1 \in V_1$
3. สำหรับทุกๆเส้นเชื่อม $e_2 = (v_2, v'_2) \in E_2$
จะมีเส้นเชื่อม $e_1 = (F^{-1}(v_2), F^{-1}(v'_2)) \in E_1$ โดยที่
 $U_{e_1}(e_1) = U_{e_2}(e_2)$ และ $v_2, v'_2 \in V_2$

2.1.11 แผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน (Precision And Recall Diagram)



รูปที่ 2.7 ประเภทของวัตถุในการสืบค้นและการค้นคืน

ความแม่นยำ(Precision) แสดงถึงความสามารถในการค้นคืนเซตของวัตถุซึ่งเกี่ยวข้องกับวัตถุสืบค้น แสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$precision = \frac{|R_A|}{|A|}$$

$|R_A|$ คือจำนวนวัตถุที่ถูกค้นคืนแล้วเกี่ยวข้องกับวัตถุที่ใช้สืบค้น

$|A|$ คือวัตถุที่ค้นคืนทั้งหมด

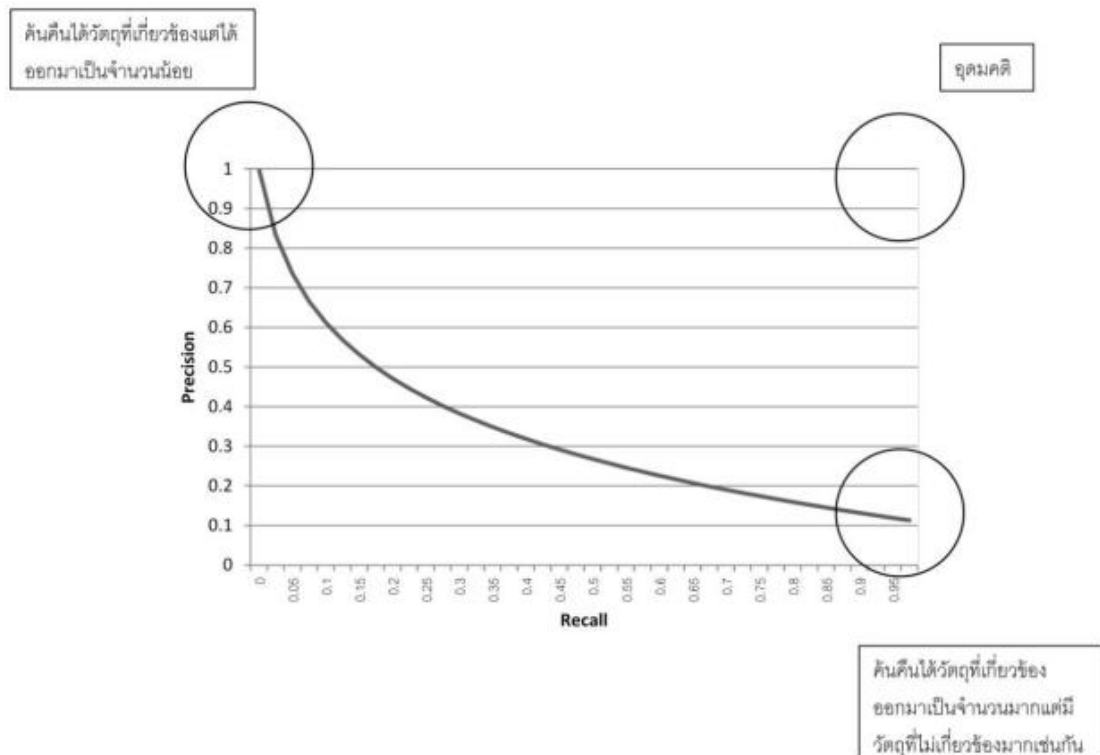
การเรียกคืน(Recall) แสดงถึงความสามารถในการค้นหาวัตถุที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจากคลังข้อมูล แสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$recall = \frac{|R_A|}{|R|}$$

$|R_A|$ คือจำนวนวัตถุที่ถูกค้นคืนแล้วเกี่ยวข้องกับวัตถุที่ใช้สืบค้น

$|R|$ คือวัตถุทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับวัตถุที่ใช้สืบค้น

แผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืนเป็นแผนภาพแสดงความแม่นยำต่อปริมาณที่วัตถุที่ค้นคืนได้สำเร็จ แสดงได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแม่นยำและการเรียกคืนดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน

การระบุแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืนจะสามารถทำได้โดยการหาความแม่นยำและการเรียกคืนของวัตถุที่ถูกค้นคืนซึ่งถูกเรียงลำดับไว้ โดยจะสนใจคำนวณเฉพาะลำดับที่ค้นคืนวัตถุที่เกี่ยวข้องและนำค่าความแม่นยำและการเรียกคืนในแต่ละลำดับที่ถูกคำนวณมาวาดเป็นกราฟ จากนั้นทำการประมาณค่าความแม่นยำในแต่ละช่วงค่าการเรียกคืนมาตรฐานเพื่อให้กราฟอยู่สามารถเปรียบเทียบได้และลดปัญหาเส้นโค้งหยัก การประมาณค่าแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$P(r_j) = \max_{r_j \leq r \leq r_{j+1}} P(r)$$

$P(r)$ คือค่าความแม่นยำที่ค่าการเรียกคืนเท่ากับ r

r_j คือระดับการเรียกคืนมาตรฐานที่ j

สำหรับการวัดประสิทธิภาพการสืบค้นโดยสรุปจากข้อมูลในแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืนสามารถวัดได้จากค่าความแม่นยำเฉลี่ย (Average Precision) ซึ่งสามารถหาได้ด้วยสมการดังนี้

$$AveP = \frac{\sum_{i=1}^N P(i)}{N}$$

AveP คือค่าความแม่นยำเฉลี่ย

$P(i)$ คือค่าความแม่นยำของการค้นคืนได้วัตถุที่เกี่ยวข้องเป็นลำดับที่ i

N คือจำนวนวัตถุที่เกี่ยวข้องทั้งหมด

สำหรับการวัดประสิทธิภาพการสืบค้นโดยรวมของการสืบค้นหลายครั้งสามารถวัดได้จากค่าเฉลี่ยความแม่นยำเฉลี่ย (Mean Average Precision) ซึ่งสามารถหาได้ด้วยสมการดังนี้

$$MAP = \frac{\sum_{i=1}^N AveP_i}{N}$$

MAP คือค่าเฉลี่ยความแม่นยำเฉลี่ย

$AveP_i$ คือค่าความแม่นยำเฉลี่ยของการสืบค้นที่ i

N คือจำนวนการสืบค้นทั้งหมด

ค่าความแม่นยำและค่าเฉลี่ยความแม่นยำจะแสดงถึงความน่าจะเป็นในการค้นคืนวัตถุสามมิติที่ละชั้นแล้วได้วัตถุที่เกี่ยวข้อง โดยจะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 กรณีที่มีค่าเป็น 1 แสดงว่าเป็นการสืบค้นประสบผลสำเร็จตามอุดมคติคือสามารถค้นคืนวัตถุที่เกี่ยวข้องได้ทั้งหมดและได้เป็นอันดับต้น ๆ เรียงกันหมด ยิ่งค่าที่ได้เข้าใกล้ 1 มากจะแสดงถึงการสืบค้นที่เข้าใกล้การสืบค้นตามอุดมคติมากตามไปด้วย

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วน สามารถแบ่งได้ 2 ส่วนได้แก่ การสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วน และการแทนวัตถุสามมิติด้วยเรขาคณิต

2.2.1 การสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วน

ในการสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนจะทำการเปรียบเทียบบางส่วนเพื่อหาส่วนของวัตถุสามมิติสืบค้นที่เหมือนกับส่วนของวัตถุสามมิติอื่น ๆ แล้วค้นคืนวัตถุสามมิติตาม

ความเหมือนกันของส่วนย่อยของวัตถุและความสัมพันธ์ทางพื้นที่ โดยการเปรียบเทียบระหว่างวัตถุสามมิตินี้จะเป็นปัญหาความสอดคล้องกันแบบกลุ่มต่อกลุ่ม(Many to Many Correspondence) ซึ่งจะมีความซับซ้อนในการคำนวณมากและยากต่อการจัดการข้อมูล จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่มได้แก่ การสืบค้นแบบบางส่วนโดยใช้ข้อมูลทางพื้นผิวเฉพาะที่ และ การสืบค้นแบบบางส่วนโดยใช้ข้อมูลทางโครงสร้าง

การสืบค้นแบบบางส่วนโดยใช้ข้อมูลทางพื้นผิวเฉพาะที่จะนิยามให้ส่วนย่อยคือแผ่นที่มีขนาดเล็กบนพื้นผิวของวัตถุและจะอธิบายส่วนย่อยด้วยคุณลักษณะทางพื้นผิวเช่น ความโค้ง ขนาด เป็นต้น ซึ่งในปี 1997 ได้มีงานวิจัย[15] เสนอการใช้ภาพสปีนซึ่งเป็นเซตของฮิสโตแกรมสองมิติที่แทนความสัมพันธ์ของตำแหน่งของพื้นผิวรอบๆจุดที่ถูกเลือก เพื่ออธิบายรูปร่าง และวัดความเหมือนระหว่างวัตถุด้วยการจับคู่จุดที่ถูกเลือกระหว่างวัตถุที่ทำการเปรียบเทียบ แม้ว่าวิธีนี้จะรองรับสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนและวัตถุที่พื้นผิวไม่ต่อเนื่องและมีความขาดช่วงอย่างกระจัดกระจาย แต่ด้วยจำนวนจุดที่ถูกเลือกจำเป็นต้องมีเป็นจำนวนมากเพื่อให้เพียงพอต่อการอธิบายวัตถุจึงทำให้ขั้นตอนการเปรียบเทียบมีความซับซ้อนในการคำนวณมากทำให้สืบค้นได้ช้า ต่อมาในปี 2006 ในงานวิจัย[16] เสนอการใช้ความโค้งของพื้นผิววัตถุในการแสดงคุณลักษณะทางพื้นผิวของส่วนย่อยและทำการรวมกลุ่มของส่วนย่อยนี้เข้าด้วยกันโดยใช้ความเปรียบต่างระหว่างความโค้ง ซึ่งผลลัพธ์ของวิธีนี้จะได้เซตของคุณลักษณะทางพื้นผิวเท่าที่จำเป็นในการอธิบายรูปร่างวัตถุ ซึ่งส่งผลให้สามารถเปรียบเทียบได้เร็วมากขึ้น

การสืบค้นแบบบางส่วนโดยใช้ข้อมูลทางโครงสร้างจะนิยามให้รูปร่างคือส่วนย่อยของวัตถุที่เชื่อมต่อกันด้วยข้อมูลทางโครงสร้าง ในการเปรียบเทียบสามารถแสดงได้ด้วยการจับคู่กราฟเพื่อแสดงส่วนย่อยที่เหมือนกัน ในปี 2003 มีงานวิจัย[17] เสนอการแทนรูปร่างด้วยต้นไม้ทวิภาคซึ่งมากจากการวนซ้ำแบ่งวัตถุสามมิติเป็นสองส่วนตามระยะทางจีโอเดสิก และใช้การจับคู่ต้นไม้ทวิภาคจากระดับชั้นที่ล่างไปยังระดับบนสุด เพื่อแสดงความเหมือนกันของรูปร่าง จากการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบของต้นไม้ทวิภาคนั้นมีข้อมูลที่กระชับและทำให้สามารถสืบค้นวัตถุได้เร็วเมื่อเทียบกับวิธีก่อนหน้า แต่เนื่องจากการแบ่งวัตถุเพื่อสร้างต้นไม้ทวิภาคนั้นเป็นการแบบสม้าเสมอทำให้ส่วนย่อยที่ได้ขาดความหมายในตัวเอง ส่งผลให้ขาดความแม่นยำในการสืบค้น ต่อมาในปี 2005 มีงานวิจัย[18] เสนอการใช้โครงกระดูกโค้งเพื่อแสดงปริมาตรของวัตถุ ณ ตำแหน่งต่างๆ และจับคู่ส่วนของโครงกระดูกที่เข้าคู่กันแล้ววัดความเหมือนด้วยระยะเอิร์ธมูฟเวอร์จุดเด่นในงานวิจัยนี้คือการใช้ข้อมูลทอพอโลยีของวัตถุในการวัดความเหมือนของวัตถุ ซึ่งทำให้เกิดข้อด้อยสำหรับการเปรียบเทียบในกรณีที่วัตถุมีทอพอโลยีใกล้เคียงกันแต่มีรูปร่างที่ต่างกันมาก

ในปี 2006 ได้มีงานวิจัย[19] เสนอการแทนรูปร่างของวัตถุด้วยข้อมูลทางทอพอโลยีและรูปร่าง โดยใช้เรปกราฟซึ่งใช้ระยะจากจุดศูนย์กลางมอร์สฟังก์ชัน แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงทอพอโลยีระหว่างส่วนย่อยของวัตถุ และใช้ข้อมูลฮาร์โมนิกบนฐานทรงกลมบนแต่ละส่วนย่อยของวัตถุในการอธิบายรูปร่าง และวัดความเหมือนด้วยการจับคู่จุดยอดเพื่อหา กราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดระหว่างคู่วัตถุที่เปรียบเทียบ จากการใช้ทั้งข้อมูลทางทอพอโลยีและข้อมูลรูปร่างของส่วนย่อยในการอธิบายวัตถุทำให้การสืบค้นมีความแม่นยำที่มากขึ้น และรองรับการเปลี่ยนแปลงแบบวัตถุแข็งเกร็ง(rigid body transform) แต่เนื่องจากมอร์สฟังก์ชันที่ใช้ และข้อมูลฮาร์โมนิกบนฐานทรงกลม นั้นไม่ทนต่อการปรับเปลี่ยนท่าทางของวัตถุทำให้การสืบค้นวัตถุที่คล้ายกันแต่มีท่าทางที่แตกต่างกันขาดความแม่นยำ

2.2.2 การแทนวัตถุด้วยเรปกราฟ

เรปกราฟเป็นกราฟที่แสดงข้อมูลเชิงทอพอโลยีของรูปร่าง โดยจุดยอดถูกแสดงด้วยจุดวิกฤตบนฟังก์ชันมอร์สในทฤษฎีมอร์ส เส้นเชื่อมแสดงความต่อเนื่องบนพื้นผิวของรูปร่างระหว่างจุดยอดที่ติดกัน ในคอมพิวเตอร์กราฟฟิกรูปเรปกราฟได้ถูกนำมาใช้นำเสนอวัตถุสามมิติครั้งแรกในปี 1991 ในงานวิจัย[20] เพื่อแสดงของมูลทอพอโลยีของวัตถุสามมิติ โดยใช้ฟังก์ชันความสูงเป็นมอร์สฟังก์ชัน ซึ่งฟังก์ชันนี้ไม่ทนทานต่อการหมุน และการเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุ หลังจากนั้นในปี 2001 ได้มีงานวิจัย[21] เสนอการใช้ระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยเป็นมอร์สฟังก์ชัน เพื่อให้เรปกราฟทนต่อการหมุน ข้อมูลที่ไม่พึงประสงค์บนพื้นผิว และการเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุ แต่ในงานนี้ใช้การแบ่งนั้บระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยอย่างสม่ำเสมอในการสร้างเรปกราฟทำให้มีจุดยอดเกินความจำเป็น จากนั้นในปี 2009 ได้มีงานวิจัย[22] ได้ศึกษาการเกิดจุดวิกฤตจากการวิเคราะห์ความไม่ต่อเนื่องกันของจำนวนจุดยอดกราฟในแต่ละระดับของค่าฟังก์ชันบนพื้นผิว แล้วเสนอการแบ่งนั้บแบบไม่เป็นเอกรูป เพื่อแก้ไขปัญหาจุดยอดที่เกินความจำเป็น

บทที่ 3

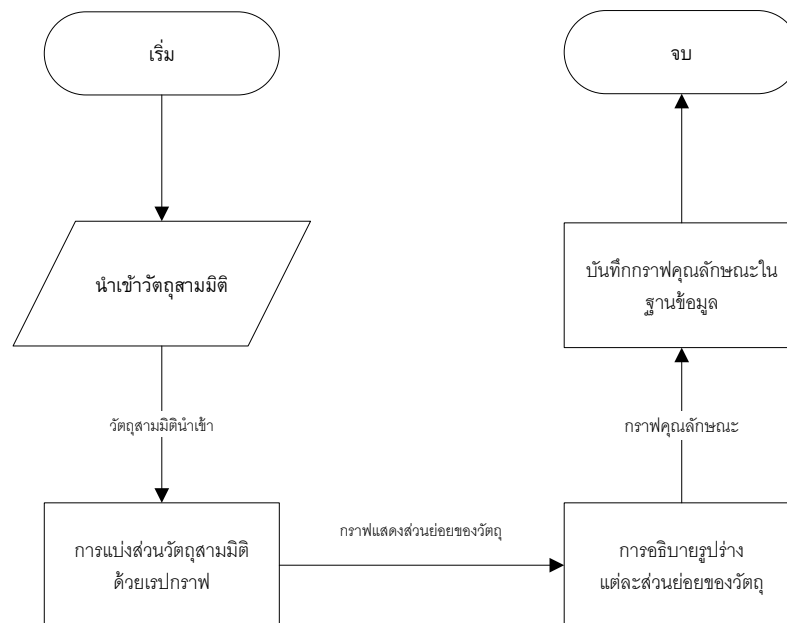
วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้นำเสนอ อัลกอริทึมสำหรับการสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบวัตถุแข็งเกร็งและการเปลี่ยนแปลงท่าทางโดยมีแนวคิด ในการแทนวัตถุด้วยเรขาคณิตเพื่อลดข้อมูลและอธิบายแต่ละส่วนย่อยของวัตถุด้วยตัวอธิบายรูปร่างที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบวัตถุแข็งเกร็งและไม่แข็งเกร็ง

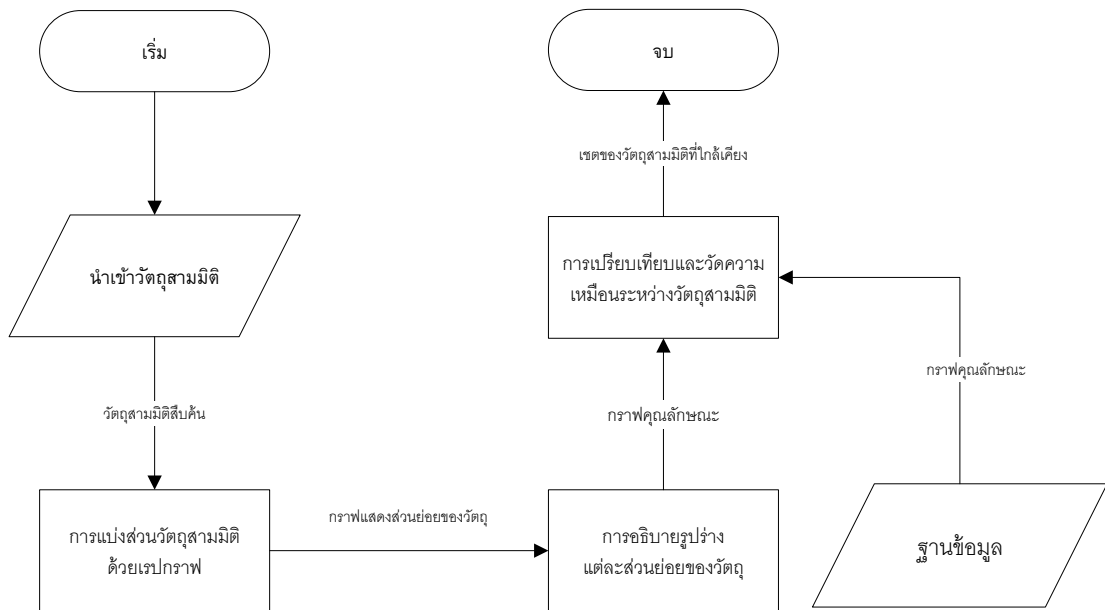
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง ภาพรวมของการทำงาน การแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรขาคณิต การอธิบายรูปร่างแต่ละส่วนย่อยของวัตถุ และการเปรียบเทียบและวัดความเหมือนระหว่างวัตถุสามมิติ

3.1 ภาพรวมของการทำงาน

ภาพรวมในการทำงานจะแบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ กระบวนการเตรียมฐานข้อมูล และกระบวนการสืบค้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 กระบวนการเตรียมฐานข้อมูล



รูปที่ 3.2 กระบวนการสี่บิ้น

การแบ่งส่วนวัตถุสามมิติด้วยเรปกราฟ

จะนำเข้าข้อมูลเมชแล้วสร้างเรปกราฟจากข้อมูลเมชโดยใช้ระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยเป็นมอร์สฟังก์ชันเนื่องจากระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยจะทนทานต่อการเคลื่อนที่ การหมุน การย่อ/ขยาย และการเปลี่ยนแปลงท่าทาง[21], [22] ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้คือกราฟอ็วัญจักรระบุทิศทาง จุดยอดจะแสดงส่วนย่อยของวัตถุที่จุดๆนั้นรองรับ และเส้นเชื่อมแสดงความเชื่อมโยงกันระหว่างส่วนย่อยโดยทิศทางของเส้นเชื่อมจะพุ่งจากบริเวณที่มีค่าระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยน้อยกว่าไปยังบริเวณที่มีค่ามากกว่า

การอธิบายรูปร่างแต่ละส่วนย่อยของวัตถุ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างตัวอธิบายส่วนของวัตถุซึ่งใช้การรวมกันระหว่างค่าฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่างและระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของส่วนย่อย[5]ในลักษณะของฮิสโตแกรม 2 มิติผลจากขั้นตอนนี้จะได้เรปกราฟซึ่งทุกๆจุดยอดแสดงคุณลักษณะทางรูปร่างของส่วนย่อย

การเปรียบเทียบและการวัดความเหมือนระหว่างวัตถุสามมิติ

จากข้อมูลกราฟสี่บิ้นในขั้นตอนนี้ก่อนหน้าและข้อมูลกราฟอื่นๆในฐานข้อมูล จะทำการเปรียบเทียบความเหมือนระหว่างกราฟสี่บิ้นกับทุกๆกราฟอื่นๆในฐานข้อมูลด้วยการหากรายย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดระหว่างกันแล้วหาความเหมือนจากผลรวมความเหมือนเฉลี่ยของทุกๆจุดยอด ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นเซตของวัตถุสามมิติที่ใกล้เคียงโดยถูกเรียงลำดับตามค่าความ

เหมือนกันระหว่างวัตถุสีบดกันและวัตถุอื่นๆในฐานข้อมูล โดยจะถูกเรียงลำดับจากน้อยไปมาก ค่าความเหมือนที่ยิ่งน้อยจะแสดงถึงความเหมือนกันที่ยิ่งมากขึ้น

3.2 การแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรปกราฟ

ในการแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรปกราฟสามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอนย่อยได้แก่ การหาค่าระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุ การสร้างเรปกราฟด้วยการแบ่งหน้าวัตถุสามมิติแบบเอกรูป การปรับปรุงเรปกราฟ และ การระบุกราฟอวัฏจักรระบุทิศทาง

3.2.1 การหาค่าระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุ

ระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุคือค่าเฉลี่ยของระยะทางจีโอเดสิกจากจุดใด ๆ บนพื้นผิวไปยังทุก ๆ จุดบนพื้นผิววัตถุซึ่งในงานนี้จะแทนจุดใด ๆ บนพื้นผิวด้วยจุดยอดของเมชและแทนความเชื่อมโยงของแต่ละจุดยอดด้วยเส้นเชื่อมของเมช การหาระยะทางจีโอเดสิกจากหนึ่งจุดยอดไปยังจุดยอดอื่นๆสามารถทำได้โดยการหาระยะทางสั้นที่สุดจากจุดยอดเริ่มต้นไปยังจุดยอดอื่นๆซึ่งสามารถหาได้ด้วยอัลกอริทึมของดิจค์สตราโดยใช้ความยาวตามเส้นเชื่อม

เนื่องจากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของระยะทางจีโอเดสิกของทุก ๆ จุดยอดใช้การคำนวณที่สูงและนาน จึงใช้การหาระยะทางจีโอเดสิกจากจุดยอดฐานไปยังจุดยอดอื่นๆแล้วนำค่าที่ได้จากแต่ละจุดยอดฐาน มาหาค่าเฉลี่ยของระยะทางจีโอเดสิกบนทุก ๆ จุดยอดหรือจะกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าเป็นการหาระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยโดยใช้ค่าเฉลี่ยของระยะทางจากจุดยอดใด ๆ ไปยังทุก ๆ จุดยอดฐานเพื่อลดการคำนวณ[21] จุดยอดฐานจะถูกกำหนดจากจุดยอดที่รองรับจุดยอดอื่นๆรอบจุดยอดฐานเป็นระยะทางจีโอเดสิกไม่เกินค่าขีดแบ่ง ค่าขีดแบ่งในการหาจุดยอดฐานคือ

$$r = \sqrt{0.005 \cdot \text{area}(S)}$$

r คือค่าขีดแบ่งระยะทางจีโอเดสิกจากจุดยอดฐาน

$\text{area}(S)$ คือพื้นที่ของพื้นผิวทั้งหมดของวัตถุสามมิติแบบเมช การหาระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของแต่ละจุดยอดฐานมีดังสมการนี้

$$\text{agd}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n \text{gd}_{ij} \quad (3.1)$$

agd_i คือระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของจุดยอด i

gd_{ij} คือระยะทางจีโอเดสิกจากจุดยอด i ไปยังจุดยอดฐาน j

n คือจำนวนจุดยอดฐานทั้งหมด

เมื่อได้ระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของทุกจุดยอดแล้วจึงนำมาทำให้เป็นบรรทัดฐานให้ค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ด้วยสมการดังนี้

$$agd_i = \frac{agd_i - agd_{min}}{agd_{max} - agd_{min}} \quad (3.2)$$

agd_i คือระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของจุดยอด i

agd_{min} คือระยะทางจีโอเดสิกน้อยสุด

agd_{max} คือระยะทางจีโอเดสิกมากที่สุด

ตัวอย่างระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยของวัตถุสามมิติแบบเมฆรูปร่างคนแสดงดังรูปที่

3.3 โดยสีแดงแสดงค่ามาก สีเขียวแสดงค่าปานกลาง สีฟ้าแสดงค่าน้อย



รูปที่ 3.3 ระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยของวัตถุสามมิติรูปร่างคน

3.2.2 การสร้างเรปกราฟด้วยการแบ่งนับวัตถุสามมิติแบบเอกรูป

ในกระบวนการนี้จะเป็นขั้นเริ่มต้นด้วยการแบ่งระยะทางจีโอเดสิกบนวัตถุสามมิติออกเป็นระดับชั้นเท่าๆกันดังนี้

$$l_0 = \left[0, \frac{1}{K}\right), l_1 = \left[\frac{1}{K}, \frac{2}{K}\right), \dots, l_{K-1} = \left[\frac{K-1}{K}, 1\right] \quad (3.3)$$

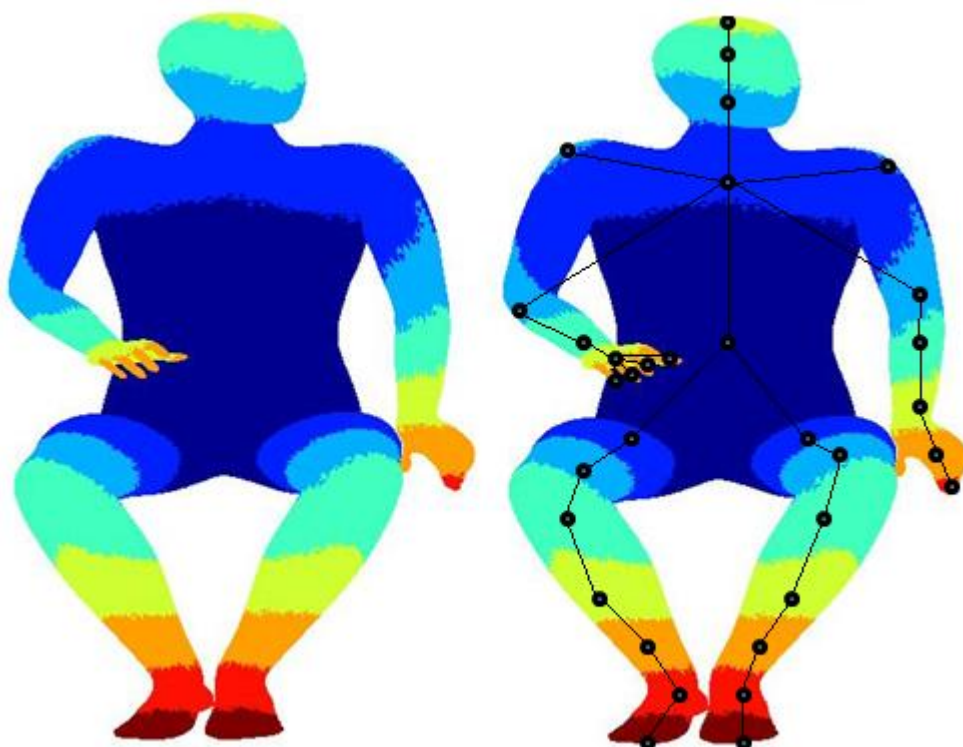
l คือช่วงของค่าจีโอเดสิกเฉลี่ย

K คือค่าระดับชั้นตั้งต้น

หลังจากนั้นจะแบ่งวัตถุในแต่ละระดับออกเป็นส่วยย่อยของวัตถุสามมิติด้วยฟลัดฟิลอัลกอริทึมโดยใช้ความเชื่อมโยงของจุดยอดบนเมช

เรปกราฟจะถูกระบุจุดยอดด้วยจุดศูนย์กลางในแต่ละส่วยย่อยของวัตถุและเส้นเชื่อมจะถูกระบุด้วยเส้นตรงระหว่างจุดศูนย์กลางในแต่ละส่วยย่อยของวัตถุที่อยู่ข้างเคียงกันโดยส่วยย่อยของวัตถุจะถูกแทนด้วยจุดยอดของเรปกราฟ

ตัวอย่างการแบ่งนับวัตถุสามมิติตามระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยแบบเป็นเอกรูปและเรปกราฟของเมชรูปมนุษย์ จำนวน 8 ระดับชั้น แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การแบ่งนับระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยและและเรปกราฟของวัตถุสามมิติรูปร่างคน ออกเป็น 8 ระดับ

3.2.3 การปรับปรุงเรปกราฟ

จากตัวอย่างของเรปกราฟในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่ามีจำนวนจุดยอดเป็นจำนวนมากซึ่งในหลายๆจุดยอดที่แทนส่วนย่อยของวัตถุไม่แสดงถึงลักษณะพิเศษของวัตถุเช่นกลุ่มของจุดยอดที่อธิบายบริเวณส่วนขาของวัตถุในรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นการต่อกันของจุดยอดดีกรี 2 หลายจุดเชื่อมโยงกัน และมีบางจุดยอดที่เป็นส่วนเกินเช่นจุดยอดบริเวณไหล่ของวัตถุตัวอย่างซึ่งมีขนาดเล็กเกิดมาจากความผิดพลาดในการแบ่งนับก่อนในขั้นตอนก่อนหน้า เพื่อแก้ปัญหานี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงเรปกราฟเพื่อให้แต่ละส่วนย่อยสะท้อนถึงลักษณะเด่นๆของวัตถุและลดส่วนย่อยที่เกิดจากความผิดพลาดในการแบ่งนับ ในการปรับปรุงเรปกราฟจะใช้การวิเคราะห์ความไม่ต่อเนื่องกันของจำนวนจุดยอดกราฟในแต่ละระดับชั้นของค่าฟังก์ชันบนพื้นผิวเพื่อแยกจุดวิกฤตของเรปกราฟซึ่งแสดงจุดเด่นทางทอพอโลยี และรวมจุดยอดที่ไม่แสดงลักษณะเด่นเข้าด้วยกันเพื่อลดความซ้ำซ้อน[22]กระบวนการในการปรับปรุงแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

3.2.3.1 ทำความสะอาดข้อมูลก่อนการคำนวณ

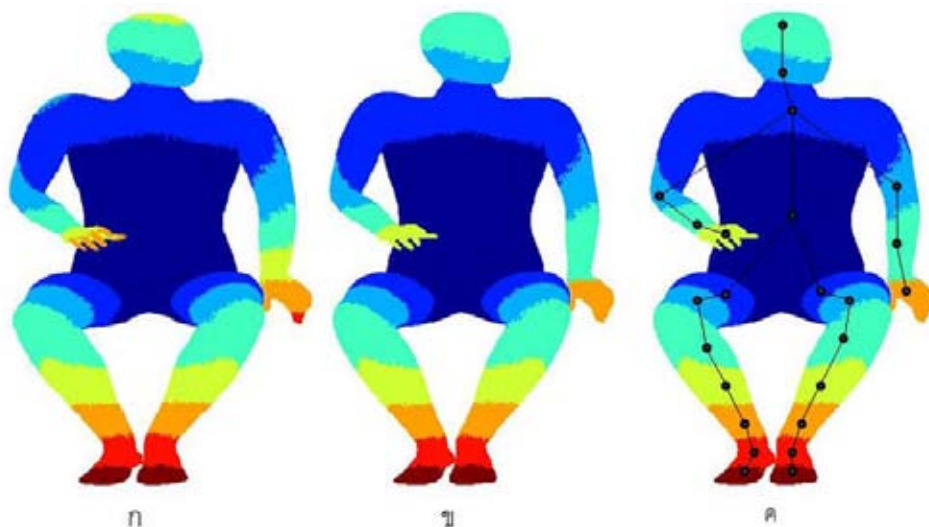
ในขั้นตอนนี้จะแก้ปัญหาส่วนย่อยของวัตถุที่ถูกแบ่งนับผิดพลาด ซึ่งส่วนย่อยในกลุ่มนี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นขนาดเล็กกระจายอยู่ตามขอบของระดับชั้นการแบ่งนับ ในการทำความสะอาดข้อมูลจะทำการรวมส่วนย่อยที่มีขนาดเล็กเกินค่าขีดแบ่งเข้ากับส่วนย่อยข้างเคียงที่มีขนาดใหญ่กว่าค่าขีดแบ่งโดยจะการรวมซ้ำการรวมส่วนย่อยจนกว่าจะไม่มีส่วนย่อยใดเลยที่มีค่าต่ำกว่าค่าขีดแบ่ง ค่าขีดแบ่งในการทำความสะอาดข้อมูลคือ

$$r = 0.0005 \cdot area(S)$$

r คือค่าขีดแบ่งในการทำความสะอาดข้อมูล

$area(S)$ คือพื้นที่ของพื้นผิวทั้งหมดของวัตถุสามมิติแบบเมช

ตัวอย่างผลลัพธ์ของการทำความสะอาดข้อมูลของเมชรูปมนุษย์ จำนวน 8 ระดับชั้นแสดงดังรูปที่ 3.5



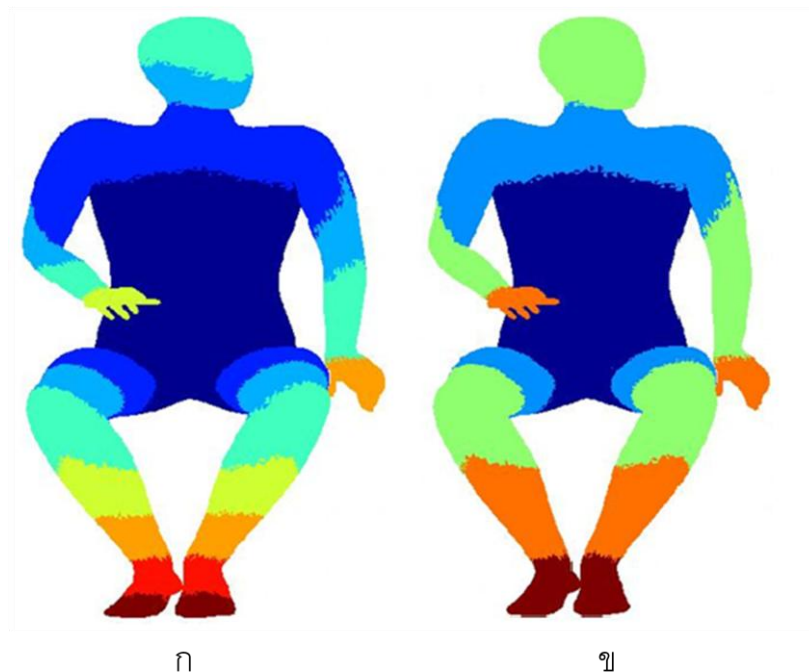
รูปที่ 3.5 ก.การแบ่งวัตฤสามมิติแบบเอกรูป ข.ผลลัพธ์การทำความสะอาดข้อมูล ค.เรปกราฟ
หลังทำความสะอาดข้อมูล

3.2.3.2 แบ่งหับระดับชั้นค่าจีโอเดสิกบนวัตฤสามมิติแบบไม่เป็นเอกรูป

การแบ่งหับระดับชั้นค่าจีโอเดสิกบนวัตฤสามมิติแบบไม่เป็นเอกรูปเป็นการรวมระดับชั้นที่ถูกแบ่งแบบเอกรูปให้เป็นระดับชั้นที่เหมาะสมโดยระดับชั้นที่เหมือนกันและอยู่ติดกันจะถูกยุบรวมเข้าด้วยกัน เพื่อให้เหลือเฉพาะระดับชั้นเท่าที่จำเป็น กระบวนการแบ่งหับระดับชั้นแบบไม่เป็นเอกรูปมีขั้นตอนดังนี้

1. วนซ้ำตรวจสอบทุกระดับชั้นว่ามีระดับชั้นที่ติดกันและมีจำนวนส่วนย่อยเท่ากันหรือไม่ ถ้ามีทำต่อในขั้นตอนที่ 2. ถ้าไม่จบการทำงาน
 - 2.1. ถ้าระดับชั้นถัดไปมีจำนวนส่วนย่อยของวัตฤเท่ากัน เปลี่ยนค่าระดับชั้นของจุดจุดยอดในระดับชั้นถัดไปด้วยค่าระดับชั้นปัจจุบัน และข้ามการคำนวณในรอบถัดไป
 - 2.2. ถ้าระดับชั้นถัดไปมีจำนวนส่วนย่อยของวัตฤไม่เท่ากันข้ามไปคำนวณในรอบถัดไป
3. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1. จนกระทั่งไม่มีระดับชั้นที่ติดกันและมีจำนวนส่วนย่อยเท่ากัน
4. ใช้ฟลัดฟิลอัลกอริทึมระบุส่วนย่อยใหม่ตามค่าระดับชั้น

ตัวอย่างการแบ่งนับระดับชั้นวัตถุสามมิติตามระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยแบบไม่เป็นเอกรูปของเมซรูปร่างมนุษย์ จำนวน 8 ระดับชั้น แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ผลลัพธ์การแบ่งนับระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของวัตถุสามมิติแบบไม่เป็นเอกรูป (ข.) ของเมซรูปร่างมนุษย์ จาก การแบ่งแบบเอกรูป 8 ระดับ (ก.)

3.2.3.3 รวมส่วนย่อยของวัตถุที่มีดีกรีเท่ากัน

จากในขั้นตอนก่อนหน้านี้หน้านั้นอาจจะมีส่วนย่อยบางส่วนที่ไม่ใช่จุดวิกฤตและมีส่วนย่อยข้างเคียงเป็นชนิดเดียวกันซึ่งสามารถรวมเข้าด้วยกันได้ ดังภาพตัวอย่างในรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าส่วนย่อยของวัตถุบริเวณขา(สีเขียวและส้ม) ยังสามารถรวมกันได้ โดยส่วนย่อยประเภทนี้คือส่วนย่อยที่อยู่ข้างเคียงกันและมีดีกรีเท่ากัน[22] ในขั้นตอนนี้จะทำการวนซ้ำรวมส่วนย่อยของวัตถุที่อยู่ติดกันซึ่งมีจำนวนส่วนย่อยข้างเคียงเท่ากันหรือกล่าวได้อีกแบบว่าเป็นการรวมจุดยอดของ เรขาคณิตที่อยู่ติดกันและมีจำนวนดีกรีเท่ากันโดยการวนซ้ำจะถูกกระทำจนกระทั่งไม่มีส่วนย่อยใดที่อยู่ติดกันและมีดีกรีเท่ากันเหลืออยู่

ตัวอย่างการรวมส่วนย่อยของวัตถุที่มีดีกรีเท่ากัน จากผลลัพธ์ในรูปที่ 3.6ข. แสดงดังรูปที่ 3.7

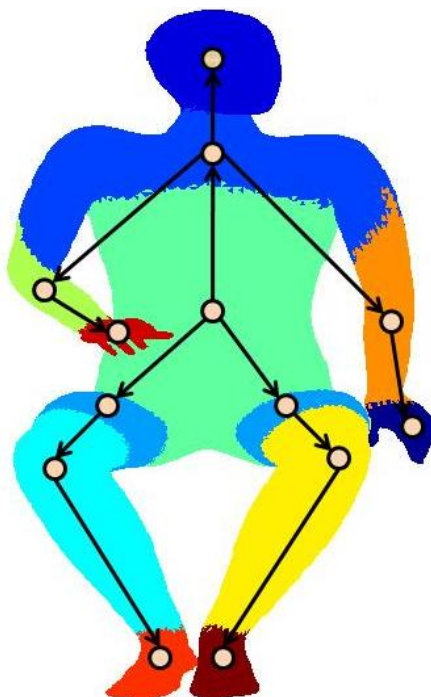


รูปที่ 3.7 ผลลัพธ์การรวมส่วนย่อยของวัตถุที่มีดีกรีเท่ากัน

3.2.4 การระบุกราฟอวัฏจักรระบุทิศทาง

ในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนการนำเสนอเรปกราฟให้อยู่ในรูปของกราฟอวัฏจักรระบุทิศทางโดยจะเริ่มกำหนดจุดยอดเริ่มต้นที่ระดับชั้นที่มีค่าระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด แล้วสร้างเส้นเชื่อมระบุทิศทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดที่อยู่ข้างเคียงในระดับชั้นที่มีค่าระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยสูงกว่าทำซ้ำจนกระทั่งครบทุกจุดยอดของเรปกราฟ

ตัวอย่างกราฟอวัฏจักรระบุทิศทางจากผลลัพธ์ในรูปที่ 3.7 แสดงดังรูปที่ 3.8



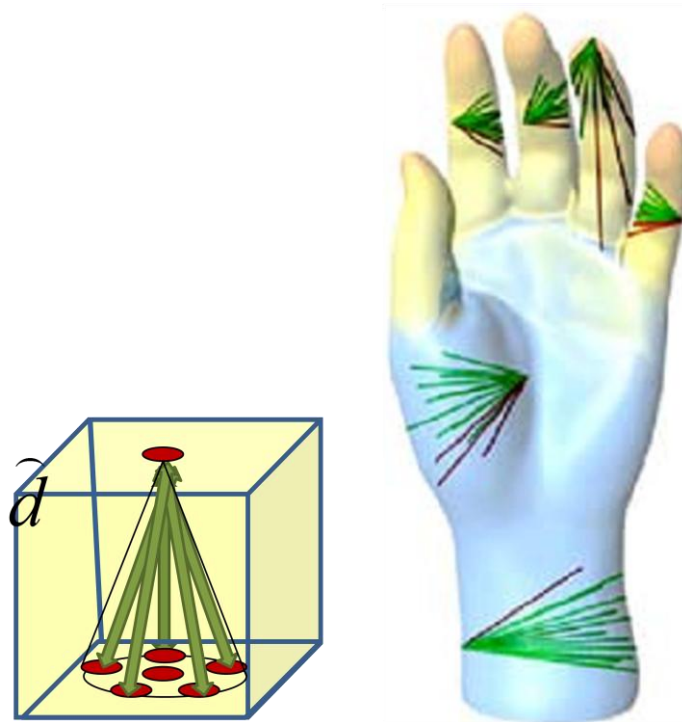
รูปที่ 3.8 กราฟอวัฏจักรระบุทิศทาง

3.3 การอธิบายรูปร่างแต่ละส่วนย่อยของวัตถุ

การอธิบายรูปร่างแต่ละส่วนย่อยของวัตถุในงานนี้ได้เลือกการนำเสนอรูปร่างด้วยการผสมกันของฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่างและค่าระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยซึ่งถูกระบุบนพื้นผิวโดยนำเสนอในรูปแบบของฮิสโตแกรมสองมิติ[5] ซึ่งทั้งสองฟังก์ชันนี้ทนต่อการหมุน การย่อขยาย การเปลี่ยนตำแหน่ง และการเปลี่ยนท่าทางของวัตถุ ทำให้ตัวอธิบายรูปร่างนี้มีคุณสมบัติที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับทั้ง 2 ฟังก์ชันที่ใช้ ในการคำนวณหาตัวอธิบายรูปร่างของแต่ละส่วนย่อยสามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอนได้แก่ การหาค่าฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่างบนพื้นผิววัตถุ การกำหนดค่าระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยสำหรับแต่ละส่วนย่อย และการสร้างฮิสโตแกรมสองมิติ

3.3.1 การหาค่าฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่างบนพื้นผิววัตถุ

ฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่างสามารถหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางได้โดยการยิงรังสีจากจุดบนพื้นผิวในลักษณะทรงกรวยในทิศทางตรงข้ามกับเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวไปตัดกับพื้นผิวด้านตรงกันข้าม แล้วใช้ค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุดตั้งต้นและจุดตัดแทนความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ จุดนั้นๆ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การยิงรังสีในลักษณะกรวย[5]

แต่เนื่องจากการหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทุกจุดบนพื้นผิวนั้นใช้เวลานาน จึงใช้จุดยอดฐานเพื่อลดจำนวนครั้งในการคำนวณซึ่งจุดยอดที่ห่างจากจุดยอดฐานระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยไม่เกินค่าขีดแบ่งจะมีค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับจุดยอดฐานฐานซึ่งค่าขีดแบ่งในการหาจุดยอดฐานคือ

$$r = \sqrt{0.003 \cdot \text{area}(S)}$$

r คือค่าขีดแบ่งระยะทางจีโอเดสิกจากจุดยอดฐาน

$\text{area}(S)$ คือพื้นที่ของพื้นผิวทั้งหมดของวัตถุสามมิติแบบเมช

สำหรับเวกเตอร์ปกติของจุดยอดฐานสามารถหาได้ตามสมการดังนี้

$$N_i = \frac{E_1 \times E_2}{\|E_1 \times E_2\|} \quad (3.4)$$

E_1 คือเส้นเชื่อมแรกของหน้า

E_2 คือเส้นเชื่อมที่ 2 ของหน้า

N_i คือเวกเตอร์ปกติของหน้าที่ i

$$AV_j = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n N_i \quad (3.5)$$

AV_j คือเวกเตอร์เฉลี่ยของทุกๆเวกเตอร์ปกติ N_i

N_i คือเวกเตอร์ปกติของหน้าที่ i ซึ่งอยู่ในพื้นที่ของจุดยอดฐาน j

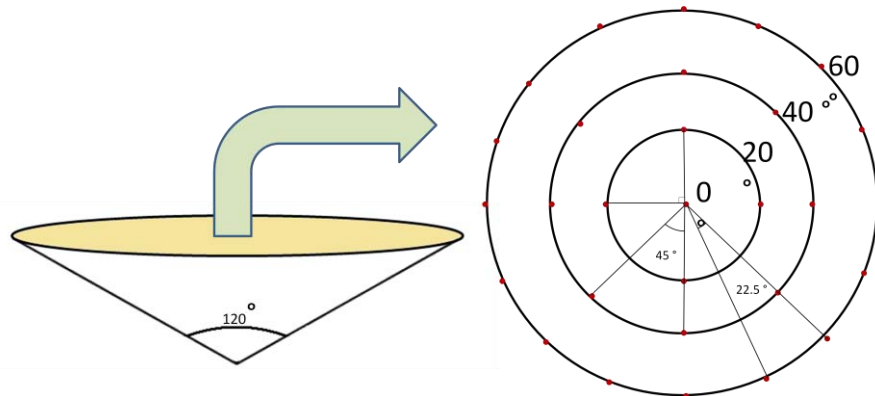
n คือจำนวนหน้าที่จุดยอดฐาน j ครอบคลุม

$$NV_j = \frac{AV_j}{\|AV_j\|} \quad (3.6)$$

NV_j คือเวกเตอร์ปกติของจุดยอดฐานที่ j

AV_j คือเวกเตอร์เฉลี่ยของเวกเตอร์ปกติในบริเวณจุดยอดฐาน j

ในการยิงรังสีในลักษณะโคนไปตัดกับพื้นผิวฝั่งตรงข้ามในงานนี้จะยิงเป็นจำนวน 30 เส้นในลักษณะโคน 120 องศาแสดงดังรูปที่ 3.10 โดยโคนจะมีทิศทางตรงข้ามกับเวกเตอร์ปกติของจุดยอดฐาน ($-NV_j$)



รูปที่ 3.10 การยิงรังสีในลักษณะโคนกว้าง 120 องศาจำนวน 30 เส้น

ในการตรวจสอบการชนของรังสีแต่ละเส้นจะใช้การตรวจสอบการตัดกันระหว่างสามเหลี่ยมและรังสี โดยจะทำการตรวจสอบระหว่างรังสีที่กำหนดกับทุกๆหน้าสามเหลี่ยมของวัตถุสามมิติโดยจะพิจารณาเฉพาะผลลัพธ์ที่ทำมุมระหว่างรังสีและเวกเตอร์ปกติของหน้าสามเหลี่ยมมีขนาดไม่เกิน 90 องศา และมีค่าระยะทางระหว่างจุดตั้งต้นและจุดตัดน้อยที่สุดเนื่องจากสนใจเฉพาะหน้าสามเหลี่ยมที่อยู่ด้านตรงข้ามภายในวัตถุ

เมื่อได้ค่าระยะห่างระหว่างจุดตัดและจุดตั้งต้นของทุกๆรังสีบนจุดยอดฐานจะนำมาเลือกเฉพาะค่าที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 1 เพื่อกำจัดค่าผิดปกติและนำค่าที่ผ่านการคัดกรองนี้ มาหาค่าเฉลี่ยและระบุให้เป็นค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดยอดฐานและจุดยอดอื่น ๆ ที่อยู่ในอาณาเขตของจุดยอดฐาน

เมื่อได้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทุกๆจุดยอดแล้วจึงนำมาทำให้เป็นบรรทัดฐานให้ค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ดังนี้

$$sdf_i = \frac{sdf_i - sdf_{min}}{sdf_{max} - sdf_{min}} \quad (3.7)$$

sdf_i คือค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยอด i

sdf_{min} คือค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยสุด

sdf_{max} คือค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด

ตัวอย่างฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่างของวัตถุสามมิติแบบเมฆรูปร่างคนแสดงดังรูปที่ 3.11 โดยสีแดงแสดงค่ามาก สีเขียวแสดงค่าปานกลาง สีฟ้าแสดงค่าน้อย



รูปที่ 3.11 ฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่างของวัตถุสามมิติรูปร่างคน

3.3.2 การกำหนดค่าระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยสำหรับแต่ละส่วนย่อย

เนื่องจากในขั้นตอนการแบ่งวัตถุด้วยเรปกราฟได้มีการคำนวณระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยเอาไว้ก่อนแล้วในขั้นตอนนี้จะนำค่าระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยที่ได้มาแสดงในบรรทัดฐานใหม่สำหรับแต่ละส่วนย่อย ดังนี้

$$agd_{ij} = \frac{agd_{ij} - agd_{min}^j}{agd_{max}^j - agd_{min}^j} \quad (3.8)$$

agd_{ij} คือระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของจุดยอด i ในส่วนย่อย j

agd_{min}^j คือระยะทางจีโอเดสิกน้อยสุดในส่วนย่อย j

agd_{max}^j คือระยะทางจีโอเดสิกมากสุดในส่วนย่อย j

3.3.3 การสร้างฮิสโตแกรมสองมิติ

ฮิสโตแกรมสองมิตินี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่างและระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยของแต่ละส่วนย่อยดังนี้

$$H_i(x, y) = P(SDF_i = x, AVG_i = y) \quad (3.9)$$

$H_i(x, y)$ คือฮิสโตแกรม 2 มิติของส่วนย่อยที่ i

x, y มีค่าในช่วง $[0,1]$

SDF_i คือฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่างของส่วนย่อยที่ i

AVG_i ระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยของส่วนย่อยที่ i

$P(e_1, e_2)$ คือความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์ e_1 และ e_2

ฮิสโตแกรมนี้จะถูกนำมาใช้อธิบายส่วนย่อยของวัตถุในแต่ละส่วนซึ่งในงานนี้ได้แบ่งช่วงค่าในตัวแปร x และ y เป็นจำนวน 64 และ 32 ตามลำดับซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในงานก่อนหน้า[5]

การเปรียบเทียบฮิสโตแกรมสามารถทำได้ด้วยการหาระยะทางยูคลิเดียนระหว่าง
ทั้งสองฮิสโตแกรมดังสมการต่อไปนี้

$$sim(h_1, h_2) = \sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (h_{1ij} - h_{2ij})^2} \quad (3.10)$$

$sim(h_1, h_2)$ คือค่าความเหมือนระหว่างฮิสโตแกรม h_1 และ h_2

h_{ij} คือค่าของฮิสโตแกรมในหลักที่ i แถวที่ j

n คือจำนวนหลักของฮิสโตแกรม

m คือจำนวนแถวของฮิสโตแกรม

3.4 การเปรียบเทียบและการวัดความเหมือนระหว่างวัตถุสามมิติ

การสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนจะค้นคืนวัตถุที่มีส่วนย่อยของวัตถุที่เหมือนกันซึ่งส่วนย่อยที่เหมือนกันในที่นี้หมายถึงส่วนย่อยของคู่วัตถุสามมิติเปรียบเทียบที่ใหญ่ที่สุดที่เหมือนกัน ในงานนี้ได้อธิบายวัตถุสามมิติด้วยเรขาคณิตคุณลักษณะซึ่งเป็นเซตของส่วนย่อยที่ถูกเข้ารหัสซึ่งเชื่อมโยงกันด้วยความสัมพันธ์ทางทอพอโลยีดังนั้นการเปรียบเทียบระหว่างวัตถุสามมิติสามารถใช้การหากราฟย่อยสามมิติที่ใหญ่ที่สุดเพื่อหาส่วนย่อยของคู่วัตถุสามมิติเปรียบเทียบที่เหมาะสมกันและใหญ่ที่สุด และวัดความเหมือนกันทำได้โดยการเปรียบเทียบในแต่ละจุดที่ถูกจับคู่

การวัดความเหมือนระหว่างจุดยอดของกราฟที่นำมาเปรียบเทียบสามารถวัดได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$D(V_1, V_2) = \frac{w_1S + w_2G + w_3A}{w_1 + w_2 + w_3} \quad (3.11)$$

$D(V_1, V_2)$ คือค่าความเหมือนกันระหว่างจุดยอด V_1 กับจุดยอด V_2

ค่า w_1, w_2 และ w_3 คือค่าถ่วงน้ำหนักของตัวแปร S, G และ A ตามลำดับ

กำหนดให้การเปรียบเทียบค่าคุณลักษณะของคู่กราฟเปรียบเทียบแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$\bar{X} = \begin{cases} 0, & \text{if } \max(X(V_1), X(V_2)) = 0 \\ \frac{|X(V_1) - X(V_2)|}{\max(X(V_1), X(V_2))}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.12)$$

$X(V_1)$ และ $X(V_2)$ คือค่าคุณลักษณะ X ของจุดยอด V_1 และจุดยอด V_2 ตามลำดับ

G คือความเหมือนกันทางรูปร่างซึ่งวัดได้ด้วยการเปรียบเทียบฮิสโตแกรมสองมิติที่ใช้สำหรับแทนข้อมูลรูปร่างของวัตถุ

S คือความเหมือนกันทางทอพอโลยีซึ่งได้จากการเปรียบเทียบดีกรีของจุดยอดแสดงได้ดังนี้

$$S = \frac{\overline{in} + \overline{out} + \overline{sub_n} + \overline{sub_in} + \overline{sub_out}}{5} \quad (3.13)$$

in คือค่าดีกรีเข้ามายังจุดยอด

out คือค่าดีกรีออกจากจุดยอด

sub_n คือจำนวนจุดยอดอื่นที่อยู่ติดกับจุดยอดที่พิจารณา

sub_{in} คือผลรวมดีกรีเข้ามายังจุดยอดข้างเคียง

sub_{out} คือผลรวมดีกรีออกจากจุดยอดข้างเคียง

A คือความเหมือนกันทางขนาดของส่วนย่อยซึ่งผูกติดกับจุดยอดที่เปรียบเทียบได้จากการเปรียบเทียบขนาดพื้นที่พื้นผิวของส่วนย่อยของวัตถุดังนี้

$$A = \overline{area} \quad (3.14)$$

area คืออัตราส่วนของพื้นที่พื้นผิวของส่วนย่อยเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมดของวัตถุ

การหากราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดระหว่างคู่กราฟเปรียบเทียบเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยากซึ่งหมายความว่าใช้เวลาในการคำนวณมาก ในงานนี้จึงใช้การหากราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดโดยคร่าว โดยใช้ค่าฮิวริสติก[23] ซึ่งค่าฮิวริสติกที่ใช้คือค่าความเหมือนกันระหว่างจุดยอดซึ่งหาคำนวณได้จากสมการที่ 3.11 โดยค่าถ่วงน้ำหนัก W_1, W_2 และ W_3 จะถูกระบุให้มีค่าเป็น 0.4, 0.5 และ 0.1 ตามลำดับซึ่งเป็นค่าที่ได้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.11 อัลกอริทึมสำหรับการหากราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดโดยคร่าวระหว่างคู่กราฟเปรียบเทียบแสดงได้ดังนี้

กำหนดให้

$G_1 = (V_1, E_1, U_{v_1}, U_{e_1})$ และ $G_2 = (V_2, E_2, U_{v_2}, U_{e_2})$ เป็นคู่กราฟเปรียบเทียบ

M เป็นเซตของคู่จุดยอด (v_1, v_2) โดยที่ $v_1 \in V_1$ และ $v_2 \in V_2$

CS คือกราฟย่อยสามัญซึ่งแสดงด้วยเซตของคู่จุดยอด (v_1, v_2)

MCS คือเซตของ *CS*

CANDIDATES คือเซตของคู่จุดยอด (v_1, v_2) ที่สามารถเป็นตัวเลือกในการขยายของกราฟย่อยสามัญได้

ตารางที่ 3.1 รหัสเทียมแสดงการหากราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุด

Approximate Maximum Common Sub-Graph
<pre> MCS (G1, G2) { M = empty_set CS = empty_set MCS = empty_set M = ini_Mapping_set (G1, G2) for each m in M { CS = CS_from_Mapping(m) Add (CS, MCS) } return Max (MCS) } </pre>

อัลกอริทึมนี้เริ่มด้วยฟังก์ชัน $MCS(G_1, G_2)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันหลักโดยจะเริ่มด้วยการจับคู่จุดยอดทุกคู่จุดระหว่างจุดยอดของกราฟ G_1 และกราฟ G_2 ในฟังก์ชัน $ini_Mapping_set(G_1, G_2)$ เพื่อกำหนดเซตของคู่จุดยอดตั้งต้นสำหรับการหากราฟย่อยสามัญ ซึ่งทุก ๆ คู่จุดยอดตั้งต้นที่ถูกกำหนดจะถูกคำนวณหากราฟย่อยสามัญด้วยฟังก์ชัน $CS_from_Mapping(m)$ ผลลัพธ์สุดท้ายจะคืนกราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุด

ตารางที่ 3.2 รหัสเทียมแสดงการหากราฟย่อยสามัญ

Maximum Common Sub-Graph From Mapping Node
<pre> CS_from_Mapping(m) { CS = empty_set CANDIDATES = empty_set Add(m, CANDIDATES) while CANDIDATES is not empty { (v1,v2) = Pop(CANDIDATES) if(v1 and v2 have not ever been mapped) { Add((v1,v2), CS) Update((v1,v2), CANDIDATES) } } return CS } </pre>

สำหรับฟังก์ชัน $CS_from_Mapping(m)$ จะทำการขยายขนาดจากจุดตั้งต้น m เพื่อสร้าง กราฟย่อยสามัญโดยจะเริ่มจากการเพิ่มจุดตั้งต้น m ให้กับ $CANDIDATES$ เพื่อกำหนดเป็นจุดตั้งต้นในการสร้าง กราฟย่อยสามัญจากนั้นจะทำการวนซ้ำตรวจสอบว่าคู่จุดยอดใน $CANDIDATES$ สามารถนำไปขยายกราฟย่อยสามัญได้หรือไม่ และทำการขยายโดยการเพิ่ม (V_1, V_2) ไปยัง CS จากนั้นจะทำการเพิ่มคู่จุดยอดใหม่ให้กับ $CANDIDATES$ ในขั้นตอน $Update(V_1, V_2), CANDIDATES$

ตารางที่ 3.3 รหัสเทียมแสดงขั้นตอนการปรับปรุง *CANDIDATES*

Update
<pre> Update ((v1, v2) , CANDIDATES) { Queue = empty_set Temp = empty_set for each edge e1 leave from v1 { for each edge e2 leave from v2 { u = node_at_the_end_of(e1) v = node_at_the_end_of(e2) Add ((u, v), Queue) Add (u, Temp) } } ini_max_score (Temp) while Queue is not empty { (u, v) = Extract_Min (Queue) if (score (u, v) < score (Temp (u))) { setScore (score (u, v) , Temp (u)) Add ((u, v) , CANDIDATES) Delete ((*, v) , Queue) } } } </pre>

ในกระบวนการ *Update(V₁, V₂), CANDIDATES*) จะทำการหาเซตคู่จุดยอดที่เหมาะสมที่สุดจากเซตของคู่ยอดที่เป็นจุดยอดถัดจากจุดยอด V_1 และ V_2 ซึ่งเซตคู่จุดยอดที่เหมาะสมกันจะเป็นเซตคู่จุดยอดที่มีความเหมือนกันมากที่สุดและใช้จุดยอดหมดทุกจุดและมีความสัมพันธ์แบบ 1 ต่อ 1 วิธีการหาแสดงได้ดังรหัสเทียมในตารางที่ 3.3 ซึ่งจะเริ่มจากการจับคู่ทุกคู่จุดที่อยู่ถัดจากจุดยอด V_1 และ V_2 และเก็บคู่จุดเหล่านั้นไว้ใน *Queue* จากนั้นจะทำการวนซ้ำใช้ฟังก์ชัน *Extract_Min* เพื่อคืนคู่จุดยอดที่ถูกจับคู่และมีความเหมือนกันมากที่สุด และใช้ฟังก์ชัน *Delete* ในการลบคู่จุดยอดอื่นใน *Queue* ที่มีการใช้จุดยอดซ้ำซ้อนกับคู่จุดที่ได้คืนมา โดยจะวนซ้ำจนกระทั่ง *Queue* ว่าง

เมื่อได้กราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดจะหาความเหมือนกันระหว่างคู่กราฟเปรียบเทียบได้ดังนี้

$$SIM(G_1, G_2) = \frac{\sum_{V \in CS} D(V_1, V_2)}{\|CS\|} \quad (3.15)$$

$SIM(G_1, G_2)$ คือความเหมือนโดยรวมระหว่างกราฟ G_1 และกราฟ G_2

CS คือกราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดระหว่างกราฟ G_1 และกราฟ G_2

$\|CS\|$ คือจำนวนคู่จุดยอดใน CS

ค่าถ่วงน้ำหนัก w_1, w_2 และ w_3 สำหรับฟังก์ชัน $D(V_1, V_2)$ จะถูกระบุให้มีค่าเป็น 0.2, 0.7 และ 0.1 ตามลำดับ ซึ่งได้มาจากผลการทดลองในรูปที่ 4.12

3.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลา

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาในงานที่นำเสนอจะแบ่งวิเคราะห์ตามขั้นตอนในการสืบค้นได้เป็น 2 ส่วนคือการสร้างตัวแทนข้อมูลของวัตถุสามมิติ และการเปรียบเทียบและวัดความเหมือนระหว่างวัตถุสามมิติ

3.5.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาในขั้นตอนการสร้างตัวแทนข้อมูลของวัตถุสามมิติ

การสร้างตัวแทนข้อมูลของวัตถุสามมิติจะแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ การแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรปกราฟ และการอธิบายรูปร่างแต่ละส่วนย่อยของวัตถุ ประสิทธิภาพเชิงเวลาในแต่ละขั้นตอนแสดงได้ดังนี้

3.5.1.1 ประสิทธิภาพเชิงเวลาในการแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรปกราฟ

ประสิทธิภาพเชิงเวลาในแต่ละขั้นตอนในการแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรปกราฟแสดงได้ดังนี้

1. การหาค่าระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุ

$$O(n \log n)$$

n คือจำนวนจุดยอดของเมช

การหาระยะทางจีโอเดสิกด้วยดิเจสต์สตราอัลกอริทึมจะหาระยะจีโอเดสิกจากจุดตั้งต้นไปยังทุก ๆ จุดยอดจึงคำนวณ n ครั้งและในแต่ละครั้งที่คำนวณจะมีการเก็บค่าเข้าไปยัง

แถวคอยบุริมภาพซึ่งใช้เวลา $\log n$ ซึ่งการหาระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยจะทำการหาระยะทางจีโอเดสิกจากจุดยอดฐานไปยังจุดยอดอื่น ๆ ซึ่งจุดยอดฐานมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนจุดยอดทั้งหมดมากจึงไม่กระทบต่อประสิทธิภาพเชิงเวลา

2. การสร้างเรปกราฟด้วยการแบ่งหน่วยวัตถุสามมิติแบบเอกรูป

- การแบ่งหน่วยวัตถุสามมิติแบบเอกรูป

$$O(n)$$

n คือจำนวนจุดยอดของเมช

เนื่องจากการเปลี่ยนค่าระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยที่ระบุบนจุดยอดเป็นค่าระดับชั้นจึงคำนวณทั้งหมด n ครั้ง

- การสร้างเรปกราฟ

$$O(n)$$

n คือจำนวนจุดยอดของเมช

เนื่องจากใช้ฟลัดฟิลอัลกอริทึมในการแยกส่วนย่อยของวัตถุซึ่งจะทำการรวมตรวจสอบความต่อเนื่องกันทุก ๆ จุดยอดที่ติดกันในแต่ละระดับชั้น จึงคำนวณเป็นจำนวน n ครั้ง

3. การปรับปรุงเรปกราฟ

- การทำความสะอาดข้อมูล

$$O(n)$$

n คือจำนวนจุดยอด

เนื่องจากทุกครั้งที่ตรวจพบส่วนย่อยที่มีขนาดต่ำกว่าที่กำหนดจะทำการรวมส่วนย่อยแล้วใช้ฟลัดฟิลอัลกอริทึมในการระบุส่วนย่อยใหม่ ซึ่งจำนวนส่วนย่อยมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนจุดยอดมากจึงไม่กระทบต่อประสิทธิภาพเชิงเวลา

- การแบ่งหน่วยระดับชั้นค่าจีโอเดสิกบนวัตถุสามมิติแบบไม่เป็นเอกรูป

$$O(n)$$

n คือจำนวนจุดยอดของเมช

เนื่องจากจำนวนระดับชั้นของวัตถุมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนจุดยอดมาก ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงเวลาในขั้นตอนนี้จะขึ้นกับฟลัดฟิลอัลกอริทึมที่ใช้ในการระบุส่วนย่อยใหม่

- การรวมส่วนย่อยของวัตถุที่มีดีกรีเท่ากัน

$$O(n)$$

n คือจำนวนจุดยอดของเมฆ

เนื่องจากจำนวนส่วนย่อยของวัตถุมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนจุดยอดมาก ดังนั้นความซับซ้อนในขั้นตอนนี้นั้นกับพลัดฟิลอัลกอริทึมที่ใช้ในการระบุส่วนย่อยใหม่

- การระบุกราฟอวัฏจักรระบุทิศทาง

$$O(n)$$

n คือจำนวนจุดยอดของเรปกราฟ

เนื่องจากการระบุทิศทางจากระดับชั้นที่ต่างกันจะกระทำบนทุก ๆ จุดยอดของเรปกราฟ

3.5.1.2 ประสิทธิภาพเชิงเวลาในการอธิบายรูปร่างแต่ละส่วนย่อยของวัตถุสามมิติ

ประสิทธิภาพเชิงเวลาในแต่ละขั้นตอนในการอธิบายรูปร่างแต่ละส่วนย่อยของวัตถุสามมิติแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. การหาค่าฟังก์ชันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูปร่างบนพื้นผิววัตถุ

$$O(n)$$

n คือจำนวนหน้าสามเหลี่ยมของเมฆ

เนื่องการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะใช้การยิงรังสีและตรวจสอบการตัดกันกับทุก ๆ หน้าสามเหลี่ยมของเมฆ เป็นจำนวนเท่ากับจำนวนจุดยอดฐานคูณกับจำนวนเส้นตรงที่ยิงออกจากจุดยอดฐาน ซึ่งจำนวนเส้นตรงที่ยิงออกจากจุดยอดฐานมีค่าคงที่ดังนั้นความซับซ้อนในขั้นตอนนี้จึงขึ้นกับจำนวนหน้าสามเหลี่ยมของเมฆ

2. การกำหนดค่าระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยสำหรับแต่ละส่วนย่อย

$$O(n)$$

n คือจำนวนจุดยอดของเมฆที่เป็นส่วนย่อยของวัตถุ

เนื่องจากในขั้นตอนนี้จะเป็นการปรับค่าระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยบนทุก ๆ จุดยอดบนส่วนย่อยของวัตถุซึ่งถูกคำนวณไว้ก่อนในขั้นตอนการแบ่งวัตถุ

3. การสร้างฮิสโตแกรมสองมิติ

$$O(n)$$

n คือจำนวนจุดยอดของเมชที่เป็นส่วนย่อยของวัตถุ

3.5.1.3 สรุปผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาในขั้นตอนการสร้างตัวแทนข้อมูลของวัตถุสามมิติ

ในขั้นตอนการแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรปกราฟจะมีประสิทธิภาพเชิงเวลาเป็น $O(n \log n)$ โดยเป็นผลมาจากการหาระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยซึ่งมีความซับซ้อนสูงกว่าขั้นตอนอื่น ๆ ที่มีประสิทธิภาพเชิงเวลาเป็น $O(n)$ เมื่อ n คือจำนวนจุดยอดของเมช และในการอธิบายรูปร่างของแต่ละส่วนย่อยจะมีประสิทธิภาพเชิงเวลาเป็น $O(n)$ เมื่อ n คือจำนวนหน้าสามเหลี่ยมของเมชเนื่องจากในในงานนี้ใช้เมชสามเหลี่ยมแบบปิดซึ่งจะมีจำนวนหน้าสามเหลี่ยมมากกว่าหรือเท่ากับจำนวนจุดยอด แต่จำนวนเท่าของจำนวนหน้าสามเหลี่ยมต่อจำนวนจุดยอดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนจุดยอด ดังนั้นความซับซ้อนการสร้างตัวแทนข้อมูลของวัตถุจะขึ้นกับการแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรปกราฟเป็นหลักทำให้ขั้นตอนการสร้างตัวแทนข้อมูลของวัตถุมีประสิทธิภาพเชิงเวลาเป็น $O(n \log n)$

3.5.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาในขั้นตอนการเปรียบเทียบและวัดความเหมือนระหว่างวัตถุสามมิติ

การเปรียบเทียบและวัดความเหมือนระหว่างวัตถุสามมิติประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ การหากราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุด และการหาความเหมือนกันระหว่างคู่กราฟเปรียบเทียบ โดยประสิทธิภาพเชิงเวลาในการหากราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดแสดงจะมีค่าเป็น $O(n^4)$ เมื่อ n คือจำนวนจุดยอดของเรปกราฟ เนื่องจากคู่ตั้งต้นสำหรับการหากราฟย่อยมาจากการจับคู่ทุกคู่จุดยอดจากคู่กราฟเปรียบเทียบซึ่งมีความซับซ้อนเป็น $O(n^2)$ และในแต่ละขั้นตอนการหากราฟย่อยจะต้องขยายขนาดของกราฟย่อยซึ่งมีความซับซ้อนเป็น $O(n^2)$ ส่วนการหาความเหมือนกันระหว่างคู่กราฟจะเปรียบเทียบจะมีประสิทธิภาพเชิงเวลาเป็น $O(n)$ เมื่อ n คือจำนวนจุดยอดของเรปกราฟ เนื่องจากจำนวนคู่จุดยอดที่มากที่สุดที่สามารถเปรียบเทียบได้คือคือจำนวนจุดยอดของเรปกราฟที่ใช้เปรียบเทียบ

โดยสรุปแล้วในการหากราฟย่อยสามัญที่ใหญ่ที่สุดจะมีความซับซ้อนเหนือกว่าการหาความเหมือนกันระหว่างคู่กราฟเปรียบเทียบมาก ดังนั้นขั้นตอนการเปรียบเทียบและวัดความเหมือนระหว่างวัตถุสามมิติจึงมีประสิทธิภาพเชิงเวลาเป็น $O(n^4)$

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผล

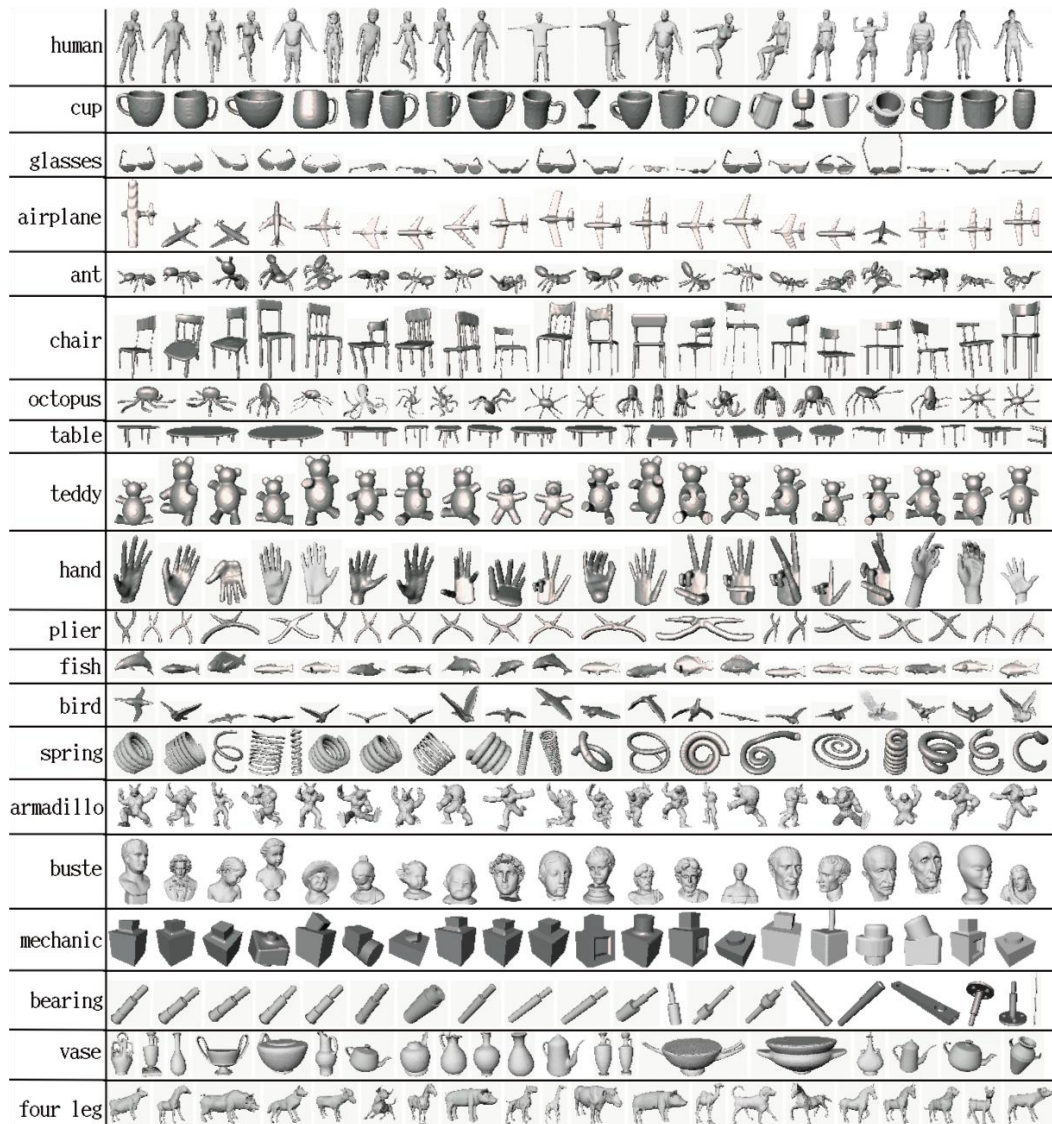
4.1 ภาพรวมของการทดลอง

ในบทนี้จะทำการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของ การสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนและแบบโดยรวมในแต่ละด้าน ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการสืบค้น และประสิทธิภาพการสืบค้น ซึ่งจะวิเคราะห์บนข้อมูลทดสอบที่ได้ระบุผลลัพธ์เอาไว้แล้ว และเปรียบเทียบผลกับงานที่ใกล้เคียง และทำการทดสอบในเชิงลึกเพื่อวัดผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานที่น่าเสนอ และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

4.2 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง

โปรแกรมทดสอบถูกพัฒนาด้วยภาษา C# บนโปรแกรม Visual studio 2008 ซึ่งการทดสอบนี้ถูกประมวลผลบนหน่วยประมวลผล Intel Core 2 Duo 2.20 GHz หน่วยความจำ 2 GB ระบบปฏิบัติการ Windows Vista

วัตถุสามมิติทดสอบนำมาจาก ฐานข้อมูลสำหรับการทดสอบการสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนของการประกวดสืบค้นวัตถุสามมิติซึ่งจัดโดยสมาคม AIM@SHAPE ในปี 2007[8] ซึ่งเป็นวัตถุสามมิติแบบเมชโดยแบ่งเป็น เซตข้อมูลวัตถุสามมิติ กับ เซตวัตถุสามมิติสำหรับสืบค้น สำหรับเซตข้อมูลวัตถุสามมิติจะมีจำนวน 400 ชิ้น แบ่งเป็น 20 ประเภท ประเภทละ 20 ชิ้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ประเภททั้ง 20 ประเภท ได้แก่ คน, ถ้วย, แวนตา, เครื่องบิน, มด, แก้ว, ปลาหมึก, โต๊ะ, ตุ๊กตาหมี, มือ, คีม, ปลา, นก, สปริง, สัตว์ประหลาด, รูปปั้น, กล้อง, ชิ้นส่วนเครื่องจักร, แจกัน และสัตว์ สำหรับเซตวัตถุสามมิติสำหรับสืบค้นจะเป็นวัตถุสามมิติที่มาจากการผสมผสานกันระหว่างวัตถุสามมิติที่ต่างประเภทกันแสดงดังรูปที่ 4.4 มีจำนวนทั้งหมด 30 ชิ้น



รูปที่ 4.1 วัตถุสามมิติสำหรับทดสอบ[8]

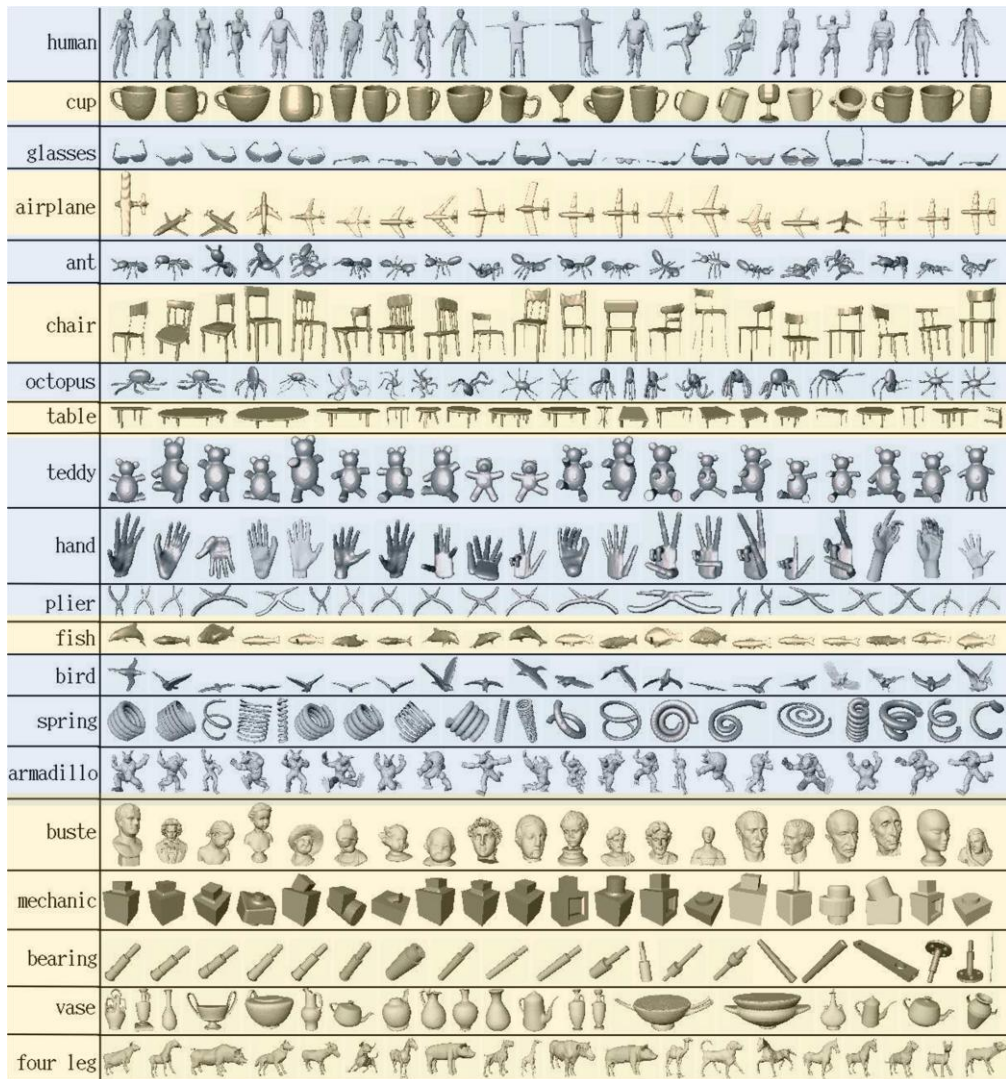
ประเภทของเซตข้อมูลวัตถุสามมิติจะถูกแบ่งแยกเป็นประเภทตามความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งพิจารณาจากจำนวนวัตถุสามมิติที่ความแตกต่างกันของท่าทางรูปร่างอย่างชัดเจน และแยกประเภทตามความซับซ้อนของวัตถุสามมิติประเภทนั้นๆ ซึ่งความซับซ้อนนี้จะวัดจากจำนวนยางค์ที่ชัดเจนที่ยื่นออกจากวัตถุซึ่งทำให้โครงสร้างซับซ้อน

ประเภทของวัตถุสามมิติที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากได้แก่ คน, แวนตา, มด, ตึกดาหมี, มือ, คีม, นก, สปริง, สัตว์ประหลาด และปลาหมึก

ประเภทของวัตถุสามมิติที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยได้แก่ ถ้วย, เครื่องบิน, แก้ว, โต้ะ, ปลา, รูปปั้น, กล้อง, ชิ้นส่วนเครื่องจักร, แจกัน และสัตว์

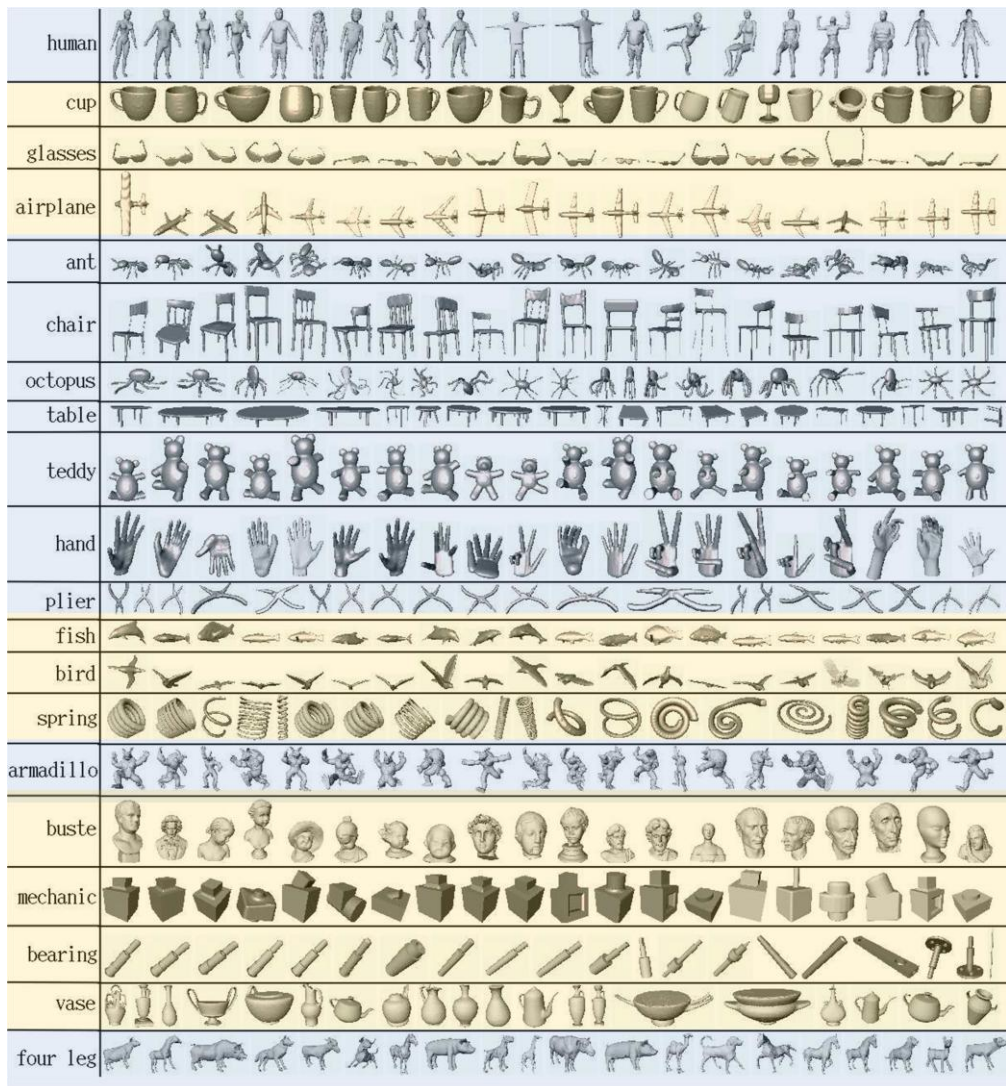
ประเภทของวัตถุสามมิติที่มีความซับซ้อนของรูปร่างมากได้แก่ คน, มด, มือ, สัตว์, ตุ๊กตาทมิ, โต๊ะ, คีม, สัตว์ประหลาด, ปลาหมึก และเก้าอี้

ประเภทของวัตถุสามมิติที่มีความซับซ้อนของรูปร่างน้อยได้แก่ ถ้วย, ปลา, รูปปั้น, กล้อง, ชิ้นส่วนเครื่องจักร, เครื่องบิน, นก, แวนตา, แจกัน และสปริง



รูปที่ 4.2 การแบ่งวัตถุสามมิติสำหรับทดสอบตามการเปลี่ยนแปลงท่าทาง

สีฟ้าแสดงวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงท่าทางมาก สีเหลืองแสดงวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงท่าทางน้อย



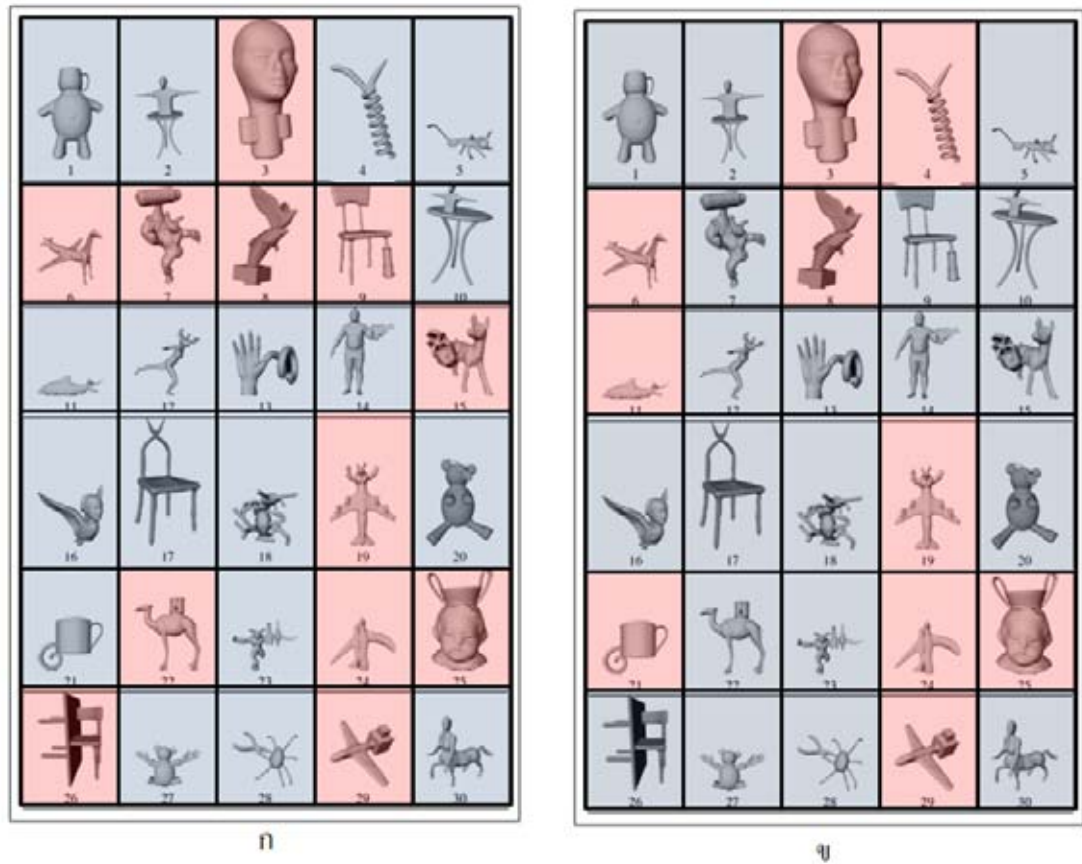
รูปที่ 4.3 การแบ่งวัตถุสามมิติสำหรับทดสอบตามความซับซ้อน
สีฟ้าแสดงวัตถุที่มีความซับซ้อนมาก สีเหลืองแสดงวัตถุที่มีความซับซ้อนน้อย

Query Number	Relevant Classes
1	cup, teddy
2	human, table
3	buste, mechanic
4	plier, spring
5	ant, glasses
6	four legs, airplane
7	armadillo, vase, bearing
8	fish, bird, mechanic
9	chairs, bearings
10	human, table
11	fisher, hand
12	human, octopus
13	hand, spring
14	human, fish
15	four legs, vase
16	bird, buste
17	chair, plier
18	ant, octopus
19	airplane, armadillo
20	teddy, spectacle
21	cup, springs
22	four legs, cup
23	armadillo, bearing, bird
24	airplane, bird
25	head, vase
26	chair, table
27	teddy, hand
28	octopus, plier
29	airplane, mechanical
30	four legs, human



รูปที่ 4.4 วัตถุสามมิติสำหรับสืบค้น [8]

เซตวัตถุสามมิติสำหรับสืบค้นจะถูกแยกประเภทตามความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและตามความซับซ้อน สำหรับความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะวัดจากประเภทของวัตถุสามมิติที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุสามมิติคั่นคั้นว่าประเภทนั้นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากหรือน้อย และสำหรับความซับซ้อนจะวัดจากประเภทของวัตถุสามมิติที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุสามมิติคั่นคั้นว่าประเภทนั้นมีความซับซ้อนมากหรือน้อย การแบ่งประเภทแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ก.การแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงท่าทาง สีเทาแสดงวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก สีแดงแสดงวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ข.การแบ่งตามความซับซ้อน สีเทาแสดงวัตถุที่มีความซับซ้อนมาก และ สีแดงแสดงวัตถุที่มีความซับซ้อนน้อย

4.3 การทดสอบเวลาที่ใช้สืบค้น

การทดสอบเวลาที่ใช้สืบค้นวัตถุสามมิติ เป็นการทดสอบเพื่อที่จะอธิบายว่าการสืบค้นวัตถุสามมิติ 1 ชิ้นใช้เวลาในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนมากน้อยเพียงใด และขึ้นกับปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อเวลาในการคำนวณนั้น

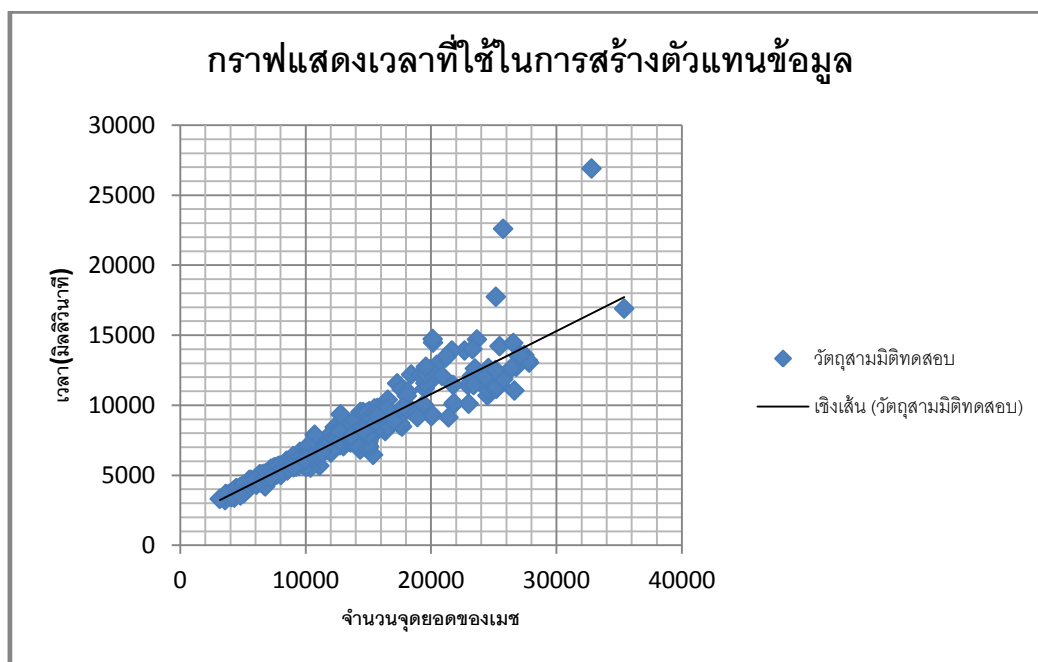
4.3.1 วิธีการทดสอบเวลาที่ใช้สลิปคั้น

วิธีการทดสอบเวลาที่ใช้สลิปคั้นจะทำการทดสอบในแต่ละขั้นตอนของการสลิปคั้น วัตถุประสงค์ซึ่งจะทดสอบใน 2 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่ ขั้นตอนการสร้างตัวแทนข้อมูลวัตถุประสงค์ และขั้นตอนในการเปรียบเทียบกับข้อมูลในเซตของวัตถุประสงค์ ในการทดสอบเวลาที่ใช้ในการสร้างตัวแทนข้อมูลวัตถุประสงค์จะวัดผลเวลาโดยเทียบกับจำนวนจุดยอดโดยจะวัดในทุก ๆ วัตถุประสงค์ในเซตของวัตถุประสงค์ การทดสอบเวลาที่ใช้ในการเปรียบเทียบจะวัดผลเวลาเทียบกับจำนวนจุดยอดของกราฟที่ใช้คั้นคั้น ข้อมูลที่ใช้ทดสอบเวลาที่ใช้ในการสลิปคั้นนี้คือวัตถุประสงค์สำหรับทดสอบทั้ง 400 ชิ้น

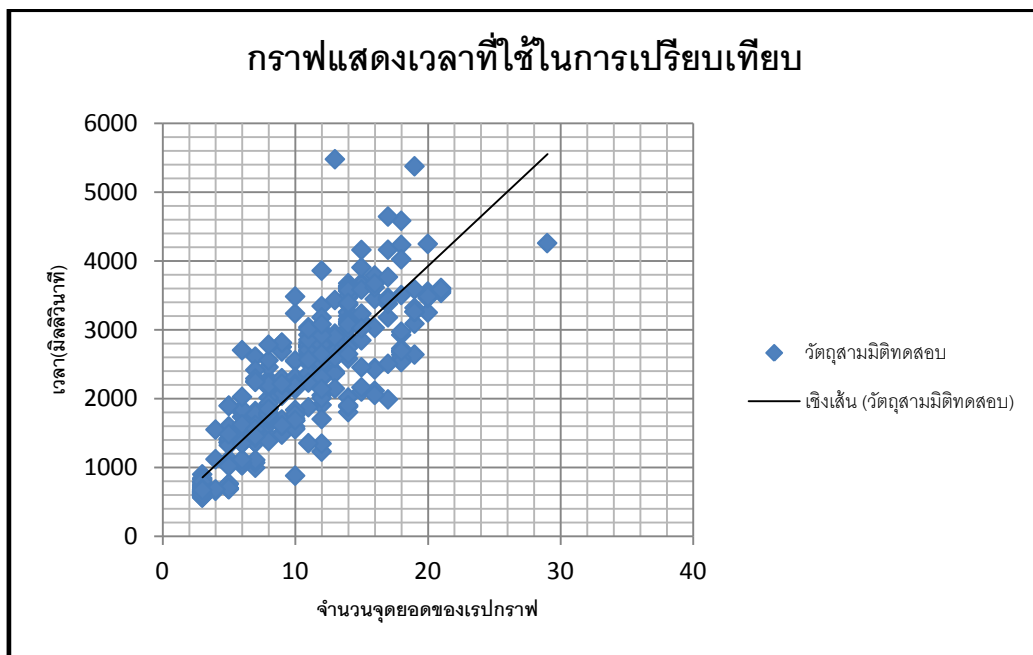
4.3.2 ผลการทดสอบเวลาที่ใช้สลิปคั้น

ผลการทดสอบเวลาที่ใช้สลิปคั้นจะแสดงเป็นกราฟโดยผลการทดสอบเวลาที่ใช้ในการสร้างตัวแทนข้อมูลวัตถุประสงค์จะแสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งข้อมูลในแกนนอนจะแสดงจำนวนจุดยอดของวัตถุประสงค์และแกนตั้งจะแสดงเวลาที่ใช้ ผลการทดสอบเวลาที่ใช้ในการเปรียบเทียบวัตถุประสงค์จะแสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งข้อมูลในแกนนอนจะแสดงจำนวนจุดยอดของกราฟที่เป็นตัวแทนวัตถุประสงค์และแกนตั้งจะแสดงเวลาที่ใช้

ตารางที่ 4.1 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการสร้างตัวแทนข้อมูล

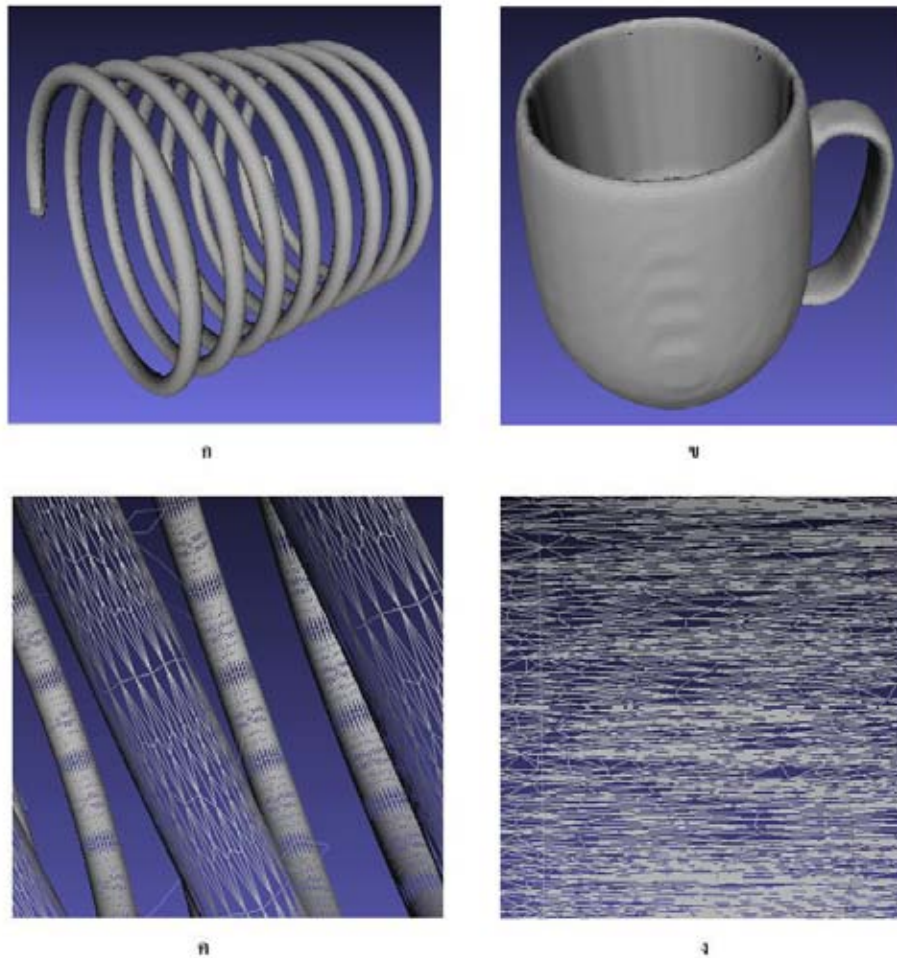


ตารางที่ 4.2 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการเปรียบเทียบ



4.3.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบเวลาที่ใช้สืบค้น

จากผลการทดสอบเวลาที่ใช้สืบค้นดังในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่าความเร็วในการคำนวณจะขึ้นกับปัจจัย 2 อย่างคือ จำนวนจุดยอดของวัตถุสามมิติในขั้นตอนการสร้างตัวแทนข้อมูล และจำนวนจุดยอดหรือจำนวนส่วนย่อยของวัตถุในขั้นตอนการเปรียบเทียบ ซึ่งค่ายิ่งมากจะทำให้ยิ่งใช้เวลาในการคำนวณที่นานขึ้น แต่จากตารางที่ 4.1 จะมีข้อมูลผิดปกติที่มีค่าห่างจากเส้นแนวโน้มอย่างชัดเจนจำนวน 2 รายการคือวัตถุสามมิติในรูปที่ 4.6 ก. และข. สาเหตุของความผิดพลาดนั้นเกิดจากการที่เส้นเชื่อมของเมฆของวัตถุทั้งสองมีขนาดยาวดังรูปที่ 4.6 ค. และง. ตามลำดับ เป็นเหตุให้การสร้างจุดยอดฐานในกระบวนการหาค่าระยะจีโอเดสิกเฉลี่ยซึ่งวิเคราะห์จากระยะห่างจากจุดยอด ผลิตจุดยอดฐานเป็นจำนวนมากเนื่องจากระยะที่ครอบคลุมสามารถครอบคลุมจุดยอดได้น้อยลง



รูปที่ 4.6 วัตถุที่ใช้เวลาในการสร้างตัวอธิบายข้อมูลนานผิดปกติและพื้นผิวที่ทำให้เกิดปัญหา

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการสับคั่นแบบบางส่วน

การทดสอบประสิทธิภาพการสับคั่นแบบบางส่วนเป็นการทดสอบเพื่อที่จะอธิบายว่าการสับคั่นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนที่นำเสนอมีความถูกต้องในการคั่นวัตถุมากเพียงใด มีประสิทธิภาพเทียบกับการที่ใกล้เคียงเป็นอย่างไร

4.4.1 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพการสับคั่นแบบบางส่วน

การทดสอบประสิทธิภาพการคั่นแบบบางส่วนจะนำวัตถุสามมิติสำหรับการสับคั่นทั้ง 30 ชิ้นมาสับคั่นและคั่นชิ้นเซตของวัตถุสำหรับทดสอบทั้ง 400 ชิ้นซึ่งถูกเรียงลำดับตามค่าความเหมือนโดยวัตถุที่เกี่ยวข้องกับวัตถุสับคั่นจะพิจารณาตามข้อกำหนดในรูปที่ 4.4 การวัดประสิทธิภาพการสับคั่นจะแสดงเป็น 2 ส่วนได้แก่ ประสิทธิภาพในแต่ละการสับคั่น และประสิทธิภาพโดยรวมของการสับคั่น โดยการวัดประสิทธิภาพทั้ง 2 ส่วนจะถูกเปรียบเทียบกับงานที่ใกล้เคียง

ซึ่งคืองานการสืบค้นวัตถุสามมิติด้วยโครงกระดูกโค้ง(Cornea)[18] และงานการสืบค้นวัตถุสามมิติด้วยเอ็กเทนด์เรปกราฟ(ERG)[19] ซึ่งทั้งสองงานนี้เสนอการสืบค้นแบบบางส่วนโดยขึ้นกับโครงสร้างของวัตถุสามมิติโดยผลการทดสอบของทั้งสองงานนี้ นำมาจากผลการประกวดการสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนในปี 2007[8] ซึ่งใช้ข้อมูลทดสอบอย่างเดียวกับงานที่นำเสนอ

การวัดประสิทธิผลในแต่ละการสืบค้นจะเริ่มจากการสร้างแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน (Precision and Recall Diagram) สำหรับทุก ๆ การสืบค้น โดยใช้ข้อมูลจากเซตวัตถุสามมิติที่ถูกค้นคืนในแต่ละการสืบค้น วัดประสิทธิผลการสืบค้นในแต่ละการสืบค้นด้วยค่าความแม่นยำเฉลี่ย (Average Precision) ซึ่งหาได้จากข้อมูลแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน

การวัดประสิทธิผลโดยรวมของการสืบค้นที่แตกต่างกันจะนำแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืนของทุก ๆ การสืบค้นมารวมและเฉลี่ยค่าความแม่นยำ ณ ทุก ๆ ค่าการเรียกคืนที่เท่ากัน ผลลัพธ์จะแสดงเป็นแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน

4.4.2 ผลการทดสอบประสิทธิผลการสืบค้นแบบบางส่วน

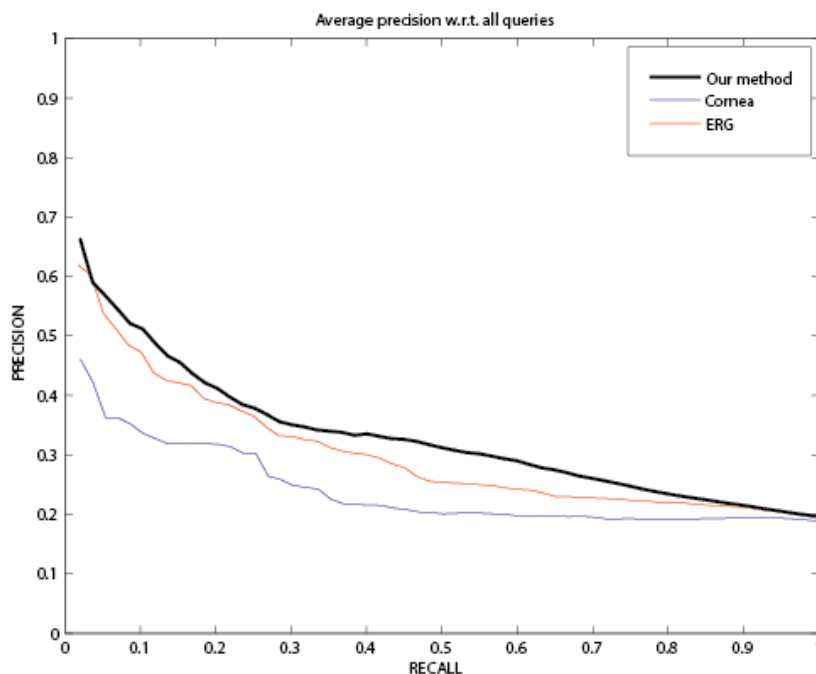
ผลการทดสอบประสิทธิผลการสืบค้นแบบบางส่วนในแต่ละวัตถุสามมิติสืบค้น โดยเปรียบเทียบกับงานที่ใกล้เคียงแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 โดยแสดงเป็นวัตถุที่ใช้สืบค้นคู่กับค่าความแม่นยำเฉลี่ย

ผลการทดสอบประสิทธิผลโดยรวมของการสืบค้นแบบบางส่วนโดยเปรียบเทียบกับงานที่ใกล้เคียง ในแกนตั้งแทนความแม่นยำและแกนนอนแทนการเรียกคืนของการสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนโดยเปรียบเทียบกับงานที่ใกล้เคียง ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.4 จากผลการทดสอบงานที่นำเสนอมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเป็น 0.348 ซึ่งมากกว่างานเอ็กเทนด์เรปกราฟ(ERG)[19] 0.061 และมากกว่างานโครงกระดูกโค้ง(Cornea)[18] 0.108 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสืบค้นแบบบางส่วนในแต่ละวัตถุประสงค์สืบค้นโดยเทียบกับงานที่ใกล้เคียง

วัตถุประสงค์สืบค้น	ค่าความแม่นยำ		
	OUR	ERG	CORNEA
1	0.374	0.374	0.391
2	0.492	0.285	0.188
3	0.308	0.205	0.357
4	0.407	0.217	0.269
5	0.488	0.417	0.144
6	0.327	0.226	0.302
7	0.386	0.287	0.273
8	0.449	0.291	0.269
9	0.263	0.514	0.165
10	0.363	0.468	0.274
11	0.323	0.123	0.310
12	0.590	0.557	0.282
13	0.170	0.166	0.097
14	0.334	0.283	0.292
15	0.282	0.137	0.221
16	0.481	0.363	0.164
17	0.314	0.345	0.192
18	0.349	0.165	0.123
19	0.294	0.451	0.210
20	0.257	0.240	0.405
21	0.230	0.308	0.111
22	0.194	0.137	0.237
23	0.347	0.420	0.248
24	0.168	0.131	0.187
25	0.306	0.154	0.151
26	0.217	0.160	0.157
27	0.435	0.214	0.212
28	0.326	0.289	0.290
29	0.471	0.437	0.414
30	0.493	0.254	0.255
ค่าเฉลี่ยความแม่นยำ	0.348	0.287	0.240

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบประสิทธิผลโดยรวมของการสืบค้นแบบบางส่วนโดยเปรียบเทียบกับงานที่ใกล้เคียง



4.4.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.4 อัลกอริทึมที่นำเสนอมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเป็น 0.348 ซึ่งแสดงได้ว่าเมื่อสืบค้นสืบค้นและค้นคืนวัตถุสามมิติขึ้นมาทีละชั้นมีความน่าจะเป็นที่วัตถุสามมิติในลำดับต่อไปจะเป็นวัตถุสามมิติที่เกี่ยวข้องเท่ากับ 0.348 และจากผลการทดสอบนี้แสดงได้ว่างานที่นำเสนอมีประสิทธิผลเหนือกว่างานที่ใกล้เคียง

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.3 เมื่อแยกวัตถุสามมิติสำหรับสืบค้นตามความสามารถในการเปลี่ยนแปลงท่าทางเป็น 2 กลุ่มดังในรูปที่ 4.5 ก. ผลของการแบ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 ตามลำดับ เมื่อเทียบค่าเฉลี่ยความแม่นยำของแต่ละกลุ่มกับงานเอ็กเทนด์เรปกรัฟ(ERG)[19] ซึ่งเป็นงานที่ใกล้เคียงกับงานที่นำเสนอแต่ไม่รองรับการเปลี่ยนแปลงท่าทาง จะเห็นได้ว่างานที่นำเสนอมีประสิทธิผลการสืบค้นที่ดีกว่าในกรณีที่วัตถุที่เกี่ยวข้องมีการเปลี่ยนแปลงท่าทางที่แตกต่างกันมากดังผลในตารางที่ 4.5 จึงสรุปได้ว่าความสามารถในการรองรับการเปลี่ยนแปลงท่าทางของวัตถุจะช่วยเพิ่มประสิทธิผลในการสืบค้น

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสืบค้นแบบบางส่วนในแต่ละวัตถุประสงค์สืบค้นซึ่ง
วัตถุประสงค์ที่เกี่ยวข้องจะมีการเปลี่ยนแปลงท่าทางมาก

วัตถุประสงค์สืบค้น	ค่าความแม่นยำ		
	OUR	ERG	CORNEA
1	0.374	0.374	0.391
2	0.492	0.285	0.188
4	0.407	0.217	0.269
5	0.488	0.417	0.144
10	0.363	0.468	0.274
11	0.323	0.123	0.310
12	0.590	0.557	0.282
13	0.170	0.166	0.097
14	0.334	0.283	0.292
16	0.481	0.363	0.164
17	0.314	0.345	0.192
18	0.349	0.165	0.123
20	0.257	0.240	0.405
21	0.230	0.308	0.111
23	0.347	0.420	0.248
27	0.435	0.214	0.212
28	0.326	0.289	0.290
30	0.493	0.254	0.255
ค่าเฉลี่ยความแม่นยำ	0.376	0.305	0.236

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสืบค้นแบบบางส่วนในแต่ละวัตถุประสงค์สัมฤทธิ์สืบค้นซึ่ง
วัตถุประสงค์ที่เกี่ยวข้องจะมีการเปลี่ยนแปลงทำทางน้อย

วัตถุประสงค์สัมฤทธิ์สืบค้น	ค่าความแม่นยำ		
	OUR	ERG	CORNEA
3	0.308	0.205	0.357
6	0.327	0.226	0.302
7	0.386	0.287	0.273
8	0.449	0.291	0.269
9	0.263	0.514	0.165
15	0.282	0.137	0.221
19	0.294	0.451	0.210
22	0.194	0.137	0.237
24	0.168	0.131	0.187
25	0.306	0.154	0.151
26	0.217	0.160	0.157
29	0.471	0.437	0.414
ค่าเฉลี่ยความแม่นยำ	0.305	0.261	0.245

4.5 การทดสอบประสิทธิภาพการสืบค้นแบบโดยรวม

การทดสอบประสิทธิภาพการสืบค้นแบบโดยรวมเป็นการทดสอบเพื่อที่จะวัดประสิทธิภาพการสืบค้นของการใช้วัตถุประสงค์แต่ละประเภทในการสืบค้น เพื่อที่จะอธิบายถึงความเหมาะสมของอัลกอริทึมที่นำเสนอกับวัตถุประสงค์สัมฤทธิ์ประเภทต่างๆ

4.5.1 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพการสืบค้นแบบโดยรวม

การทดสอบประสิทธิภาพการค้นคืนแบบโดยรวมจะนำวัตถุประสงค์สัมฤทธิ์สำหรับทดสอบทั้ง 400 ขึ้นมาสืบค้นและค้นคืนเซตของวัตถุประสงค์สำหรับทดสอบทั้ง 400 ขึ้นซึ่งถูกเรียงลำดับตามค่าความเหมือน โดยวัตถุประสงค์ที่เกี่ยวข้องกับวัตถุประสงค์สืบค้นจะพิจารณาจากความเหมือนกันของประเภทของวัตถุประสงค์ที่ถูกค้นคืนกับวัตถุประสงค์สืบค้น การวัดประสิทธิภาพการสืบค้นจะแสดงเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ประสิทธิภาพการสืบค้นในแต่ละประเภทของวัตถุประสงค์สัมฤทธิ์สืบค้น และประสิทธิภาพโดยรวมของการสืบค้นด้วยวัตถุประสงค์สัมฤทธิ์ทุกประเภท

การวัดประสิทธิผลการสืบค้นในแต่ละประเภทของวัตถุประสงค์สืบค้น จะเริ่มจากการสร้างแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน (Precision and Recall Diagram) สำหรับทุกๆ การสืบค้นแล้ววัดประสิทธิผลการสืบค้นในแต่ละประเภทของวัตถุประสงค์สืบค้นด้วยค่าเฉลี่ยความแม่นยำเฉลี่ย (Mean Average Precision) ของการสืบค้นที่ใช้วัตถุประสงค์สืบค้นประเภทเดียวกัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากข้อมูลแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน

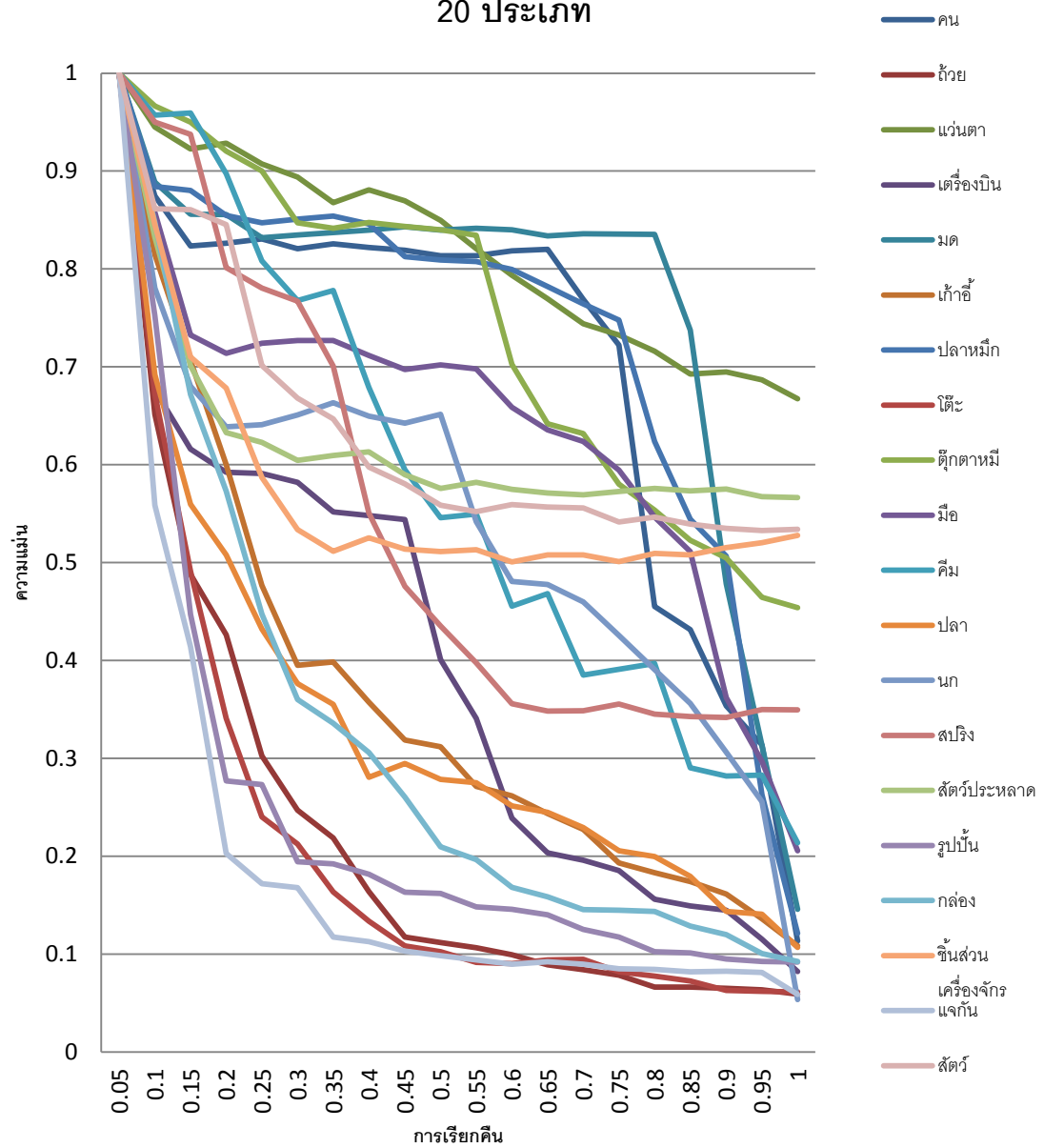
การวัดประสิทธิผลโดยรวมของการสืบค้นทุกประเภทจะนำแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืนของทุกๆ การสืบค้นมารวมและเฉลี่ยค่าความแม่นยำ ณ ทุกๆ ค่าการเรียกคืนที่เท่ากัน ผลลัพธ์จะแสดงเป็นแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน

4.5.2 ผลการทดสอบประสิทธิผลการสืบค้นแบบโดยรวม

ผลการทดสอบประสิทธิผลการสืบค้นแบบโดยรวมของวัตถุประสงค์สืบค้นทั้ง 20 ประเภท แสดงได้ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงเป็นแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน ในแกนตั้งแทนความแม่นยำและแกนนอนแทนการเรียกคืน

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสืบค้นแบบโดยรวมของวัตถุประสงค์สืบค้นทั้ง 20 ประเภท

แผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืนของวัตถุประสงค์สืบค้นทั้ง 20 ประเภท



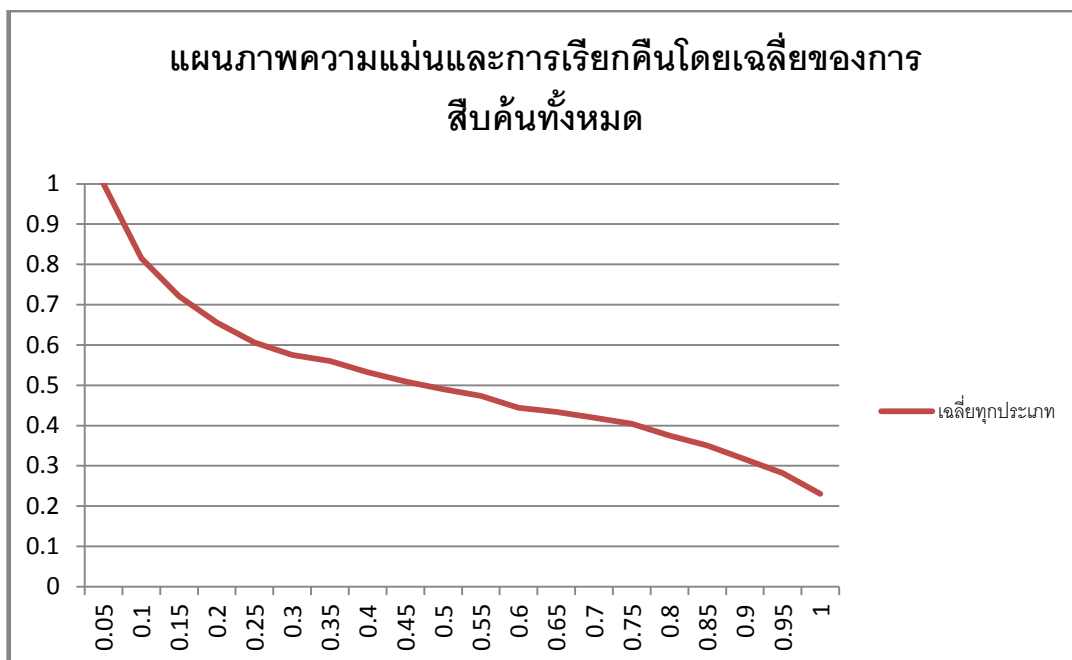
ผลการทดสอบการเปรียบเทียบประสิทธิผลในการสืบค้นวัตถุโดยรวมในแต่ละประเภทแสดงได้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบประสิทธิผลในการสืบค้นวัตถุสามมิติในแต่ละประเภท

ประเภทวัตถุสามมิติ	ค่าเฉลี่ยความแม่นยำ
คน	0.703
ถ้วย	0.225
แว่นตา	0.819
เครื่องบิน	0.396
มด	0.766
เก้าอี้	0.367
ปลาหมึก	0.730
โต๊ะ	0.213
ตุ๊กตาทมิ	0.742
มือ	0.636
คีม	0.585
ปลา	0.338
นก	0.537
สปริง	0.547
สัตว์ประหลาด	0.626
รูปปั้น	0.240
กล่อง	0.321
ชิ้นส่วนเครื่องจักร	0.576
แจกัน	0.189
สัตว์	0.639
เฉลี่ย	0.510

ผลการทดสอบความแม่นยำและการเรียกคืนโดยในแทนตั้งแทนความแม่นยำและแทนนอนแทนการเรียกคืนของการสืบค้นวัตถุสามมิติแบบโดยรวมของวัตถุสามมิติทั้ง 20 ประเภทแสดงได้ดังตารางที่ 4.9 โดยมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเป็น 0.510

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความแม่นยำและการเรียกคืนของวัตถุสามมิติโดยรวมของวัตถุสามมิติทุกประเภท



4.5.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

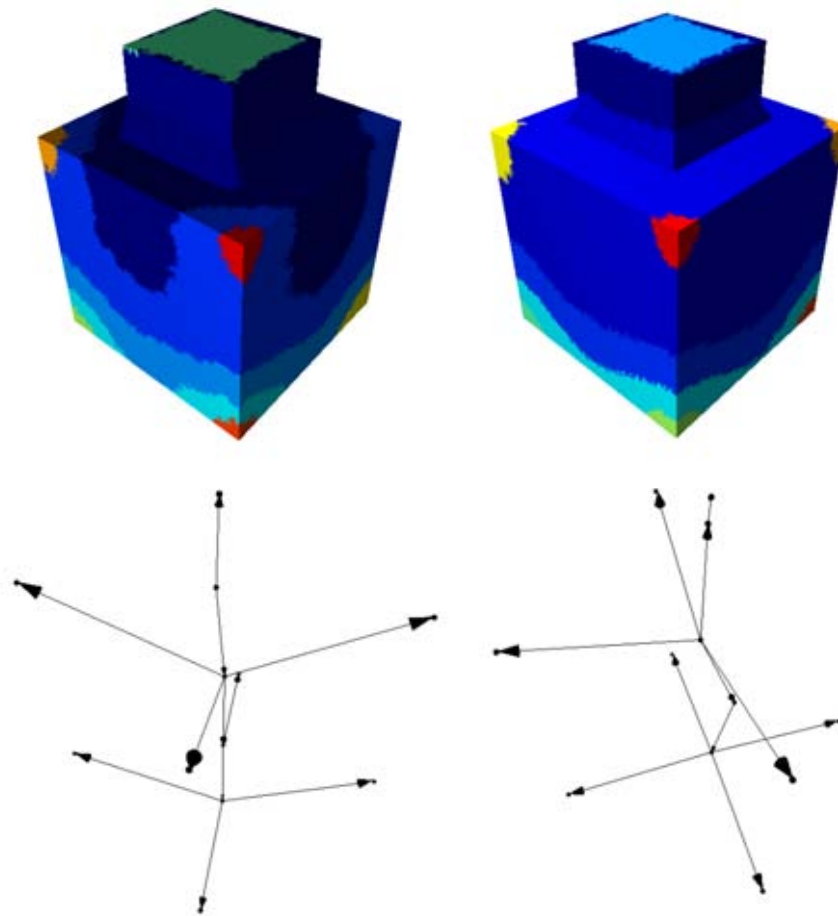
จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.9 แสดงได้ว่าการสืบค้นแบบโดยมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเป็น 0.510 ซึ่งแสดงได้ว่าเมื่อสืบค้นสืบค้นและค้นคืนวัตถุสามมิติขึ้นมาทีละชั้นมีความน่าจะเป็นที่วัตถุสามมิติในลำดับต่อไปจะเป็นวัตถุสามมิติที่เกี่ยวข้องเท่ากับ 0.510

จากผลการทดลองวัดประสิทธิผลการสืบค้นโดยในแต่ละประเภทในตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 เมื่อนำวัตถุสามมิติที่ใช้สืบค้นมาแยกตามความซับซ้อนดังรูปที่ 4.3 เป็น 2 กลุ่ม ประสิทธิภาพของการสืบค้นในแต่ละประเภทจะแสดงได้ดังตารางที่ 4.10 โดยจากข้อมูลนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าในวัตถุสามมิติที่มีความซับซ้อนหรือมีรายละเอียดชัดเจนและมีจำนวนมากจะถูกค้นคืนได้แม่นยำมากกว่าวัตถุที่มีความซับซ้อนน้อยเนื่องจากการตัวแทนข้อมูลที่ใช้ในงานนี้จะขึ้นกับข้อมูลทางทอพอโลยีเป็นหลักและใช้ข้อมูลรูปร่างช่วยเสริมดังนั้นวัตถุที่มีทอพอโลยีไม่ซับซ้อนจึงทำให้ประสิทธิภาพในการแยกแยะวัตถุต่อยลงเนื่องจากสับสนกับข้อมูลอื่น ๆ ที่มีทอพอโลยีไม่ซับซ้อนพอกัน และอีกประการหนึ่งก็คือการตัดแบ่งด้วยระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยในวัตถุที่มีรูปร่างน้อยหรือมีลักษณะเป็นก้อนจะอ่อนไหวต่อพื้นผิวของวัตถุได้มากดังตัวอย่างในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบประสิทธิผลในการสืบค้นวัตถุดูสามมิติเทียบกับความซับซ้อนของ
รูปร่าง

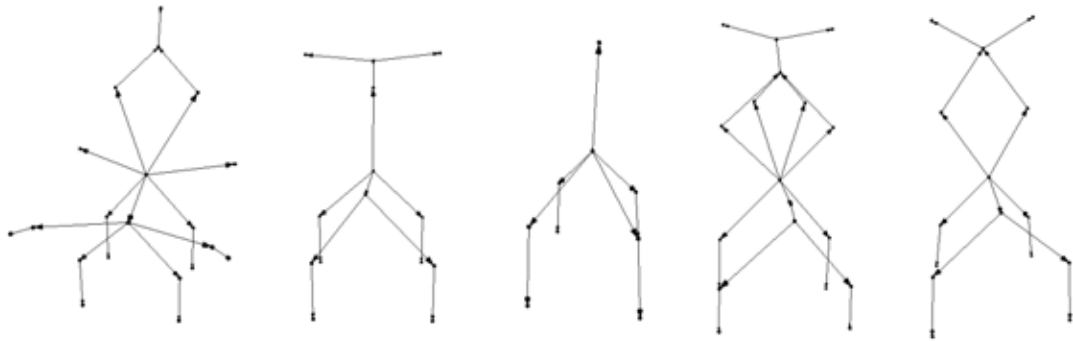
ประเภทวัตถุดูสามมิติที่มี ความซับซ้อนมาก	ค่าเฉลี่ย ความแม่นยำ
คน	0.703
มด	0.766
มือ	0.636
คีม	0.585
สัตว์	0.639
เก้าอี้	0.367
ปลาหมึก	0.730
สัตว์ประหลาด	0.626
โต๊ะ	0.213
ตุ๊กตาหมี	0.742
เฉลี่ย	0.601

ประเภทวัตถุดูสามมิติที่มี ความซับซ้อนน้อย	ค่าเฉลี่ย ความแม่นยำ
ถ้วย	0.225
ปลา	0.338
รูปปั้น	0.240
กล่อง	0.321
ชิ้นส่วนเครื่องจักร	0.577
แจกัน	0.189
สปริง	0.547
เครื่องบิน	0.396
นก	0.537
แว่นตา	0.819
เฉลี่ย	0.419

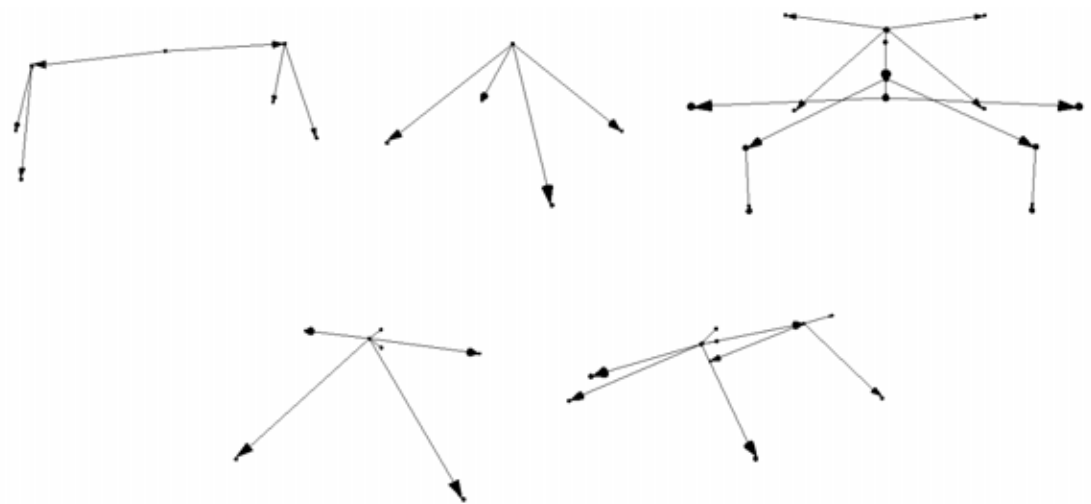


รูปที่ 4.7 ตัวอย่างวัตถุสามมิติที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนและแตกต่างกันเล็กน้อย กับ กราฟแสดงการเชื่อมต่อระหว่างส่วนย่อย

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.10 ในกลุ่มของวัตถุที่มีความซับซ้อนสูงจะมีวัตถุสามมิติอยู่ 2 ประเภทที่มีประสิทธิภาพในการสืบค้นน้อยกว่าประเภทอื่นในกลุ่มอย่างเห็นได้ชัดนั่นคือประเภท โต้ะ และแก้อี้ สาเหตุของปัญหานี้เกิดมาจากข้อมูลที่แทนวัตถุสามมิติมีความแปรปรวนภายในประเภทมากดังภาพตัวอย่างในรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 รูปแบบที่แตกต่างกันของข้อมูลที่แทนวัตถุสามมิติประเภทเก้าอี้



รูปที่ 4.9 รูปแบบที่แตกต่างกันของข้อมูลที่แทนวัตถุสามมิติประเภทโต๊ะ

4.6 การทดสอบการปรับพารามิเตอร์

การทดสอบการปรับพารามิเตอร์มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงผลกระทบจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ และแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พารามิเตอร์ที่ใช้ในงานที่น่าเสนอได้แก่ค่าถ่วงน้ำหนักในสมการที่ 3.11 และค่าระดับชั้นตั้งต้นในขั้นตอนการแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรปกราฟ การทดสอบจะแบ่งเป็นการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนัก และ การทดสอบค่าระดับชั้นตั้งต้น

4.6.1 การทดสอบค่าถ่วงน้ำหนัก

การทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักเป็นการทดสอบเพื่อแสดงผลกระทบและค่าที่เหมาะสมที่สุดของค่าถ่วงน้ำหนักในสมการที่ 3.11 ซึ่งสมการนี้ถูกใช้ในการวัดความเหมือนกันระหว่างส่วนย่อยของวัตถุสามมิติ โดยการหาความเหมือนระหว่างส่วนย่อยของวัตถุสามมิตินี้จะ

ถูกใช้ในสองขั้นตอนคือในขั้นตอนการเปรียบเทียบและการวัดความเหมือนระหว่างวัตถุสามมิติตามลำดับ

4.6.1.1 วิธีการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนัก

การทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักจะแบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่การทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการเปรียบเทียบ และการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการวัดความเหมือน โดยการทดสอบทั้ง 2 ส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างการสืบค้นที่มีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักแตกต่างกัน โดยการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการเปรียบเทียบจะกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการวัดความเหมือนมีค่าคงที่เป็น 0.4, 0.5 และ 0.1 ตามลำดับ และปรับค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับขั้นตอนการเปรียบเทียบตามตารางที่ 4.11 สำหรับการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการวัดความเหมือนจะกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการเปรียบเทียบมีค่าคงที่เป็น 0.2, 0.7 และ 0.1 ตามลำดับ และปรับค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับขั้นตอนการวัดความเหมือนตามตารางที่ 4.11

การสืบค้นแต่ละครั้งจะนำวัตถุสามมิติสำหรับการสืบค้นทั้ง 30 ชิ้นมาสืบค้นบนเซตของวัตถุสำหรับทดสอบทั้ง 400 ชิ้น และค้นคืนเซตของวัตถุสำหรับทดสอบซึ่งถูกเรียงลำดับตามค่าความเหมือน โดยจะพิจารณาวัตถุที่เกี่ยวข้องกับวัตถุสืบค้นตามข้อกำหนดในรูปที่ 4.4 การวัดความแตกต่างระหว่างการสืบค้นแต่ละครั้งจะวัดจากความแตกต่างของประสิทธิผลของการสืบค้นซึ่งประสิทธิผลของการสืบค้นจะถูกระบุด้วยค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (Mean Average Precision)

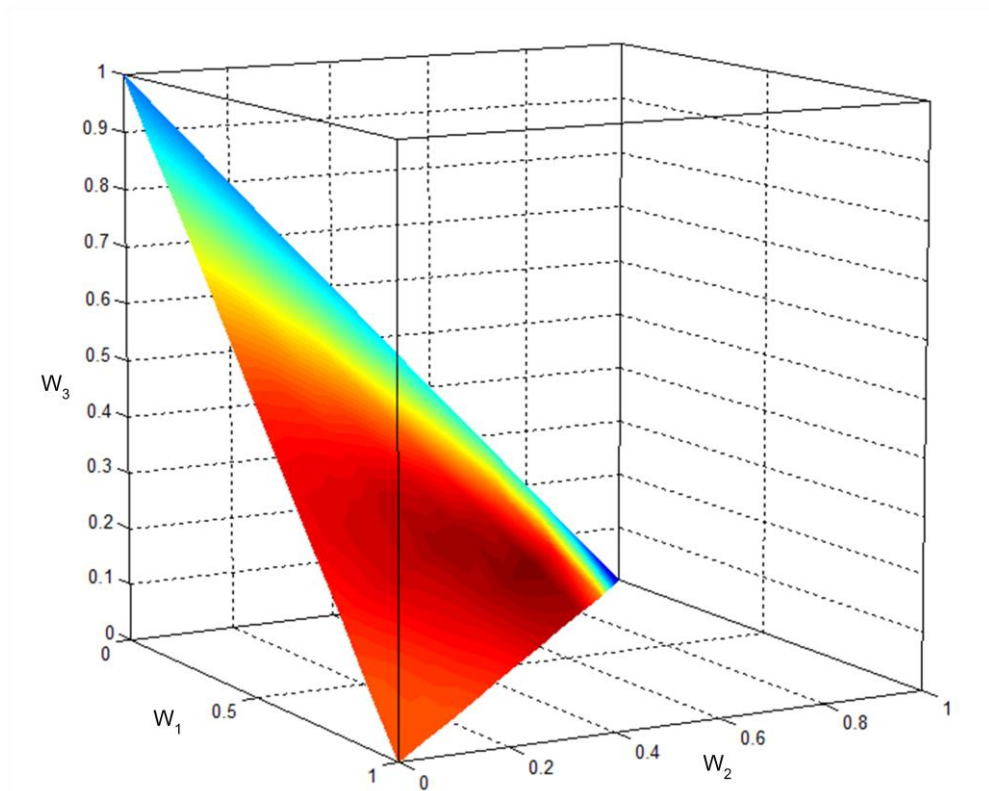
ค่าน้ำหนักที่กำหนดในตารางที่ 4.11 จะมีค่าเป็นจำนวนจริงบวกและมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 และมีผลรวมของทุกตัวแปรค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 1 เนื่องจากในสมการที่ 3.11 ตัวแปรค่าถ่วงน้ำหนัก W_1 , W_2 และ W_3 จะถูกหารด้วยผลรวมของทุกตัวแปรค่าถ่วงน้ำหนักและใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์สำหรับถ่วงน้ำหนักของผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัตถุสามมิติซึ่งค่าสัมประสิทธิ์นี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และมีผลรวมกันเท่ากับ 1 ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ทดสอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และมีผลรวมเท่ากับ 1 เพื่อแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการถ่วงน้ำหนักโดยตรง

ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบการสืบค้นที่มีการกำหนดค่าน้ำหนักแตกต่างกันจะแสดงเป็นค่าประสิทธิผลของแต่ละการสืบค้นเทียบกับค่าของตัวแปรถ่วงน้ำหนักที่กำหนด แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งค่าสีจะแสดงถึงประสิทธิผลของการสืบค้นและแกนทั้งสามแทนค่าตัวแปรถ่วงน้ำหนักทั้งสามที่ถูกกำหนด

ตารางที่ 4.11 รูปแบบของการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ

W ₁	W ₂	W ₃
0	0	1
0	0.1	0.9
0	0.2	0.8
0	0.3	0.7
0	0.4	0.6
0	0.5	0.5
0	0.6	0.4
0	0.7	0.3
0	0.8	0.2
0	0.9	0.1
0	1	0
0.1	0	0.9
0.1	0.1	0.8
0.1	0.2	0.7
0.1	0.3	0.6
0.1	0.4	0.5
0.1	0.5	0.4
0.1	0.6	0.3
0.1	0.7	0.2
0.1	0.8	0.1
0.1	0.9	0
0.2	0	0.8
0.2	0.1	0.7
0.2	0.2	0.6
0.2	0.3	0.5
0.2	0.4	0.4
0.2	0.5	0.3
0.2	0.6	0.2
0.2	0.7	0.1
0.2	0.8	0
0.3	0	0.7
0.3	0.1	0.6
0.3	0.2	0.5

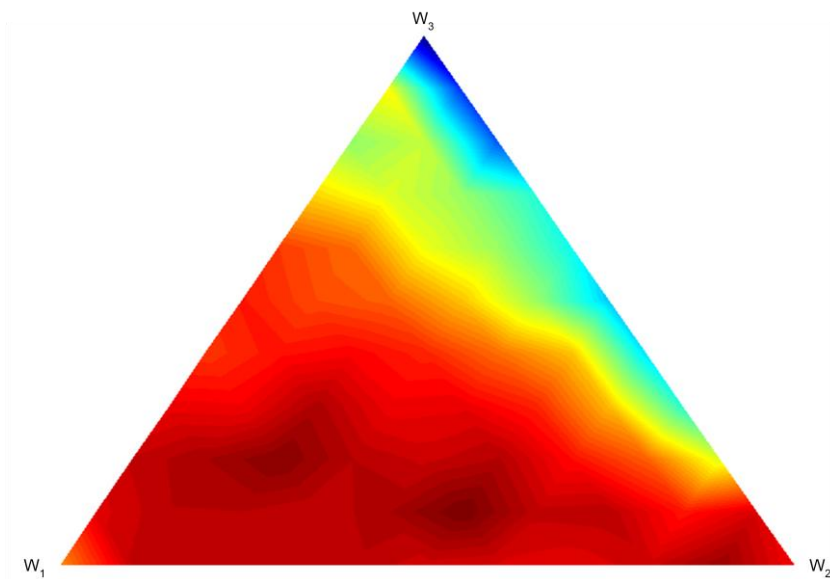
W ₁	W ₂	W ₃
0.3	0.3	0.4
0.3	0.4	0.3
0.3	0.5	0.2
0.3	0.6	0.1
0.3	0.7	0
0.4	0	0.6
0.4	0.1	0.5
0.4	0.2	0.4
0.4	0.3	0.3
0.4	0.4	0.2
0.4	0.5	0.1
0.4	0.6	0
0.5	0	0.5
0.5	0.1	0.4
0.5	0.2	0.3
0.5	0.3	0.2
0.5	0.4	0.1
0.5	0.5	0
0.6	0	0.4
0.6	0.1	0.3
0.6	0.2	0.2
0.6	0.3	0.1
0.6	0.4	0
0.7	0	0.3
0.7	0.1	0.2
0.7	0.2	0.1
0.7	0.3	0
0.8	0	0.2
0.8	0.1	0.1
0.8	0.2	0
0.9	0	0.1
0.9	0.1	0
1	0	0



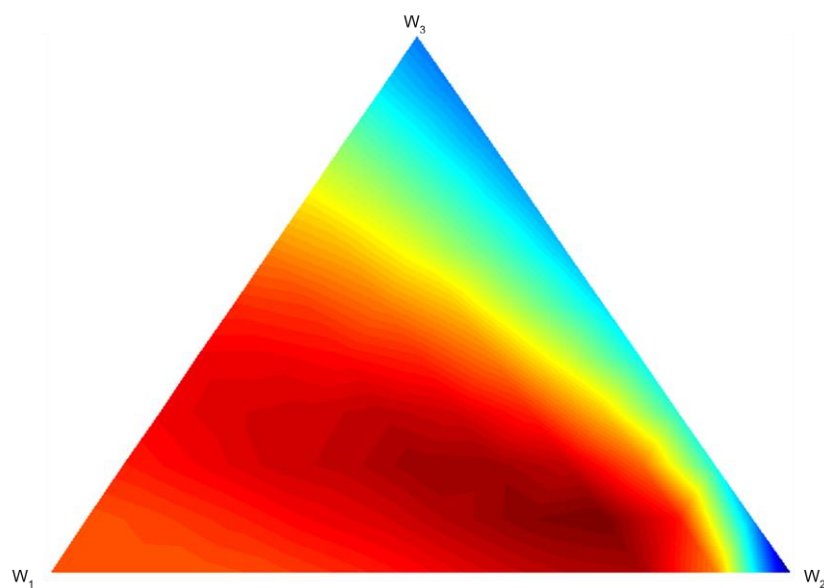
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างของผลลัพธ์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยเทียบกับตัวแปรค่าถ่วงน้ำหนัก

4.6.1.2 ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนัก

ผลการทดสอบแบ่งแสดงได้สองส่วนได้แก่ ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนเปรียบเทียบ และ ผลการทดสอบในขั้นตอนการวัดความเหมือน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ตามลำดับ โดยค่าสีจะแทนประสิทธิภาพการสืบค้นซึ่งยังมีสีแดงเข้มจะแสดงถึงประสิทธิภาพการสืบค้นที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับสีที่เข้าใกล้สีน้ำเงิน และตำแหน่งจะแสดงถึงการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักในการทดสอบ โดยตำแหน่งที่ยิ่งใกล้กับตัวแปรถ่วงน้ำหนักแสดงถึงการให้ค่าถ่วงน้ำหนักกับตัวแปรนั้นที่มากขึ้นในทางตรงกันข้ามตำแหน่งที่ยิ่งห่างจากตัวแปรค่าถ่วงน้ำหนักจะแสดงถึงการให้ค่าถ่วงน้ำหนักที่น้อยลง



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนเปรียบเทียบ



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการวัดความเหมือน

จากผลการทดสอบในขั้นตอนการเปรียบเทียบการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการเปรียบเทียบที่เหมาะสมที่สุดซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพการสืบค้นดีที่สุดคือ การกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก w_1 , w_2 และ w_3 มีค่าเป็น 0.4, 0.5 และ 0.1 ตามลำดับ และผลจากการทดสอบในขั้นตอนการวัดความเหมือนค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการวัดความเหมือนที่

เหมาะที่สุดคือ การกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก W_1, W_2 และ W_3 มีค่าเป็น 0.2, 0.7 และ 0.1 ตามลำดับ

4.6.1.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนัก

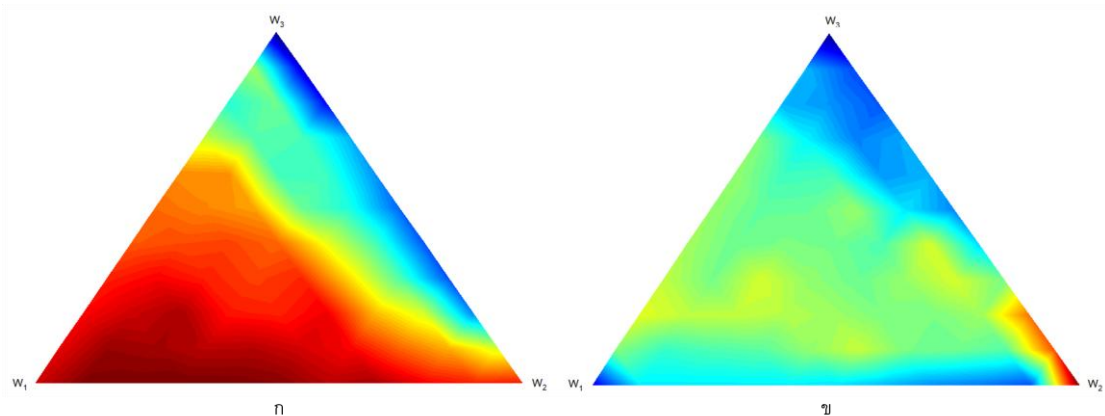
จากผลการทดสอบในขั้นตอนการเปรียบเทียบแสดงได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบจะให้ความสำคัญกับความเหมือนทางรูปร่าง และความเหมือนทางทอพอโลยีของวัตถุสามมิติเป็นหลัก เนื่องจากในการเปรียบเทียบมีเป้าหมายอยู่ที่การหากราฟย่อยสามมิติที่ใหญ่ที่สุดซึ่งเป็นการจับคู่จุดยอดและทำการขยายให้ใหญ่ที่สุด ซึ่งการขยายกราฟนี้จะขยายตามการเชื่อมโยงกันของกราฟซึ่งเป็นคุณสมบัติทางทอพอโลยีและขยายตามความเหมือนกันของรูปร่างของส่วนย่อยของวัตถุสามมิติ จึงทำให้ความเหมือนทางทอพอโลยี และความเหมือนทางรูปร่างมีความสำคัญ ส่วนความเหมือนทางขนาดนั้นจะระบุความแตกต่างของส่วนย่อยได้หยากกว่าจึงมีความสำคัญที่ต่อยกว่าแต่เนื่องจากความเหมือนทางรูปร่างในงานนี้ไม่แสดงถึงความแตกต่างทางขนาดของส่วนย่อยเหมือนทางขนาดนี้จึงช่วยให้การสืบค้นมีประสิทธิภาพการสืบค้นที่ดีมากขึ้น

จากผลการทดสอบในขั้นตอนการวัดความเหมือนแสดงได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมนั้นจะให้น้ำหนักกับความเหมือนทางรูปร่างเป็นหลัก เนื่องจากการวัดความเหมือนจะวัดจากผลรวมเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างส่วนย่อยที่ถูกจับคู่เปรียบเทียบซึ่งความเหมือนกันทางทอพอโลยีจะคำนึงถึงส่วนย่อยอื่น ๆ ที่ไม่ถูกจับคู่และเชื่อมต่อกับส่วนย่อยที่ทำการเปรียบเทียบซึ่งการเชื่อมต่อในลักษณะนี้อยู่นอกเหนือขอบเขตที่สนใจในการเปรียบเทียบ แต่ความเหมือนทางรูปร่างจะเปรียบเทียบรูปร่างของส่วนย่อยที่ถูกจับคู่เท่านั้นจึงทำให้ความเหมือนทางรูปร่างของส่วนย่อยมีความสำคัญที่มากกว่า ส่วนความเหมือนทางขนาดจะขาดความละเอียดในการแยกแยะความแตกต่างระหว่างส่วนย่อยจึงถูกให้ความสำคัญเพียงเล็กน้อยเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสืบค้น

จากผลการทดสอบทั้งสองส่วนเมื่อแยกวัตถุสามมิติสำหรับสืบค้นตามความซับซ้อนของวัตถุสามมิติเป็น 2 กลุ่มดังในรูปที่ 4.5 ข. ผลของการแบ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14 ตามลำดับ

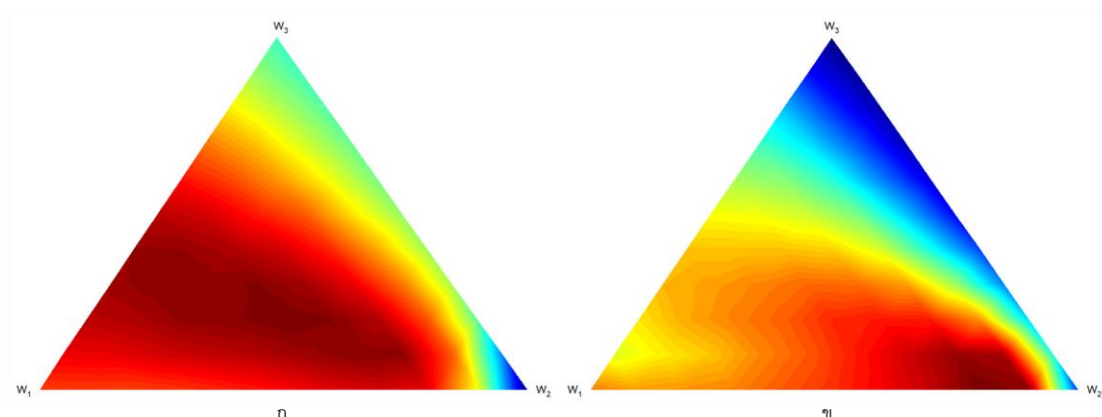
จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.13 ก. แสดงให้เห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมในขั้นตอนเปรียบเทียบจะให้ความสำคัญกับความเหมือนทางทอพอโลยีมากกว่าตัวแปรอื่น ๆ ในกรณีที่วัตถุสำหรับสืบค้นมีความซับซ้อนมากเนื่องจากกราฟตัวแทนของของวัตถุที่ซับซ้อนจะมีจำนวนจุดยอดมากและแต่ละจุดยอดแสดงโครงสร้างของวัตถุได้ชัดเจน ส่วนผลการทดสอบในขั้นตอนการเปรียบเทียบโดยวัตถุที่ใช้สืบค้นมีความซับซ้อนน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.13 ข. ค่าถ่วง

น้ำหนักที่เหมาะสมจะให้ความสำคัญกับความเหมือนกันทางรูปร่างเป็นหลักเนื่องจากกราฟตัวแทนของของวัตถุที่ซับซ้อนน้อยจะมีจำนวนจุดยอดน้อยซึ่งมีข้อมูลทางทอพอโลยีที่ไม่ละเอียดหรือ มีจำนวนจุดยอดมากแต่จุดยอดเหล่านั้นไม่แสดงโครงสร้างของวัตถุอย่างถูกต้อง ทำให้การเน้นค่าถ่วงน้ำหนักไปที่ความเหมือนทางทอพอโลยีจะทำให้ประสิทธิภาพการสืบค้นด้อยลง แต่ความเหมือนทางรูปร่างจะให้ความสำคัญกับรูปร่างโดยรวมของส่วนย่อยซึ่งทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาของการระบุโครงสร้างที่ไม่ละเอียดและมีความผิดพลาดจึงทำให้ความเหมือนทางรูปร่างมีความเหมาะสมมากกว่าในการสืบค้นด้วยวัตถุสามมิติที่ไม่ซับซ้อน



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนเปรียบเทียบซึ่งแบ่งตามความซับซ้อนของวัตถุสามมิติสืบค้นเป็นกลุ่มที่มีความซับซ้อนมาก(ก.)และซับซ้อนน้อย(ข.)

จากผลการทดสอบในขั้นตอนการวัดความเหมือนที่แยกวัตถุสำหรับสืบค้นตามความซับซ้อนในรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าทั้งสองกรณีค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมจะให้ความสำคัญกับความเหมือนทางรูปร่างเป็นหลัก แต่ในกรณีที่วัตถุสำหรับสืบค้นมีความซับซ้อนมากดังแสดงในรูปที่ 4.14 ก. ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมยังให้ความสำคัญกับความเหมือนทางทอพอโลยีเนื่องจากข้อมูลทางทอพอโลยีของวัตถุสามมิติที่ซับซ้อนยังคงแสดงลักษณะเฉพาะของวัตถุสามมิติที่ถูกเปรียบเทียบได้ดีเมื่อเทียบกับในกรณีที่วัตถุสำหรับสืบค้นมีความซับซ้อนน้อย



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบค่าถ่วงน้ำหนักในขั้นตอนการวัดความเหมือนซึ่งแบ่งตามความซับซ้อนของวัตถุสามมิติสี่บั่นเป็นกลุ่มที่ที่มีความซับซ้อนมาก(ก.)และซับซ้อนน้อย(ข.)

4.6.2 การทดสอบค่าระดับขั้นตั้งต้น

การทดสอบค่าระดับขั้นตั้งต้นเป็นการทดสอบเพื่อแสดงผลกระทบของค่าระดับขั้นตั้งต้นต่อการสืบค้นซึ่งค่าระดับขั้นตั้งต้นจะถูกใช้ในขั้นตอนการแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรขาคณิตโดยจะใช้ในการสร้างเรขาคณิตตั้งต้น ซึ่งค่านี้มีความสำคัญต่อความแม่นยำในการแบ่งวัตถุสามมิติ

4.6.2.1 วิธีการทดสอบค่าระดับขั้นตั้งต้น

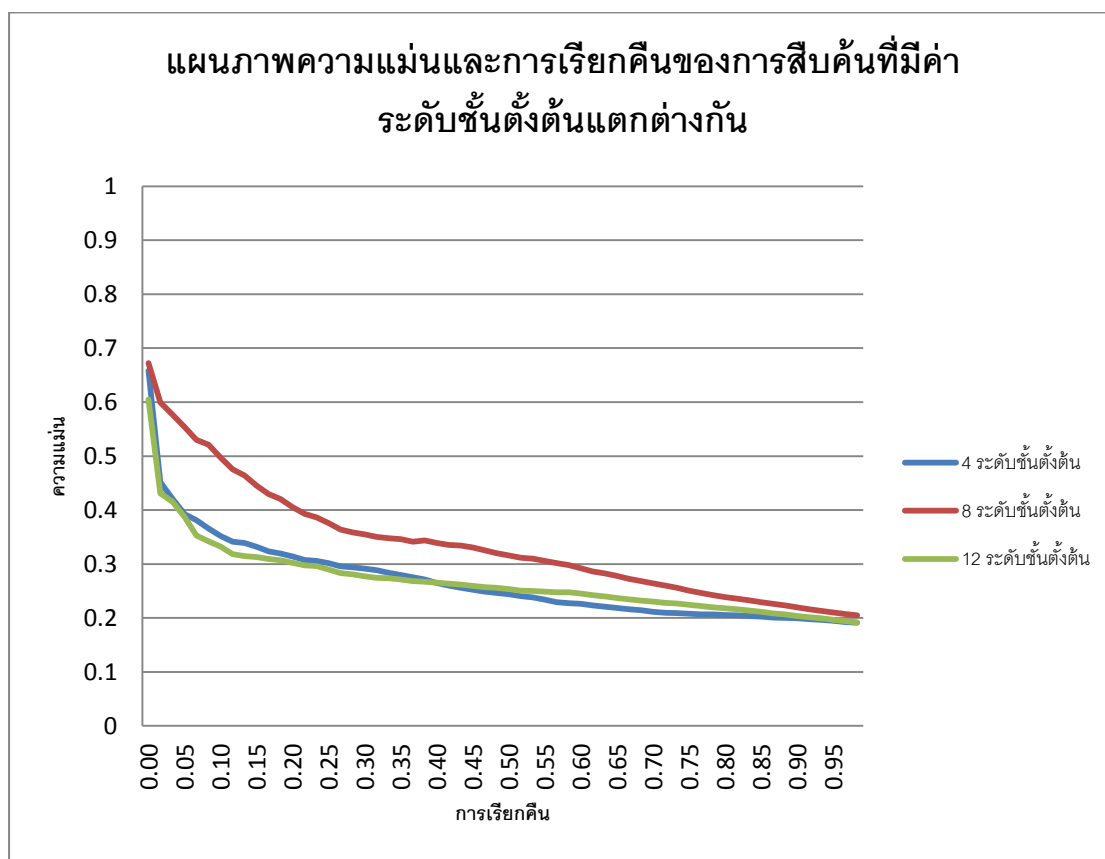
การทดสอบค่าระดับขั้นตั้งต้นจะทำการสืบค้นโดยกำหนดค่าระดับขั้นตั้งต้นในขั้นตอนการแบ่งวัตถุสามมิติแตกต่างกัน โดยค่าระดับขั้นตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ 4, 8 และ 12 ตามลำดับ โดยการทดสอบค่าระดับขั้นตั้งต้นในแต่ละค่าจะทำการสร้างตัวแทนข้อมูลของเซตวัตถุสำหรับทดสอบทั้ง 400 ชิ้น โดยใช้ค่าระดับขั้นตั้งต้นตามที่กำหนด และ ใช้วัตถุสามมิติสำหรับการสืบค้นทั้ง 30 ชิ้นมาสืบค้นบนเซตของวัตถุสำหรับทดสอบที่ใช้ค่าระดับขั้นตั้งต้นตามที่กำหนดและค้นคืนเซตของวัตถุสำหรับทดสอบซึ่งถูกเรียงลำดับตามค่าความเหมือน โดยจะพิจารณาวัตถุที่เกี่ยวข้องกับวัตถุสืบค้นตามข้อกำหนดในรูปที่ 4.4 โดยในแต่ละการสืบค้นจะใช้ค่าระดับขั้นตั้งต้นที่กำหนดในการแบ่งวัตถุสามมิติ

การวัดความแตกต่างระหว่างการใช้ค่าระดับขั้นตั้งต้นแต่ละค่าวัดจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสืบค้นในแต่ละครั้งซึ่งประสิทธิภาพของการสืบค้นจะถูกแสดงด้วยแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน (Precision and Recall Diagram) และ ค่าเฉลี่ยความแม่นยำเฉลี่ย (Mean Average Precision)

4.6.2.2 ผลการทดสอบค่าระดับชั้นตั้งต้น

ผลการทดสอบค่าระดับชั้นตั้งต้นแสดงได้ดังตารางที่ 4.12 ซึ่งแสดงเป็นแผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืน ในแกนตั้งแทนความแม่นยำและแกนนอนแทนการเรียกคืน โดยในแต่ละการทดสอบที่ค่าระดับชั้นตั้งต้น 4, 8 และ 12 จะมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำเฉลี่ยเป็น 0.268, 0.348 และ 0.269 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 แผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืนของการสืบค้นที่มีค่าระดับชั้นตั้งต้นแตกต่างกัน

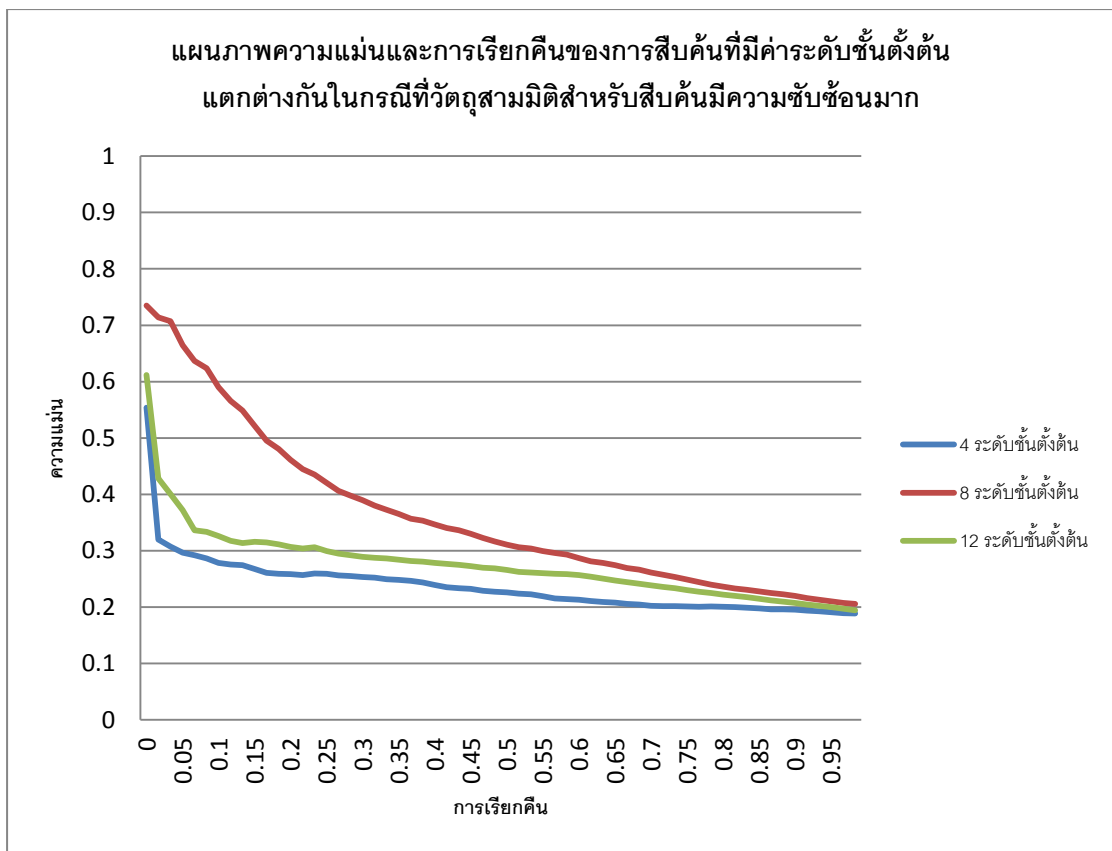


4.6.2.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบค่าระดับชั้นตั้งต้น

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.12 เมื่อนำมาแยกวิเคราะห์ตามความซับซ้อนของวัตถุสามมิติสำหรับสืบค้นเป็น 2 กลุ่มเป็น กลุ่มของวัตถุสำหรับสืบค้นที่มีความซับซ้อนมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และ กลุ่มของวัตถุสำหรับสืบค้นที่มีความซับซ้อนน้อยดังแสดงในตารางที่ 4.14

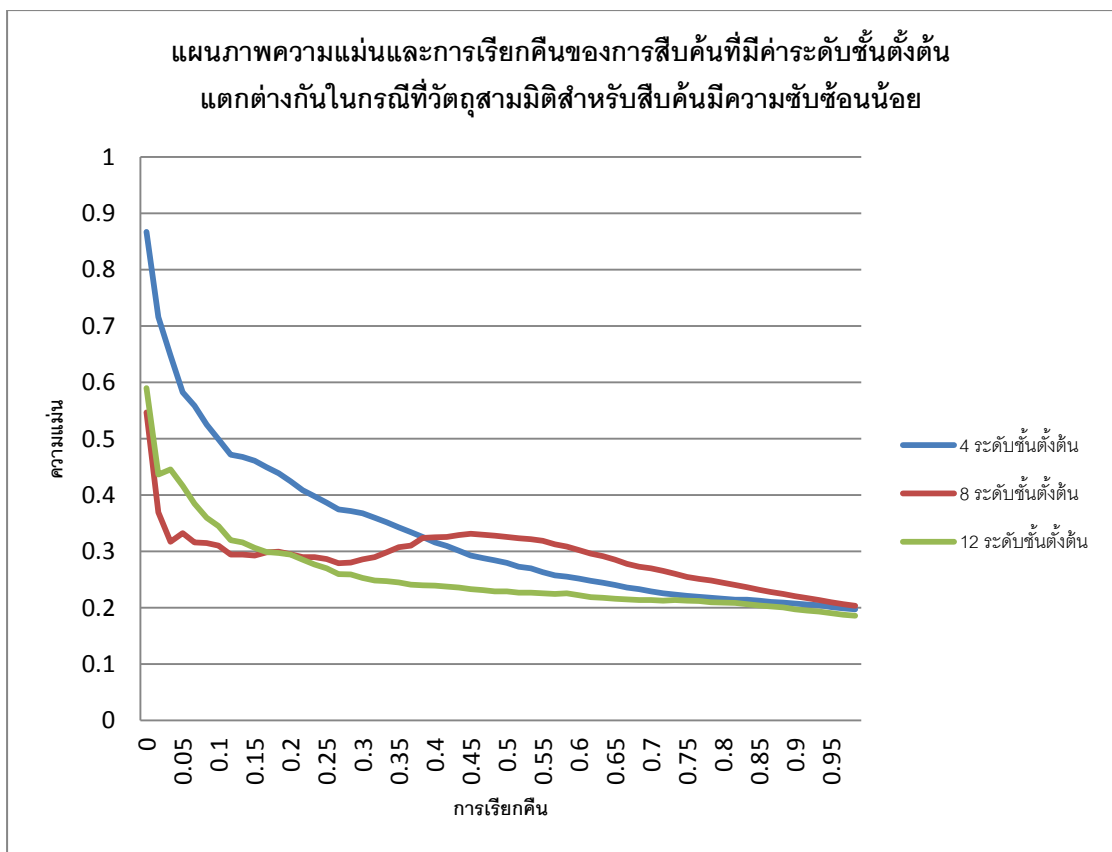
จากตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่วัตถุสำหรับสืบค้นมีความซับซ้อนมาก เมื่อกำหนดให้ค่าระดับชั้นตั้งต้นที่มีค่าน้อยจะส่งผลให้การสืบค้นมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่มีการกำหนดค่าระดับชั้นตั้งต้นที่มากกว่าเนื่องจากการกำหนดค่าระดับชั้นตั้งต้นที่น้อยจะทำให้ได้ข้อมูลทางทอพอโลยีที่ไม่ละเอียดเพียงพอต่อการอธิบายวัตถุสามมิติที่มีความซับซ้อนมากซึ่งวัตถุสามมิติประเภทนี้จะมีลักษณะข้อมูลทางทอพอโลยีที่มีเอกลักษณ์เฉพาะ ดังนั้นการที่มีข้อมูลทางทอพอโลยีไม่ละเอียดจึงส่งผลให้ไม่สามารถแสดงเอกลักษณ์เฉพาะของวัตถุสามมิติในกลุ่มนี้ได้เต็มที่จึงทำให้การสืบค้นมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร แต่ในกรณีที่กำหนดค่าระดับชั้นตั้งต้นมากเกินไปดังเช่นการทดสอบที่ใช้ค่าระดับชั้นตั้งต้นเท่ากับ 12 จะทำให้การแบ่งวัตถุสามมิติด้วยเรปกราฟมีความอ่อนไหวต่อลักษณะที่ไม่สำคัญบนพื้นผิวเช่น ส่วนเว้าหรือนูนเพียงเล็กน้อยบนพื้นผิวของวัตถุ และพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นรอยหยัก เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากการแบ่งวัตถุที่มีความถี่มากเกินไป ซึ่งจะส่งผลให้การสืบค้นเกิดความผิดพลาด

ตารางที่ 4.13 แผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืนของการสืบค้นที่มีค่าระดับชั้นตั้งต้นแตกต่างกันในกรณีที่วัตถุสามมิติสำหรับสืบค้นมีความซับซ้อนมาก



จากตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่วัตถุประสงค์สำหรับสืบค้นมีความซับซ้อนน้อยเมื่อกำหนดให้ค่าระดับชั้นตั้งต้นมีค่ามากจะส่งผลให้การสืบค้นค้นมีประสิทธิภาพการสืบค้นที่ต่ำกว่ากรณีที่กำหนดให้ค่าระดับชั้นตั้งต้นมีค่าน้อยกว่าเนื่องจากวัตถุประสงค์ที่มีความซับซ้อนน้อยจะมีลักษณะเป็นก้อน และมีจำนวนรายการที่น้อยซึ่งผลของการแบ่งวัตถุประสงค์ประเภทนี้ควรจะมีส่วนน้อยตามลักษณะเด่นทางทอพอโลยีที่มีจำนวนน้อยเช่นกัน แต่การแบ่งวัตถุประสงค์ประเภทนี้โดยใช้ค่าระดับชั้นตั้งต้นที่มีค่ามากจะส่งผลให้มีจำนวนส่วนย่อยเป็นจำนวนมากขัดกับสิ่งที่ควรจะเป็นเนื่องจากการแบ่งมีความถี่เกินจำเป็นจนทำให้อ่อนไหวต่อลักษณะที่ไม่สำคัญบนพื้นผิว

ตารางที่ 4.14 แผนภาพความแม่นยำและการเรียกคืนของการสืบค้นที่มีค่าระดับชั้นตั้งต้นแตกต่างกันในกรณีที่วัตถุประสงค์สำหรับสืบค้นมีความซับซ้อนน้อย



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เสนออัลกอริทึมสำหรับการสืบค้นวัตถุสามมิติแบบบางส่วนโดยใช้เรปกราฟเพื่อให้การสืบค้นมีความแม่นยำและทนทานต่อวัตถุที่ใกล้เคียงกันแต่มีการเปลี่ยนแปลงท่าทางที่แตกต่างกันได้ ซึ่งในงานนี้เสนอการใช้เรปกราฟตามระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยร่วมตัวอธิบายข้อมูลทางรูปร่างที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงท่าทางเพื่อให้การสืบค้นรองรับการเปลี่ยนท่าทางของวัตถุ โดยจะใช้เรปกราฟในการแสดงข้อมูลทางทอพอโลยีและเป็นตัวแปรควบคุมสำหรับการแบ่งส่วนวัตถุสามมิติออกเป็นส่วนย่อย และสร้างตัวอธิบายรูปร่างสำหรับแต่ละส่วนย่อยที่ได้ถูกแบ่งเพื่อใช้ในการให้ข้อมูลทางรูปร่างประกอบไปกับข้อมูลทอพอโลยี โดยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีในงานก่อนหน้าที่ใกล้เคียง[19] ซึ่งไม่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงท่าทางจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าประมาณ 5% แต่ในกรณีของวัตถุสามมิติสำหรับสืบค้นมีวัตถุสามมิติในฐานข้อมูลที่ใกล้เคียงกันแต่มีการเปลี่ยนแปลงท่าทาง แตกต่างกันเป็นจำนวนมากจะมีประสิทธิภาพเหนือกว่าประมาณ 8% โดยใช้เวลาในการประมวลผลตั้งแต่การนำเข้าข้อมูลใหม่จนถึงการเปรียบเทียบและค้นคืนอยู่ในช่วงระหว่าง 4 ถึง 23 วินาทีสำหรับฐานข้อมูลที่ใช้ทดสอบ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่างานที่นำเสนอนี้จะเหมาะสมสำหรับการสืบค้นวัตถุสามมิติที่มีรยางค์เป็นจำนวนมากและชัดเจนมากกว่าวัตถุที่มีลักษณะเป็นก้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากปัญหาในการตัดแบ่งวัตถุสามมิติเกินจำเป็นและความอ่อนไหวต่อพื้นผิวของระยะทางจีโอเดสิกสำหรับวัตถุสามมิติที่มีลักษณะเป็นก้อนเป็นปัญหาที่เกิดจากการตัดแบ่งระดับชั้นตามระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยมีความละเอียดเกินไปและตัววัตถุที่มีลักษณะเป็นก้อนเองก็ไม่จำเป็นที่จะต้องถูกแบ่งเป็นส่วนย่อยหลาย ๆ ส่วนเนื่องจากมีข้อมูลทอพอโลยีที่น้อยและง่าย ดังนั้นถ้าหากสามารถแบ่งระดับชั้นให้มีความถี่แปรผันตามความซับซ้อนของวัตถุโดยจะมีความถี่สูงเมื่อวัตถุมีความซับซ้อนมากและมีความถี่ต่ำเมื่อวัตถุมีความซับซ้อนน้อย ซึ่งจะทำให้การสืบค้นมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

จากปัญหาเส้นเชื่อมที่ยาวซึ่งทำให้เกิดจุดยอดฐานเป็นจำนวนมากดังรูปที่ 4.6 ซึ่งทำให้ใช้เวลานานในการคำนวณ เพื่อแก้ปัญหานี้ควรจะมีขั้นตอนการเตรียมพื้นผิวของวัตถุสามมิติโดยให้เส้นเชื่อมมีขนาดที่พอเหมาะโดยที่หน้าสามเหลี่ยมมีขนาดพื้นที่ใกล้เคียงกันก่อนการนำมาเข้ากระบวนการที่นำเสนอในงานนี้ซึ่งจะทำให้การหาจุดยอดฐานจะมีจำนวนคงที่และทำให้การหาระยะทางจีโอเดสิกเฉลี่ยทำได้เร็วขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Iyer, N., Jayanti, S., Lou, K., Kalyanaraman, Y. and Ramani, K. Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends. Computer-Aided Design 37 (April 2005) : 509-530.
- [2] Min, P., Kazhdan, M., and Funkhouser, T. A Comparison of Text and Shape Matching for Retrieval of Online 3D Models. In In Proc. European Conference on Digital Libraries, pp. 209-220, 2004.
- [3] Osada, R., Funkhouser, T., Chazelle, B. and Dobkin, D. Matching 3D models with shape distributions. In Proceedings International Conference on Shape Modeling and Applications, pp. 154-166, 2001.
- [4] Funkhouser, T., Min, P., Kazhdan, M., Chen, J., Halderman, A., Dobkin, D., and Jacobs, D. A search engine for 3D models. ACM Transactions on Graphics 22 (January 2003) : 83-105.
- [5] Gal, R., Shamir, A., and Cohen-Or, D. Pose-oblivious shape signature. IEEE transactions on visualization and computer graphics 13 (April 2007) : 261-271.
- [6] Monteverde, L.J., Ruiz, C.R., and Huang, Z. A Shape Distribution for Comparing 3D Models. In Proceedings of the 13th international conference on Multimedia Modeling, pp.54-63, 2007.
- [7] Ruiz Jr, C.R., Cabredo, R., Monteverde, L.J., and Huang, Z. Combining Shape and Color for Retrieval of 3D Models. In Proceedings of the 2009 Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC, pp. 1295-1300, 2009.
- [8] Marini, S., Paraboschi, L., and Biasotti, S. SHape REtrieval Contest 2007 (SHREC07): Partial Matching Track. In SHREC (in conjunction with IEEE Shape Modeling International), pp. 13-16, 2007.
- [9] Wikipedia contributors. Polygon mesh. Wikipedia, the free encyclopedia. [Online]. 2009. Available from : http://en.wikipedia.org/wiki/Polygon_mesh. [2012,May 14]
- [10] Biasotti, S. Topological techniques for shape understanding. [Online]. 2001. Available from : <http://www.cescg.org/CESCG-2001/SBiasotti/index.html>. [2012, May 14]
- [11] Van Essen Lab contributors. Gaussian Geodesic. Metric Smoothing. [Online]. 2009. Available from : <http://brainvis.wustl.edu/wiki/index.php/Caret:Documentation:MetricSmoothing>. [2012,May 14].

- [12] Mather, S. What is the center line of a complex polygon?. [Online]. 2012. Available from : <http://smathermather.wordpress.com/2012/01/14/what-is-the-center-line-of-a-complex-polygon-cont-again/>. [2012,May 14].
- [13] Funkhouser, T. Ray-Triangle Intersection II. [Online]. 2000. Available from : <http://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall00/cs426/lectures/raycast/sld019.htm>. [2012,May 14].
- [14] lebbeeks Members. [Exercise] Maximum Common Subgraph (MCS). [Online]. 2011. Available form : <http://www.lebbeeks.com/forums/viewtopic.php?id=11613>. [2012,May 14].
- [15] Johnson, A.E., and Hebert, M. Recognizing Objects by Matching Oriented Points. In Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 684-692, 1997.
- [16] Gal, R., and Cohen-Or, D. Salient geometric features for partial shape matching and similarity. ACM Transactions on Graphics 25 (january 2006) : 130-150.
- [17] Bespalov, D., Shokoufandeh, A., Regli, W.C., and Sun, W. Scale-space representation of 3D models and topological matching. In Proceedings of the eighth ACM symposium on Solid modeling and applications, pp. 208-215, 2003.
- [18] Cornea, N.D., Demirci, M.F., Silver, D., Shokoufandeh, A., Dickinson, S.J., and Kantor, P.B. 3D Object Retrieval using Many-to-many Matching of Curve Skeletons. In Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications 2005, pp. 368-373, 2005.
- [19] Biasotti, S., Marini, S., Spagnuolo, M., and Falcidieno, B. Sub-part correspondence by structural descriptors of 3D shapes. Computer-Aided Design 38 (September 2006) : 1002-1019.
- [20] Shinagawa, Y., and Kunii, T.L. Constructing a Reeb graph automatically from cross sections. IEEE Computer Graphics and Applications 11 (November 1991) : 44-51.
- [21] Hilaga, M., Shinagawa, Y., Kohmura, T., and Kunii, T.L. Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes. In Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 203-212, 2001.

- [22] Berretti, S., Del Bimbo, A., and Pala, P. 3D Mesh decomposition using Reeb graphs. Image and Vision Computing 27 (September 2009) : 1540-1554.
- [23] Marini, S., Spagnuolo, M., and Falcidieno, B. From Exact to Approximate Maximum Common Subgraph. In Proceedings of the 5th IAPR international conference on Graph-Based Representations in Pattern Recognition, pp. 263-272, 2005.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวรวิทย์ อารีวิจิตร เกิดวันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2531 จังหวัดชลบุรี สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนชลราษฎรอำรุง และเข้าศึกษาต่อในระดับ มัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรม ศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรม คอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553