

วิธีการสังเคราะห์ทำจับที่มีคุณภาพสูงอย่างรวดเร็ว



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Fast Approach in Generating High Quality Grasps

Mr. Watcharapol Watcharawisetkul



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 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วิธีการสังเคราะห์ทำจับที่มีคุณภาพสูงอย่างรวดเร็ว

โดย

นายวัชรพล วัชรวิเศษกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัทที นิภานันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรณวิทย์ สุตแสง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัทที นิภานันท์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ ชินธเนศ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.รัชณี กุลยานนท์)

วัชรพล วัชรวิเศษกุล : วิธีการสังเคราะห์ท่าจับที่มีคุณภาพสูงอย่างรวดเร็ว (A Fast Approach in Generating High Quality Grasps) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. นัทธี นิภาพันธ์, 52 หน้า.

การจับเป็นความสามารถที่สำคัญสำหรับหุ่นยนต์ วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอขั้นตอนวิธีการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ที่สามารถสร้างท่าจับที่มีคุณภาพสูงเป็นจำนวนมากภายในเวลาอันสั้น โดยขั้นตอนวิธีนี้จะยอมเสียสละความสมบูรณ์ของเซตคำตอบเพื่อแลกกับความเร็วในการประมวลผล โดยการค้นหาเฉพาะท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันซึ่งเป็นท่าจับที่มีคุณภาพสูงอยู่แล้วเท่านั้น นอกจากนี้เรายังได้เสนอวิธีการเลือกจุดร่วมที่ทำให้การค้นหาท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันมีประสิทธิภาพสูงอีกด้วย ขั้นตอนวิธีที่เรานำเสนอใช้เพียงจุดสัมผัสของวัตถุและข้อมูลทิศตั้งฉากกับพื้นผิวสัมผัสเป็นข้อมูลนำเข้า ในวิทยานิพนธ์นี้เราได้ทำการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอสามารถสร้างท่าจับที่มีคุณภาพสูงได้เป็นจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น



ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

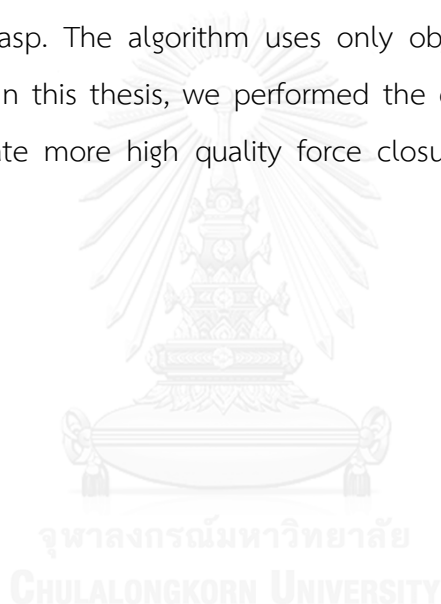
ปีการศึกษา 2557

5670373521 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS: ROBOTS / GRASPING / GRASP SYNTHESIS

WATCHARAPOL WATCHARAWISETKUL: A Fast Approach in Generating High Quality Grasps. ADVISOR: ASST. PROF. NATTEE NIPARNAN, Ph.D., 52 pp.

Grasping is an important task for robot. This thesis proposes a robotic grasp synthesis algorithm that can generate a large number of high quality grasps in short time. This algorithm sacrifices the completeness of the solution set to speedup the computation by identifying only concurrent grasps that are usually high quality grasps. We also propose approaches to select concurrent points that lead to high efficiency in finding concurrent grasp. The algorithm uses only object's contact points with its normal as an input. In this thesis, we performed the experiment to show that our algorithm can generate more high quality force closure grasp comparing to other methods.



Department: Computer Engineering Student's Signature

Field of Study: Computer Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ส่วนหนึ่งเป็นเพราะความช่วยเหลือที่ได้รับจากผู้อื่น ทั้งด้านการทำวิจัย และการใช้ชีวิต ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณบุคคลเหล่านั้นดังนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร.นัทที นิภานันท์ ที่คอยให้คำปรึกษาให้ความรู้เกี่ยวกับการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี และยังช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการเขียนบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์อีกด้วย

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร.อรรถวิทย์ สุดแสง, อ. ดร.ณัฐพงศ์ ชินธเนศ และ ดร.รัชณี กุลยานนท์ ที่กรุณาสละเวลามาตรวจสอบ และให้คำแนะนำ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณนายมานะ บวรผดุงกิตติ ที่คอยแลกเปลี่ยนความรู้ ความคิดเห็นเกี่ยวกับงานวิจัย ช่วยเขียนโปรแกรมที่ใช้ทำงานวิจัยบางส่วน และช่วยเขียนบทความวิจัยสำหรับตีพิมพ์

ขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการ Intelligent System Laboratory 2 (ISL2) ที่คอยพูดคุย ให้คำแนะนำต่างๆทั้งในเรื่องเกี่ยวกับงานวิจัย รวมไปถึงเรื่องอื่นๆ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ ๗๒ พรรษา

ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้อง ที่คอยสนับสนุน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้มีส่วนช่วยเหลืออีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูปภาพ.....	2
บทที่ 1 บทนำ	5
1.1. ที่มาและความสำคัญ.....	5
1.2. วัตถุประสงค์	6
1.3. การนำเสนอและลำดับเนื้อหาวิทยานิพนธ์	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1. แบบจำลองของนิ้ว (finger model)	7
2.2. แรง (force), แรงบิด (torque) และเวรนซ์ (wrench).....	8
2.3. สภาวะสมดุล (equilibrium) และคุณสมบัติปิดของแรง (force closure).....	9
2.3.1. จำนวนนิ้วที่เพียงพอต่อการจับวัตถุที่มีคุณสมบัติปิดของแรง	9
2.4. ทำจับที่ไปยังจุดเดียวกัน (concurrent grasp).....	10
2.4.1. เรขาคณิตของเส้นตรง (line geometry).....	10
2.4.2. เงื่อนไขสำหรับทำจับที่ไปยังจุดเดียวกัน	11
2.5. ตัวชี้วัดคุณภาพทำจับ (grasp quality measure).....	12
2.5.1. ปริภูมิเวรนซ์ของการจับ (grasp wrench space).....	12
2.5.2. ความสามารถในการต้านทานเวรนซ์ภายนอกในทิศทางใดๆ.....	12
2.6. การสังเคราะห์ทำจับของหุ่นยนต์.....	13

2.6.1. การสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ด้วยวิธีการเชิงวิเคราะห์.....	14
2.6.2. การสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ด้วยวิธีการเชิงประจักษ์.....	14
2.6.3. ขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงโดยการสุ่มตำแหน่งสัมผัส [18].	15
2.6.3.1. เงื่อนไขที่จำเป็นแต่ไม่เพียงพอสำหรับคุณสมบัติปิดของแรง [19], [20].....	16
2.6.4. ขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน [9].....	17
2.7. แกนกลางของวัตถุ (object's medial axis).....	17
2.7.1. ขั้นตอนวิธีประมาณแกนกลางของวัตถุ.....	18
บทที่ 3 การสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน (concurrent grasps).....	19
3.1. รหัสเทียมขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน.....	20
3.1.1. การค้นหาเวกเตอร์ 4 เวกเตอร์ที่แผ่ทั่วทางบวกริภูมิ 3 มิติ.....	21
3.2. การเลือกจุดร่วม.....	23
3.2.1. การเลือกจุดร่วมแบบสุ่มกระจายตัวสม่ำเสมอ.....	23
3.2.2. การเลือกจุดร่วมใกล้กับจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ.....	23
3.2.3. การเลือกจุดร่วมจากแกนกลางของวัตถุ.....	24
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	26
4.1. ระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	26
4.1.1. คอมพิวเตอร์ที่ใช้ทำการทดลอง.....	26
4.1.2. การเขียนโปรแกรม.....	26
4.1.3. ข้อมูลนำเข้า.....	28
4.2. การทดลองเปรียบเทียบการสังเคราะห์ท่าจับแบบต่างๆในเวลา 0.5 วินาที.....	28
4.2.1. ผลการทดลองแสดงจำนวนท่าจับที่สร้างได้ภายในเวลา 0.5 วินาที.....	29
4.2.2. ผลการทดลองแสดงคุณภาพของท่าจับที่สร้างได้จากวิธีต่างๆ.....	39
บทที่ 5 สรุปการวิจัยและแนวทางวิจัยในขั้นถัดไป.....	45

5.1. สรุปการวิจัย.....	45
5.2. แนวทางวิจัยในชั้นถัดไป.....	45
รายการอ้างอิง.....	47
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	52



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 จำนวนมิติของเวกเตอร์แรง, แรงบิด และเวรณซ์ บนวัตถุ 2 มิติ และวัตถุ 3 มิติ.....	8
ตารางที่ 2.2 จำนวนนิ้วที่เพียงพอต่อการจับวัตถุให้มีคุณสมบัติปิดของแรง	9
ตารางที่ 3.1 รหัสเทียบชั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน.....	20
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของจำนวนท่าจับที่แตกต่างกันที่สร้างได้ภายในเวลา 0.5 วินาที	34
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนของค่าเฉลี่ยของจำนวนท่าจับที่แตกต่างกันที่สร้างได้ภายในเวลา 0.5 วินาทีระหว่างวิธี MedialPoint กับวิธีต่างๆ	35



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 [1] แรงที่นิ้วกระทำกับวัตถุที่อยู่ในกรวยแรงเสียดทาน.....	8
รูปที่ 2.2 [8] รูปแบบของเส้นตรงที่ไม่อิสระเชิงเส้นต่อกัน 4 เส้น (a) อยู่บนระนาบเดียวกัน, (b) จุดร่วมเดียวกัน, (c) ทำให้เกิดกลุ่มของเส้นราบ 2 กลุ่มที่มีเส้นร่วมกันแต่อยู่คนละระนาบ และ (d) เรกกีวีส.....	10
รูปที่ 2.3 [8] ตัวอย่างท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรง (a) ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน, (b) ท่าจับแบบกลุ่มของเส้น และ (c) ท่าจับแบบเรกกีวีส.....	11
รูปที่ 2.4 [11] ตัวอย่างปริภูมิเวรณซ์ของการจับและความสามารถในการต้านทานเวรณซ์ภายนอกในทิศทางใดๆของการจับวัตถุ 2 มิติโดยใช้นิ้ว 3 นิ้ว (a) กำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์แต่ละนิ้วออกแรงได้ไม่เกิน 1 หน่วย และ (b) กำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์ออกแรงรวมกันได้ไม่เกิน 1 หน่วย.....	13
รูปที่ 2.5 (a) การประมาณวัตถุเป็นรูปทรงพื้นฐาน [25], (b) การแบ่งวัตถุออกเป็นรูปทรงพื้นฐานย่อยๆ [26], (c) ประมาณและแบ่งวัตถุออกเป็นกล่องขอบเขตที่มีปริมาตรน้อยที่สุด [27] และ (d) การประมาณวัตถุเป็นโครงกระดูก [28]–[30].....	15
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการเลือกจุดรวมแบบสุ่มกระจายตัวสม่ำเสมอ.....	23
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการเลือกจุดรวมใกล้กับจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ.....	24
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการเลือกจุดรวมจากแกนกลางของวัตถุ.....	25
รูปที่ 4.1 วัตถุที่ใช้ในการทดลอง.....	27
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ CatLying ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที.....	29
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ CatSitting ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที.....	30
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ CokePlasticSmallGrasp ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที.....	30
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Dog ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที.....	30
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Dwarf ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที.....	31
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Fish ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที.....	31
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Heart1 ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที.....	31

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Moon ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที	32
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Pony ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที.....	32
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Seal ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที.....	32
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Sprayflask ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที .	33
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Tortoise ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที.....	33
รูปที่ 4.14 วัตถุที่วิธี MedialPoint ทำงานได้ดีกว่าวิธี NearCM เป็นอย่างมาก	37
รูปที่ 4.15 วัตถุที่วิธี MedialPoint ทำงานได้ดีกว่าวิธี NearCM อยู่เล็กน้อย	37
รูปที่ 4.16 วัตถุที่วิธี MedialPoint ทำงานได้แย่กว่าวิธี NearCM อยู่เล็กน้อย	38
รูปที่ 4.17 รูปด้านหน้าและด้านข้างของวัตถุ Moon	38
รูปที่ 4.18 รูปแสดงจำนวนท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันของวัตถุ Moon ที่เกิดจากจุดร่วมต่างๆ โดยจุดสีน้ำเงิน, เขียว, เหลือง และแดง หมายถึงจุดร่วมที่ทำให้เกิดท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันเป็นจำนวนมากไปหาน้อยตามลำดับ	39
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ CatLying.....	40
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ CatSitting.....	40
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Dog.....	41
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Dwarf.....	41
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Fish.....	41
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Heart1	42
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Moon	42

รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Pony.....	42
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Seal.....	43
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Sprayflask.....	43
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Tortoise	43



บทที่ 1

บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันหุ่นยนต์เข้ามาช่วยเหลือมนุษย์ทำงานต่างๆมากมาย ไม่ว่าจะเป็นในโรงงานอุตสาหกรรม, ในครัวเรือน หรือการทำภารกิจที่มนุษย์ไม่สามารถทำได้ เช่น หุ่นยนต์กู้ภัย และหุ่นยนต์สำรวจอวกาศ เป็นต้น นอกจากนี้หุ่นยนต์ยังจะเพิ่มบทบาทมากขึ้นเรื่อยๆในอนาคต โดยเฉพาะหุ่นยนต์ที่สามารถทำงานอย่างอัตโนมัติ หุ่นยนต์ในปัจจุบันส่วนใหญ่ยังเป็นหุ่นยนต์ที่ทำงานเฉพาะทางอยู่ เช่นหุ่นยนต์ที่มีหน้าที่ไขน็อตก็จะมีส่วนมือเป็นไขควงไปเลย แต่สำหรับหุ่นยนต์บางชนิดก็มีความจำเป็นจะต้องทำงานได้หลายอย่าง เช่นหุ่นยนต์ผู้ช่วยภายในบ้าน เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานได้หลากหลายนั้น การจับวัตถุจึงเป็นความสามารถที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะจะสามารถทำให้หุ่นยนต์เลือกหยิบจับเครื่องมือต่างๆที่มีความเหมาะสมกับงานแต่ละอย่างได้ เช่นในการจะไขน็อต แทนที่จะมีมือเป็นไขควงก็เปลี่ยนเป็นการใช้มือจับไขควงเพื่อไขน็อตแทน แต่เนื่องจากความหลากหลาย และความซับซ้อนของปัญหาในการหาท่าจับของหุ่นยนต์ ปัจจุบันการจับวัตถุของหุ่นยนต์จึงยังทำได้ไม่ดีนัก และเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิจัยด้านหุ่นยนต์

เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหาการจับของหุ่นยนต์ เราสามารถแบ่งปัญหาการหาท่าจับของหุ่นยนต์ออกเป็นสามย่อยได้แก่ การสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ และการวางแผนการจับของหุ่นยนต์ โดยการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์นั้นจะเป็นการหาจุดจับบนวัตถุเท่านั้น ส่วนการวางแผนการจับของหุ่นยนต์จะเป็นการวางแผนว่าจะต้องควบคุมแขนและมือของหุ่นยนต์อย่างไร เพื่อให้นิ้วของหุ่นยนต์สัมผัสกับวัตถุที่จุดจับที่ได้จากการสังเคราะห์ท่าจับ ซึ่งสำหรับมือแต่ละชนิดก็จะมีวางแผนท่าจับที่แตกต่างกัน จะสังเกตได้ว่าขั้นตอนการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์นั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลลักษณะของมือหุ่นยนต์ก็ได้ และยังสามารถนำคำตอบไปใช้ในการวางแผนการจับของมือหุ่นยนต์ที่แตกต่างกันได้อีกด้วย

หากพิจารณาการจับวัตถุหนึ่งๆ ท่าจับที่เป็นไปได้ทั้งหมดนั้นมีความหลากหลายมาก ซึ่งก็มีทั้งท่าจับที่ดีและไม่ดี ท่าจับที่ดีนั้นจะต้องสามารถทนแรงและแรงบิดภายนอกในทิศทางต่างๆได้ นอกจากจะแบ่งท่าจับออกเป็นท่าจับที่ดีและท่าจับที่ไม่ดีแล้วนั้น ท่าจับที่ดีแต่ละท่าก็มีคุณภาพที่ไม่เท่ากัน ในการพิจารณาคุณภาพของท่าจับนั้นก็มีการพิจารณามากมาย ไม่ว่าจะเป็นความสามารถในการทนต่อแรงกระทำภายนอก, ความคงทนต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสัมผัส และความเข้ากันได้กับงานที่จะทำ เป็นต้น การจะเลือกท่าจับที่มีคุณภาพดีที่สุดเพียงท่าเดียวนั้นไม่เพียงพอ เพราะอาจจะ

เป็นท่าจับที่มีคุณภาพไม่ดีในเกณฑ์พิจารณาอื่น หรืออาจจะไม่สามารถนำไปวางแผนการจับได้ เช่นท่าจับที่สามารถทนทานต่อแรงภายนอกได้มากที่สุดนั้น กลไกของมือหุ่นยนต์อาจจะไม่สามารถจับในลักษณะนั้นได้ ในการสังเคราะห์ท่าจับนั้นจึงต้องการท่าจับที่มีคุณภาพในระดับหนึ่งหลายๆท่า เพื่อใช้ในการวางแผนการจับของหุ่นยนต์ และพิจารณาคูณภาพด้วยเกณฑ์พิจารณาอื่นต่อไป

การหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ในบางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องปฏิบัติด้วยความรวดเร็ว เช่นการรับสิ่งของที่มนุษย์ยื่นให้ หากมนุษย์ต้องรอนานจะทำให้เกิดความไม่พอใจได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับวัตถุที่หนักหรือมีอุณหภูมิสูง วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นไปที่การนำเสนอขั้นตอนวิธีสำหรับสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ที่สามารถสร้างท่าจับที่มีคุณภาพดีเป็นจำนวนมากได้ในเวลาอันสั้น

1.2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ การเสนอขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ที่สามารถสร้างท่าจับที่มีคุณภาพดีได้เป็นจำนวนมากภายในเวลาอันสั้น ในการออกแบบขั้นตอนวิธีจะมุ่งเน้นไปที่ 2 เรื่อง เรื่องแรกคือการเพิ่มประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี กล่าวคือขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจะต้องสามารถสร้างท่าจับได้เป็นจำนวนมากภายในเวลาอันสั้น และเรื่องที่สองคือท่าจับที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจะต้องมีคุณภาพท่าจับสูง โดยขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจะใช้เพียงแค่ตำแหน่งและทิศตั้งฉากกับพื้นผิวสัมผัสของจุดสัมผัสบนพื้นผิวของวัตถุเป็นข้อมูลนำเข้า และมีข้อมูลส่งออกเป็นเซตของท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรง

1.3. การนำเสนอและลำดับเนื้อหาวิทยานิพนธ์

เนื้อหาส่วนที่เหลือของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ถูกแบ่งออกเป็น 5 บทได้แก่ บทที่ 1 บทนำ ที่พูดถึงที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ และลำดับวิทยานิพนธ์ บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้อง โดยได้ทำการอธิบายตั้งแต่ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการจับของหุ่นยนต์ คุณสมบัติปิดของแรง ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน ตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับ การสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ และแกนกลางของวัตถุ ซึ่งเป็นความรู้เบื้องต้นที่นำไปต่อยอดภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ในบทที่ 3 การสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน ได้อธิบายแนวคิดและขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาของงานวิจัย โดยได้เสนอขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน รวมถึงวิธีการเลือกจุดร่วมและข้อดีข้อเสียต่างๆ ต่อมาในบทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง ได้อธิบายวิธีการทดลองเพื่อวัดผลทั้งในเชิงประสิทธิภาพ และคุณภาพของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีอื่นๆ รวมทั้งได้แสดงผลการทดลองในรูปแบบของกราฟและตาราง สุดท้ายในบทที่ 5 สรุปการวิจัยและแนวทางวิจัยในขั้นถัดไป ได้กล่าวถึงบทสรุปของการวิจัย และข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยในขั้นถัดไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

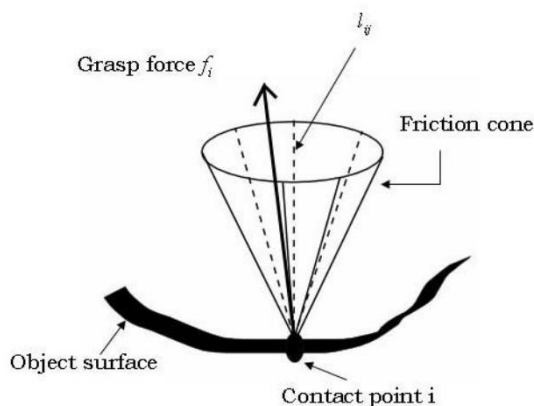
ในบทนี้ได้ทำการอธิบายทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยได้กล่าวถึงตั้งแต่ แบบจำลองนิ้ว เวนซ์ และคุณสมบัติปิดของแรง ซึ่งเป็นความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการจับของหุ่นยนต์ ในหัวข้อที่ 2.4 ได้อธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานสำคัญของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการอธิบายตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลองไว้ในหัวข้อที่ 2.5 ต่อมาหัวข้อที่ 2.6 ได้พูดถึงงานวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ และอธิบายขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ สุดท้ายในหัวข้อที่ 2.7 ได้อธิบายถึงการแสดงรูปร่างของวัตถุด้วยแกนกลางของวัตถุ ซึ่งมีส่วนช่วยในการพัฒนาขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่เราแนะนำ

2.1. แบบจำลองของนิ้ว (finger model)

เพื่อที่จะทำการคำนวณต่างๆเกี่ยวกับการจับของหุ่นยนต์จำเป็นต้องใช้แบบจำลองของสิ่งต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ หนึ่งในนั้นคือแบบจำลองของนิ้วที่ใช้จับวัตถุ โดยแบบจำลองของนิ้วสำหรับใช้คำนวณท่าจับของหุ่นยนต์นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ นิ้วแข็ง (hard finger) ซึ่งสามารถออกได้เพียงแรงที่จุดสัมผัสเท่านั้น ไม่สามารถออกแรงบิดได้ และนิ้วอ่อน (soft finger) ซึ่งสามารถออกได้ทั้งแรงและแรงบิดที่จุดสัมผัส นอกจากนี้ในงานวิจัยเกี่ยวกับการจับของหุ่นยนต์ส่วนใหญ่นิยมกำหนดให้นิ้วสามารถออกแรงกระทำกับวัตถุเป็นค่าศูนย์หรือบวกเท่านั้น กล่าวคือนิ้วไม่สามารถออกแรงดึงวัตถุได้ หรือเป็นนิ้วที่ไม่มีความเหนียวนั่นเอง

นอกจากนี้สำหรับนิ้วแข็งหากพิจารณาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของนิ้วกับวัตถุแล้วยังสามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภทคือ ผิวสัมผัสที่ไม่มีแรงเสียดทาน และผิวสัมผัสที่มีแรงเสียดทาน สำหรับผิวสัมผัสที่ไม่มีแรงเสียดทานนั้นนิ้วจะสามารถออกแรงกระทำกับวัตถุได้ในทิศทางตั้งฉากกับผิวสัมผัสเท่านั้น ไม่เช่นนั้นจะทำให้เกิดการไถลของนิ้ว ในขณะที่ผิวสัมผัสที่มีแรงเสียดทานนั้นทิศทางของแรงที่นิ้วสามารถกระทำกับวัตถุโดยไม่ทำให้นิ้วเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับวัตถุนั้นจะถูกกำหนดโดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน แบบจำลองแรงเสียดทานที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้ในงานด้านการจับของหุ่นยนต์นั้นอธิบายโดยใช้กฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) โดยแรงที่นิ้วกระทำกับวัตถุโดยไม่ทำให้นิ้วเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับวัตถุ (f) จะต้องอยู่ในกรวยแรงเสียดทาน (friction cone) ซึ่งเป็นกรวยที่มีจุดยอดอยู่ที่จุดสัมผัสและมีเส้นตั้งฉากกับผิวสัมผัสเป็นแกนหมุน โดยมีครึ่งมุม (half angle) $\theta =$

$\tan^{-1} \mu$ โดยที่ μ คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของนิ้วและวัตถุ รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างแบบจำลองนิ้วแข็งมีแรงเสียดทาน



รูปที่ 2.1 [1] แรงที่นิ้วกระทำกับวัตถุที่อยู่ภายในกรวยแรงเสียดทาน

2.2. แรง (force), แรงบิด (torque) และเวรนซ์ (wrench)

ในการจับวัตถุเป็นการออกแรงจากนิ้วไปที่วัตถุ ซึ่งเมื่อนิ้วออกแรงไปที่วัตถุแล้วนอกจากจะเป็นการพยายามทำให้วัตถุเคลื่อนที่แล้ว ยังเป็นการพยายามทำให้วัตถุหมุนอีกด้วย ซึ่งเราสามารถวิเคราะห์การหมุนได้ด้วยแรงบิดหรือกล่าวคือเมื่อนิ้วออกแรงไปที่วัตถุที่จุดสัมผัสจะทำให้เกิดแรงบิดขึ้นด้วย โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นนี้มีค่า $\tau = r \times f$ เมื่อ τ คือแรงบิด, r คือตำแหน่งจุดสัมผัสเทียบกับจุดกำเนิด และ f คือแรงที่กระทำที่จุดสัมผัส ในงานวิจัยการจับของหุ่นยนต์แรงและแรงบิดมักถูกใช้ในการวิเคราะห์ด้วยกันเสมอ จึงนิยามแรงและแรงบิดรวมเข้าด้วยกันเรียกว่าเวรนซ์โดยเวรนซ์จะมีค่า $w = [f^T, \tau^T]^T$ เมื่อ w คือเวรนซ์, f คือแรง และ τ คือแรงบิด โดยบนวัตถุ 2 มิติ แรงจะเป็นเวกเตอร์ 2 มิติ แรงบิดจะเป็นเวกเตอร์ 1 มิติ และเวรนซ์จะเป็นเวกเตอร์ 3 มิติ ส่วนบนวัตถุ 3 มิตินั้น แรงและแรงบิดจะเป็นเวกเตอร์ 3 มิติ ทำให้เวรนซ์เป็นเวกเตอร์ 6 มิติ

ตารางที่ 2.1 จำนวนมิติของเวกเตอร์แรง, แรงบิด และเวรนซ์ บนวัตถุ 2 มิติ และวัตถุ 3 มิติ

	วัตถุ 2 มิติ	วัตถุ 3 มิติ
แรง (force)	2 มิติ	3 มิติ
แรงบิด (torque)	1 มิติ	3 มิติ
เวรนซ์ (wrench)	3 มิติ	6 มิติ

2.3. สภาวะสมดุล (equilibrium) และคุณสมบัติปิดของแรง (force closure)

การจับของหุ่นยนต์นั้นต้องการให้วัตถุอยู่นิ่งเมื่อเทียบกับมือของหุ่นยนต์หรือก็คือต้องการให้วัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลนั่นเอง โดยวัตถุจะอยู่ในสภาวะสมดุลเมื่อแรงและแรงบิดลัพธ์ที่กระทำกับวัตถุมีค่าเป็นศูนย์ หรือหากพิจารณาด้วยเวรณซ์ก็คือเวรณซ์ลัพธ์ที่กระทำกับวัตถุมีค่าเท่ากับศูนย์นั่นเอง แต่ในบางครั้งท่าจับที่ทำให้วัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลเพียงอย่างเดียวนั้นอาจไม่เพียงพอ เพราะท่าจับที่ดีควรที่จะสามารถออกแรงต้านทานแรงและแรงลัพธ์ที่กระทำจากภายนอกในทิศทางใดๆได้ด้วย เมื่อกำหนดให้นิ้วสามารถออกแรงได้ไม่จำกัด โดยคุณสมบัตินี้เรียกว่าคุณสมบัติปิดของแรง

ทฤษฎีบทที่ 1 [2] เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับคุณสมบัติปิดของแรงนั้นคือ มีผลรวมบวกเชิงเส้นของเวรณซ์ตั้งต้นที่มีค่าเท่ากับศูนย์ และเวรณซ์ตั้งต้นแผ่ทั่วปริภูมิเวรณซ์

ทฤษฎีบทที่ 2 [3] ระบบของเวรณซ์ w_1, w_2, \dots, w_n จะมีคุณสมบัติปิดของแรงก็ต่อเมื่อจุดกำเนิดของปริภูมิเวรณซ์อยู่ในภายในของคอนเวกซ์ฮัลของเวรณซ์ w_1, w_2, \dots, w_n

งานวิจัยที่เกี่ยวกับคุณสมบัติปิดได้ถูกรวบรวมและสรุปไว้ใน [4], [5] และขั้นตอนวิธีสำหรับทดสอบคุณสมบัติปิดของแรงที่มีประสิทธิภาพสูงได้ถูกนำเสนอไว้ใน [6]

2.3.1. จำนวนนิ้วที่เพียงพอต่อการจับวัตถุที่มีคุณสมบัติปิดของแรง

เพื่อสร้างท่าจับให้มีคุณสมบัติปิดของแรงนั้น ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับจำนวนนิ้วที่เพียงพอต่อการจับวัตถุที่มีคุณสมบัติปิดของแรง โดย X. Markenscoff และคณะ [7] ได้พิสูจน์ไว้ว่าสำหรับการจับวัตถุโดยใช้นิ้วแข็ง ถ้าไม่คำนึงถึงแรงเสียดทานการใช้ 4 นิ้วและ 7 นิ้วนั้นเพียงพอแล้วในการจับวัตถุที่ไม่สมมาตรการหมุนใน 2 มิติ และ 3 มิติตามลำดับให้เกิดคุณสมบัติปิดของแรง และหากพิจารณาถึงแรงเสียดทานด้วยนั้น การใช้ 3 นิ้วและ 4 นิ้วนั้นเพียงพอต่อการจับวัตถุที่ไม่สมมาตรการหมุนใน 2 มิติ และ 3 มิติตามลำดับให้เกิดคุณสมบัติปิดของแรง ซึ่งงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาการจับโดยนิ้วแข็งแบบมีแรงเสียดทานบนวัตถุ 3 มิติ จึงจะสนใจเฉพาะท่าจับแบบ 4 นิ้วเท่านั้น

ตารางที่ 2.2 จำนวนนิ้วที่เพียงพอต่อการจับวัตถุให้มีคุณสมบัติปิดของแรง

	วัตถุ 2 มิติ	วัตถุ 3 มิติ
นิ้วแข็งแบบไม่มีแรงเสียดทาน	4	7
นิ้วแข็งแบบมีแรงเสียดทาน	3	4

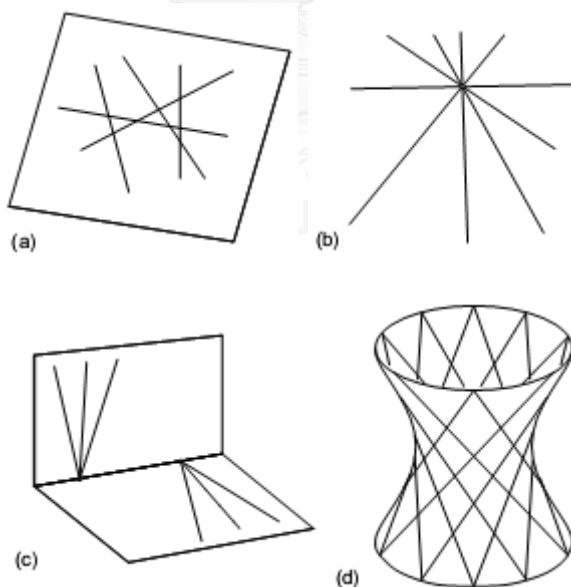
2.4. ทำจับที่ไปยังจุดเดียวกัน (concurrent grasp)

สำหรับการจับแบบ 4 นิ้วนั้น นอกจากทำจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงแล้ว ยังมีทำจับแบบพิเศษอีกอย่างหนึ่งนั่นคือทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันซึ่งเป็นเซตย่อยของทำจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรง โดยทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันจะมีลักษณะพิเศษคือ กรวยแรงเสียดทานสองด้านของจุดจับทั้ง 4 จุดจะซ้อนทับกันที่จุดใดจุดหนึ่ง เรียกจุดที่ซ้อนทับกันนี้ว่าจุดร่วม (concurrent point) นอกจากนี้ทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันมักจะเป็นทำจับที่มีคุณภาพสูงอีกด้วย ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสนใจการสังเคราะห์ทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันเป็นหลัก เพื่อให้เข้าใจในเงื่อนไขของทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันเราต้องทำความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับเรขาคณิตของเส้นตรงกันก่อน

2.4.1. เรขาคณิตของเส้นตรง (line geometry)

ในการพิจารณาเวรณซ์เราสามารถมองเวรณซ์เป็นเส้นของการกระทำ (line of action) และสามารถเขียนเส้นของการกระทำนี้ให้อยู่ในรูปของพิกัด Plücker ของเส้นได้

ทฤษฎีบทที่ 3 [8] เส้นตรงที่ไม่เอ็สระเชิงเส้นต่อกัน 4 เส้นจะ อยู่บนระนาบเดียวกัน, มีจุดร่วมเดียวกัน (concurrent line), ทำให้เกิดกลุ่มของเส้นราบ (flat pencil of line) 2 กลุ่มที่มีเส้นร่วมกันแต่อยู่คนละระนาบ หรือทำให้เกิดเรกิวลัส (regulus)



รูปที่ 2.2 [8] รูปแบบของเส้นตรงที่ไม่เอ็สระเชิงเส้นต่อกัน 4 เส้น (a) อยู่บนระนาบเดียวกัน, (b) จุดร่วมเดียวกัน, (c) ทำให้เกิดกลุ่มของเส้นราบ 2 กลุ่มที่มีเส้นร่วมกันแต่อยู่คนละระนาบ และ (d) เรกิวลัส

2.4.2. เงื่อนไขสำหรับท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน

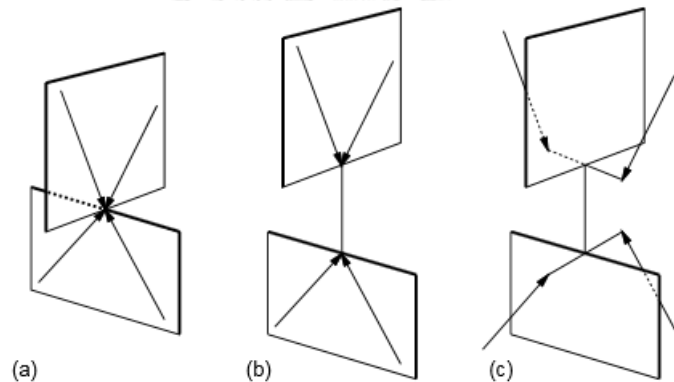
จากทฤษฎีบทที่ 3 เราสามารถแบ่งเวรณซ์ที่เกิดจากการจับออกเป็น 4 รูปแบบ ซึ่งจะมีเพียงแค่ 3 รูปแบบเท่านั้นที่จะทำให้เกิดการจับที่อยู่ในสภาวะสมดุลได้

ทฤษฎีบทที่ 4 [8] เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับจุดที่ไม่ได้อยู่บนระนาบเดียวกัน 4 จุดที่ทำให้เกิดการจับที่อยู่ในสภาวะสมดุลด้วยแรงที่จุดสัมผัส 4 แรงที่ไม่เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

(P1) มีเส้นที่อยู่ในกรวยแรงเสียดทานสองด้าน 4 เส้นที่ ตัดกันที่จุดเดียว, ทำให้เกิดกลุ่มของเส้นราบ 2 กลุ่มที่มีเส้นร่วมกันแต่อยู่คนละระนาบ หรือทำให้เกิดเรกิวลัส และ

(P2) เวกเตอร์ที่ขนานกับเส้นเหล่านี้ และมีทิศทางชี้เข้าหาวัตถุแผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^3

โดยเราสามารถแบ่งท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน (concurrent grasps), ท่าจับแบบกลุ่มของเส้น (pencil grasps) และท่าจับแบบเรกิวลัส (regulus grasps)



รูปที่ 2.3 [8] ตัวอย่างท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรง (a) ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน, (b) ท่าจับแบบกลุ่มของเส้น และ (c) ท่าจับแบบเรกิวลัส

ต่อมาคุณ Niparnan และคณะ [9] ได้ประยุกต์ทฤษฎีบทที่ 4 โดยสนใจเฉพาะท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน

ทฤษฎีบทที่ 5 [9] เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับจุดที่ไม่ได้อยู่บนระนาบเดียวกัน 4 จุดที่ทำให้เกิดการจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรง นั่นคือ

(P1) มีเส้นที่อยู่ในกรวยแรงเสียดทานสองด้าน 4 เส้นที่ตัดกันที่จุดเดียว และ

(P2) เวกเตอร์ที่ขนานกับเส้นเหล่านี้ และมีทิศทางชี้เข้าหาวัตถุแผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^3

เราจะใช้ทฤษฎีบทที่ 5 เป็นเงื่อนไขหลักของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.5. ตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับ (grasp quality measure)

คุณสมบัติปิดของแรงนั้นเป็นการทดสอบเชิงคุณภาพที่ให้คำตอบได้แค่ 2 คำตอบเท่านั้น คือมีหรือไม่มีคุณสมบัติปิดของแรง ทำให้มีงานวิจัยที่คิดค้นการทดสอบเชิงปริมาณหรืออาจเรียกว่าตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับ (grasp quality measure) ซึ่งหนึ่งในตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับที่ได้รับความนิยมอย่างมากนั้นคือความสามารถในการต้านทานเวรชันภายนอกในทิศทางใดๆที่ถูกเสนอโดย [10]

นอกจากนี้แล้วยังมีตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับอื่นๆอีกมากมายซึ่งได้ถูกรวบรวมและสรุปไว้ใน [11]

2.5.1. ปริภูมิเวรชันของการจับ (grasp wrench space)

ปริภูมิเวรชันของการจับคือปริภูมิของเวรชันทั้งหมดที่ท่าจับนั้นๆสร้างได้เมื่อกำหนดขนาดสูงสุดของแรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสที่นิ้วสามารถออกได้ โดยวิธีที่นิยมใช้มีอยู่ 2 วิธีได้แก่

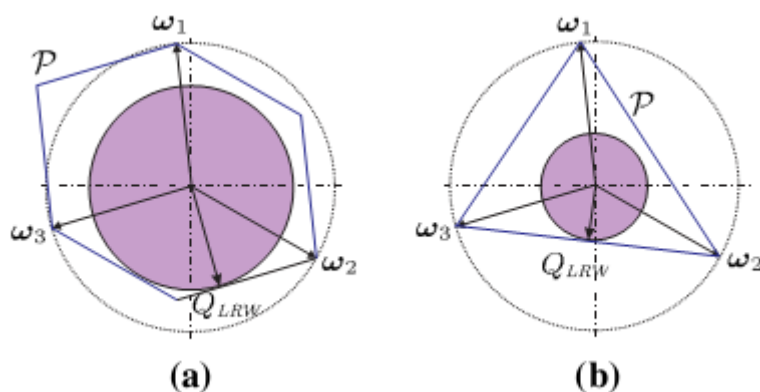
- กำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์ออกแรงรวมกันได้ไม่เกิน 1 หน่วย ด้วยวิธีนี้ปริภูมิเวรชันของการจับจะเกิดจากคอนเวกซ์ฮัลล์ของเวรชันที่แต่ละนิ้วสามารถออกได้โดยแรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสของแต่ละนิ้วรวมกันมีค่าไม่เกิน 1 หน่วย วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้การคำนวณน้อย และสอดคล้องกับมือหุ่นยนต์ที่แต่ละนิ้วใช้แหล่งกำเนิดแรงตัวเดียวกัน
- กำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์แต่ละนิ้วออกแรงได้ไม่เกิน 1 หน่วย ด้วยวิธีนี้ปริภูมิเวรชันของการจับจะเกิดจากผลรวมมิงคอฟสกี (Minkowski sum) ของเวรชันที่แต่ละนิ้วสามารถออกได้โดยแรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสของแต่ละนิ้วมีค่าไม่เกิน 1 หน่วย วิธีนี้มีความสอดคล้องกับมือหุ่นยนต์ที่แต่ละนิ้วมีแหล่งกำเนิดแรงเป็นของตัวเอง และใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า การกำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์ออกแรงรวมกันได้ไม่เกิน 1 หน่วย

2.5.2. ความสามารถในการต้านทานเวรชันภายนอกในทิศทางใดๆ

ความสามารถในการต้านทานเวรชันภายนอกในทิศทางใดๆ [10] เป็นตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยเป็นขนาดของเวรชันที่น้อยที่สุดที่ท่าจับไม่สามารถออกแรงต้านได้ และทำให้การจับเสียสมดุล ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$d = \min_{w \in \partial(GWS)} \|w\|$$

โดยที่ $\partial(GWS)$ คือขอบของปริภูมิเวรชันของการจับ



รูปที่ 2.4 [11] ตัวอย่างปริภูมิเวรณซ์ของการจับและความสามารถในการต้านทานเวรณซ์ภายนอกในทิศทางใดๆของการจับวัตถุ 2 มิติโดยใช้นิ้ว 3 นิ้ว (a) กำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์แต่ละนิ้วออกแรงได้ไม่เกิน 1 หน่วย และ (b) กำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์ออกแรงรวมกันได้ไม่เกิน 1 หน่วย

A. Miller และ P. K. Allen [12] ได้เสนอวิธีคำนวณตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับนี้โดยใช้ขั้นตอนวิธี Quickhull [13] เพื่อหาปริภูมิเวรณซ์ของการจับซึ่งคือคอนเวกซ์ฮัลของเวรณซ์ตั้งต้นที่เกิดจากการจับวัตถุโดยหุ่นยนต์ โดยขั้นตอนวิธี Quickhull จะให้ผลลัพธ์เป็นเซตของระนาบเกิน (hyperplane) โดยอธิบายแต่ละระนาบเกินด้วยเวกเตอร์ตั้งฉากกับระนาบเกิน และระยะห่างระหว่างจุดกำเนิดและระนาบเกิน ซึ่งสามารถหาค่าความสามารถในการต้านทานเวรณซ์ภายนอกในทิศทางใดๆได้จากระยะห่างระหว่างจุดกำเนิดและระนาบเกินที่อยู่ใกล้จุดกำเนิดที่สุด

Y. Zheng และคณะ [14], [15] ได้เสนอขั้นตอนวิธีคำนวณความสามารถในการต้านทานเวรณซ์ภายนอกในทิศทางใดๆโดยใช้ขั้นตอนวิธีการยิงเส้นรัศมีซึ่งสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว

2.6. การสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์อยู่มากมาย ได้มีการรวบรวมงานวิจัยการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์และทำการสรุปไว้ใน [16] โดยแบ่งการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่วิธีการเชิงวิเคราะห์ (Analytical approaches) และวิธีการเชิงประจักษ์ (Empirical approaches) สำหรับวิธีการเชิงวิเคราะห์นั้นจะระบุท่าจับจากการพิจารณาตำแหน่งจุดจับบนวัตถุและรูปร่างของมือหุ่นยนต์เพื่อค้นหาท่าจับที่เหมาะสมผ่านสมการจลนศาสตร์และพลวัต ส่วนวิธีการเชิงประจักษ์นั้นจะเป็นการเลียนแบบการจับของมนุษย์ซึ่งจะเลือกท่าจับที่เหมาะสมกับงานและรูปร่างของวัตถุโดยส่วนใหญ่จะอาศัยวิธีการจำแนกและการเรียนรู้จากข้อมูลที่มีอยู่ก่อนแล้วที่อาจจะมาจากการสังเกตการจับของมนุษย์, การทดลองในระบบจำลอง หรือการทดลองจับจริงของหุ่นยนต์ สำหรับการสังเคราะห์ท่าจับเชิงประจักษ์นั้นได้มีการรวบรวมงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องเอาไว้ใน [17]

2.6.1. การสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ด้วยวิธีการเชิงวิเคราะห์

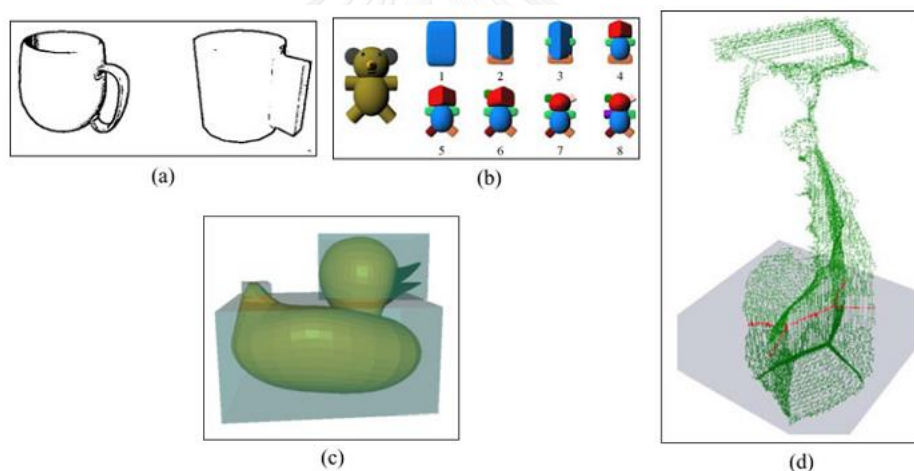
ด้วยวิธีการเชิงวิเคราะห์การค้นหาท่าจับที่เหมาะสมจากท่าจับที่เป็นไปได้ทั้งหมดนั้นเป็นปัญหาที่ซับซ้อนเพราะท่าจับที่เป็นไปได้ทั้งหมดนั้นมีความหลากหลายมาก อย่างไรก็ตาม C. Borst และคณะ [18] ได้แสดงให้เห็นว่าด้วยการสุ่มท่าจับออกมาแล้วคัดกรองด้วยฮิวริสติกง่ายๆก็ทำให้การค้นหาท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงทำได้อย่างรวดเร็วแล้ว ต่อมา N. Niparnan และคณะ [19], [20] ได้ปรับปรุงวิธีการใน [18] โดยเสนอเงื่อนไขที่จำเป็นแต่ไม่เพียงพอสำหรับคุณสมบัติปิดของแรงคือท่าจับที่จะมีคุณสมบัติปิดของแรงนั้นแรงที่กระทำโดยนิ้วที่จุดสัมผัสจำเป็นต้องแผ่ทั่วปริภูมิแรง และแรงบิดที่เกิดจากการออกแรงของนิ้วที่จุดสัมผัสจำเป็นต้องแผ่ทั่วปริภูมิแรงบิด ซึ่งเงื่อนไขนี้สามารถใช้ในการคัดกรองท่าจับที่ไม่มีคุณสมบัติปิดของแรงใดๆออกไปก่อนที่จะนำไปทดสอบคุณสมบัติปิดของแรงซึ่งใช้เวลาประมวลผลนาน ทำให้การทำงานโดยรวมรวดเร็วขึ้นอย่างมาก นอกจากนี้ S. El-Khoury และ A. Sahbani [1], [21] ได้เสนอเงื่อนไขที่เพียงพอแต่ไม่จำเป็นสำหรับคุณสมบัติปิดของแรงโดยอาศัยความจริงที่ว่าเวรณซ์ที่เกิดจากจุดจับ 3 จุดใดๆที่ไม่ได้เรียงกันในแนวเส้นตรงจะทำให้เกิดส่วนประกอบหลัก (basis) ของปริภูมิเวรณซ์ ด้วยเงื่อนไขนี้สามารถนำไปใช้หาท่าจับของหุ่นยนต์ที่มีคุณสมบัติปิดของแรงได้อย่างรวดเร็วแล้กว่าการสูญเสียความสมบูรณ์ของคำตอบ กล่าวคือด้วยเงื่อนไขนี้จะสามารถหาท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงได้เพียงบางท่าเท่านั้น

เมื่อพิจารณาการจับวัตถุใน 3 มิติด้วยนิ้ว 4 นิ้วที่ไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกันโดยใช้เรขาคณิตของเส้นตรงจะสามารถแบ่งท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน (concurrent grasps), ท่าจับแบบกลุ่มของเส้น (pencil grasps) และท่าจับแบบเรกิวลัส (regulus grasps) J. Ponce และคณะ [8] ได้เสนอเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับท่าจับ 4 นิ้วที่ไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกันที่มีคุณสมบัติสมมูล และได้เสนอขั้นตอนวิธีในการคำนวณหาท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันไว้ด้วย N. Niparnan และ A. Sudsang [9] ได้เสนอขั้นตอนวิธีแบบสุ่มในการคำนวณหาท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันโดยการเลือกจุดร่วม (concurrent point) แล้วจึงใช้เงื่อนไขบางส่วนจาก [8] เพื่อหาท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันสำหรับจุดร่วมที่เลือกมา C. Sangkhavijit และคณะ [22] ได้พัฒนาขั้นตอนวิธีใน [9] ให้ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการคำนวณหาท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน โดยใช้จุดสัมผัสเป็นโครโมโซม

2.6.2. การสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ด้วยวิธีการเชิงประจักษ์

สำหรับวิธีการเชิงประจักษ์นั้นมักจะสร้างท่าจับของหุ่นยนต์โดยสนใจรูปร่างของวัตถุเป็นหลัก และมักใช้โครงสร้างของมือหุ่นยนต์มาประกอบการพิจารณาด้วยโดยการทดลองจับวัตถุด้วยมือของหุ่นยนต์ในระบบจำลองการจับของหุ่นยนต์ [23], [24] จึงนิยมอธิบายลักษณะของท่าจับด้วยการจัด

วางของมือหุ่นยนต์แทนที่จะเป็นตำแหน่งของจุดสัมผัส โดยมีทั้งการใช้การแก้ปัญหาแบบศึกษาสำนึก (heuristic approach) การเรียนรู้จากการจับของมนุษย์, การเรียนรู้โดยการแบ่งประเภทชุดข้อมูลฝึกสอน และการเรียนรู้จากการลองผิดลองถูก A. T. Miller และคณะ [25] ได้เสนอการวางแผนท่าจับของหุ่นยนต์โดยการประมาณโครงสร้างของวัตถุเป็นรูปทรงพื้นฐานเช่น ทรงกลม, กรวย, ทรงกระบอก หรือกล่อง การแบ่งวัตถุออกเป็นรูปทรงพื้นฐานย่อยๆเพื่อใช้วางแผนท่าจับของหุ่นยนต์ได้ถูกเสนอไว้ใน [26] ต่อมา K. Huebner [27] ได้เสนอการวางแผนท่าจับของหุ่นยนต์โดยประมาณและแบ่งวัตถุออกเป็นกล่องขอบเขตที่มีปริมาตรน้อยที่สุด ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้พลังในการประมวลผลน้อย M. Przybylski [28]–[30] ได้เสนอการวางแผนท่าจับของหุ่นยนต์ด้วยการประมาณวัตถุเป็นโครงกระดูกที่ยังคงมีรายละเอียดที่สำคัญของวัตถุอยู่ นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการวางแผนท่าจับโดยมนุษย์แล้วพบว่ามนุษย์มักเลือกท่าจับโดยพิจารณาถึงแกนमुखสำคัญ (principal axis) ของวัตถุ [31], [32] ต่อมา E. Rombokas และคณะ [33] ได้เสนอการนำแกนमुखสำคัญของวัตถุไปพิจารณาในการวางแผนท่าจับของหุ่นยนต์



รูปที่ 2.5 (a) การประมาณวัตถุเป็นรูปทรงพื้นฐาน [25], (b) การแบ่งวัตถุออกเป็นรูปทรงพื้นฐานย่อยๆ [26], (c) ประมาณและแบ่งวัตถุออกเป็นกล่องขอบเขตที่มีปริมาตรน้อยที่สุด [27] และ (d) การประมาณวัตถุเป็นโครงกระดูก [28]–[30]

2.6.3. ขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงโดยการสุ่มตำแหน่งสัมผัส [18]

วิธีสังเคราะห์ท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงที่เรียบง่ายที่สุดคือการสร้างท่าจับขึ้นมาแล้วทำการทดสอบคุณสมบัติปิดของแรง (generate and test) โดยวิธีการสร้างท่าจับขึ้นมาวิธีหนึ่งก็คือ การสุ่มตำแหน่งสัมผัสขึ้นมาตามจำนวนนิ้วที่จะใช้จับ เช่น สุ่มตำแหน่งสัมผัสมา 4 จุด เพื่อให้เป็นท่าจับแบบ 4 นิ้ว เป็นต้น แต่วิธีการสร้างแล้วทดสอบแบบนี้ทำงานได้ช้า เนื่องจากการทดสอบคุณสมบัติปิดของ

แรงนั้นใช้เวลาในการคำนวณสูง คุณ Borst และคณะ จึงได้เสนอให้ทำการกรองท่าจับที่ไม่มีคุณสมบัติปิดของแรงออกไปด้วยเงื่อนไขง่ายๆ ก่อนที่จะนำท่าจับที่ผ่านเงื่อนไขง่าย ๆ นี้ไปทดสอบคุณสมบัติปิดของแรงซึ่งใช้เวลาคำนวณนานกว่ามาก โดยเงื่อนไขที่ใช้เป็นตัวกรองจะต้องเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับคุณสมบัติปิดของแรง กล่าวคือท่าจับที่ไม่ผ่านเงื่อนไขที่ใช้เป็นตัวกรองก็จะต้องไม่มีคุณสมบัติปิดของแรงแน่ๆ นอกจากนี้เพื่อให้การสังเคราะห์ท่าจับมีประสิทธิภาพ เงื่อนไขที่ใช้เป็นตัวกรองจะต้องสามารถทำการทดสอบได้อย่างรวดเร็วด้วย

เงื่อนไขที่คุณ Borst และคณะ เสนอให้ใช้เป็นตัวกรองคือ ท่าจับจะต้องสามารถออกแรงต้านทานแรงในทิศทางที่กำหนดไว้ทิศทางหนึ่ง ซึ่งเงื่อนไขนี้สามารถทำการตรวจสอบได้อย่างรวดเร็ว และเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับคุณสมบัติปิดของแรง เนื่องจากท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงจะต้องสามารถออกแรงต้านทานแรงและแรงบิดภายนอกในทุกๆทิศทางได้อยู่แล้ว จากการเพิ่มเงื่อนไขที่ใช้เป็นตัวกรองซึ่งตรวจสอบได้อย่างรวดเร็วนี้ทำให้การสังเคราะห์ท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงโดยวิธีการสร้างแล้วทดสอบสามารถทำงานได้เร็วขึ้นเป็นอย่างมาก

2.6.3.1. เงื่อนไขที่จำเป็นแต่ไม่เพียงพอสำหรับคุณสมบัติปิดของแรง [19], [20]

ต่อมาคุณ Niparnan และคณะได้ทำการเสนอเงื่อนไขที่จำเป็นแต่ไม่เพียงพอสำหรับคุณสมบัติปิดของแรงซึ่งสามารถใช้เป็นตัวกรองท่าจับที่ไม่มีคุณสมบัติปิดของแรงส่วนใหญ่ออกไปก่อนได้ โดยสามารถทำการทดสอบเงื่อนไขนี้ได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย

ทฤษฎีบทที่ 6 [20] เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับเซตของเวกเตอร์ที่แผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^n คือภาพฉายของเวกเตอร์เหล่านั้นบนปริภูมิย่อย $\mathbb{R}^{k < n}$ จะต้องแผ่ทั่วทางบวกปริภูมิย่อยนั้นๆด้วย

จากทฤษฎีบทที่ 1 ซึ่งกล่าวได้ว่าเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับคุณสมบัติปิดของแรงคือเวรณซ์ตั้งต้นแผ่ทั่วทางบวกปริภูมิเวรณซ์ ดังนั้นจากทฤษฎีบทที่ 6 จะได้ว่าเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับคุณสมบัติปิดของแรงคือภาพฉายของเวรณซ์บนปริภูมิย่อยของปริภูมิเวรณซ์ จะต้องแผ่ทั่วปริภูมิย่อยนั้นๆ เนื่องจากเวรณซ์เกิดจากการรวมกันระหว่างแรงและแรงบิด ปริภูมิแรงและปริภูมิแรงบิดจึงเป็นปริภูมิย่อยของปริภูมิเวรณซ์ที่น่าสนใจ และถูกใช้ป็นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับคุณสมบัติปิดของแรง คือภาพฉายของเวรณซ์ตั้งต้นบนปริภูมิแรงจะต้องแผ่ทั่วทางบวกปริภูมิแรง และภาพฉายของเวรณซ์ตั้งต้นบนปริภูมิแรงบิดจะต้องแผ่ทั่วทางบวกปริภูมิแรงบิด นอกจากนี้คุณ Niparnan และคณะยังได้เสนอวิธีการทดสอบการแผ่ทั่วทางบวกของเวรณซ์ตั้งต้นบนปริภูมิแรงและปริภูมิแรงบิด ที่สามารถทดสอบได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย

2.6.4. ขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ทำจับที่ไปยังจุดเดียวกัน [9]

คุณ Niparnan และคุณ Sudsang [9] ได้เสนอขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันอย่างรวดเร็ว โดยมีจุดบนพื้นผิวของวัตถุเป็นข้อมูลนำเข้าจุดสัมผัส และใช้ทฤษฎีบทที่ 5 เป็นเงื่อนไขสำหรับทำจับที่ไปยังจุดเดียวกัน แนวคิดพื้นฐานคือจากเงื่อนไข P1 ในทฤษฎีบทที่ 5 ซึ่งกล่าวได้ว่าจุดสัมผัส 4 จุดที่สามารถสร้างทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันได้นั้น จำเป็นจะต้องมีกรวยแรงเสียดทานสองด้านซ้อนทับกันที่จุดใดจุดหนึ่ง ซึ่งเงื่อนไขนี้สามารถใช้ตัดจุดสัมผัส 4 จุดที่ไม่ผ่านเงื่อนไขออกไปได้มากมาย แต่อย่างไรก็ดีการทดสอบการซ้อนทับกันของกรวยนั้นใช้เวลาในการคำนวณเยอะมาก จึงได้ทำการค้นหาเป็นลำดับขั้น โดยแบ่งปริภูมิสามมิติของวัตถุออกเป็นลูกบาศก์ย่อยๆ ขนาดเท่ากัน สำหรับลูกบาศก์แต่ละก้อนจะหาทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันโดยสนใจเฉพาะจุดสัมผัสที่มีเส้นตรงกึ่งกลางกรวยแรงเสียดทานลากผ่านลูกบาศก์ก้อนนั้นๆ เท่านั้น โดยลูกบาศก์ที่มีจุดสัมผัสที่สนใจตั้งแต่ 4 จุดขึ้นไป และเส้นตั้งฉากพื้นผิวของจุดสัมผัสที่สนใจเหล่านี้แผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^3 จะทำการซูมจุดภายในลูกบาศก์นั้นๆ ขึ้นมาเพื่อใช้เป็นจุดร่วม (concurrent point) จากนั้นจึงค้นหาทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันได้จากการหาจุดสัมผัส 4 จุดจากจุดสัมผัสที่สนใจที่ผ่านเงื่อนไข 2 ข้อได้แก่ จุดร่วมที่ซูมขึ้นมานั้นจะต้องอยู่ภายในกรวยแรงเสียดทานสองด้านของจุดสัมผัสทั้ง 4 จุด (เงื่อนไขนี้ทำให้ผ่านเงื่อนไข P1 ในทฤษฎีบทที่ 5) และเวกเตอร์ที่ขนานกับเส้นตรงกึ่งกลางกรวยแรงเสียดทานของจุดสัมผัสทั้ง 4 จุดที่มีทิศทางชี้เข้าหาวัตถุแผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^3 (เงื่อนไขนี้ทำให้ผ่านเงื่อนไข P2 ในทฤษฎีบทที่ 5) เมื่อได้ทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันทั้งหมดจากจุดร่วมที่ซูมขึ้นมาแล้ว ก็ทำการซูมจุดร่วมใหม่ขึ้นมาอีกแล้วทำซ้ำจนครบตามจำนวนจุดร่วมต่อหนึ่งลูกบาศก์ที่กำหนดไว้ จากนั้นจึงทำการแบ่งลูกบาศก์ออกเป็นลูกบาศก์ย่อยๆ ไปอีก แล้วทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนถึงความละเอียดที่กำหนด

2.7. แกนกลางของวัตถุ (object's medial axis)

เราสามารถอธิบายลักษณะรูปร่างของวัตถุในมิติที่ต่ำลงได้โดยใช้แกนกลางของวัตถุซึ่งถูกเสนอโดยคุณ Blum [34] ซึ่งแกนกลางของวัตถุนี้เองที่เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

แกนกลางของวัตถุคือเซตของจุดกลาง (medial point) ซึ่งเป็นจุดที่มีจุดบนพื้นผิววัตถุที่ใกล้ที่สุดตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไป หรืออาจมองได้ว่าเป็นจุดศูนย์กลางของทรงกลมที่ไม่มีพื้นผิววัตถุอยู่ภายใน และสัมผัสกับพื้นผิววัตถุตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปนั่นเอง โดยหากรวมแกนกลางของวัตถุเข้ากับรัศมีของทรงกลมที่กล่าวข้างต้นจะถูกเรียกว่าผลการแปลงแกนกลางของวัตถุ (object's medial axis transform) ซึ่งสามารถใช้อธิบายรูปร่างของวัตถุได้อย่างสมบูรณ์ กล่าวคือสามารถใช้ผลการแปลงแกนกลางของวัตถุสร้างใหม่รูปร่างของวัตถุต้นฉบับได้อย่างสมบูรณ์

แกนกลางของวัตถุถูกประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆมากมายได้แก่การประมวลผลภาพ (image processing), คอมพิวเตอร์วิทัศน์ (computer vision), การวางแผนการเคลื่อนที่ (motion planning) เป็นต้น ในงานด้านการจับวัตถุของหุ่นยนต์ก็มีการนำแกนกลางของวัตถุเข้ามาใช้เหมือนกัน โดยคุณ M. Przybylski [28]–[30] ได้เสนอการวางแผนท่าจับของหุ่นยนต์ด้วยการพิจารณาแกนกลางของวัตถุ อย่างไรก็ตามการคำนวณแกนกลางวัตถุที่ถูกต้องแม่นยำนั้นใช้พลังในการประมวลผลสูงมาก เพื่อลดเวลาในการประมวลผลลงในหลายๆงานวิจัยจึงอาจใช้เพียงการประมาณแกนกลางของวัตถุก็เพียงพอแล้ว

2.7.1. ขั้นตอนวิธีประมาณแกนกลางของวัตถุ

คุณ Ma และคณะ [35] ได้เสนอขั้นตอนวิธีประมาณแกนกลางของวัตถุจากจุดเมฆบนพื้นผิววัตถุและทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิววัตถุของจุดเมฆนั้นๆ โดยข้อมูลนำเข้าจะมีแค่จุดบนพื้นผิวของวัตถุเท่านั้น ไม่ใช่พื้นผิวของวัตถุทั้งหมด ดังนั้นความละเอียดของผลลัพธ์จึงขึ้นอยู่กับความละเอียดของข้อมูลนำเข้านั่นเอง แนวคิดของวิธีการนี้คือเราสามารถลดปริภูมิการค้นหาของจุดกลาง (medial point) โดยอาศัยความจริงที่ว่าจุดศูนย์กลางของทรงกลมที่สัมผัสกับพื้นผิววัตถุที่จุด s_i จะต้องวางอยู่บนเส้นตรง l_{s_i} ซึ่งเป็นเส้นตรงที่ขนานกับทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิววัตถุ n_{s_i} และลากผ่านจุด s_i ดังนั้นสำหรับแต่ละจุด s_i จึงทำการค้นหาจุดกลาง เฉพาะบนเส้นตรง l_{s_i} เท่านั้น โดยจะเริ่มการค้นหาจากการสุ่มจุด t^0 ขึ้นมาซึ่งเป็นจุดบนพื้นผิววัตถุ จากนั้นคำนวณตำแหน่งของจุด c^0 ซึ่งอยู่บนเส้นตรง l_{s_i} และมีระยะห่างไปยังจุด s_i และจุด t^0 เท่ากันเท่ากับ d^0 อาจมองได้ว่าจุด c^0 คือจุดศูนย์กลางของทรงกลมที่สัมผัสกับจุด s_i และจุด t^0 สังเกตได้ว่าทรงกลมนี้อาจจะมีจุดบนพื้นผิววัตถุจุดอื่นอยู่ภายในทรงกลมด้วย เพื่อหาทรงกลมที่ไม่มีจุดบนพื้นผิววัตถุอยู่ภายในเลย จึงค้นหาจุด t^1 ซึ่งเป็นจุดบนพื้นผิวของวัตถุที่อยู่ใกล้กับจุด c^0 มากที่สุด จากนั้นใช้จุด t^1 เพื่อคำนวณระยะห่าง d^1 และตำแหน่งของจุด c^1 ต่อไป โดยจะทำซ้ำแบบนี้ไปเรื่อยๆจนกระทั่งระยะห่าง d^j มีค่าเท่ากับ d^{j+1} จึงได้ผลลัพธ์จุด c^{j+1} เป็นจุดกลางที่สัมพันธ์กับจุดบนพื้นผิว s_i

บทที่ 3

การสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน (concurrent grasps)

ในบทนี้จะนำเสนอขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่มีเป้าหมายเพื่อสร้างท่าจับแบบ 4 นิ้วที่มีคุณสมบัติปิดของแรงให้มีจำนวนมากที่สุดภายในเวลาที่กำหนด ซึ่งเป็นผลงานหลักของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจะใช้ข้อมูลพื้นผิวของวัตถุเซต S ซึ่งเป็นเซตของจุดบนพื้นผิวของวัตถุ (object's surface points) ที่ประกอบไปด้วยตำแหน่ง (position) และทิศทางในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของวัตถุที่ชี้เข้าหาวัตถุ (inward normal) เป็นข้อมูลนำเข้าจุดสัมผัส

เพื่อระบุท่าจับแบบ 4 นิ้วที่มีคุณสมบัติปิดของแรงนั้น วิธีที่เรียบง่ายที่สุดคือการสุ่มท่าจับเป็นจุดสัมผัสขึ้นมา 4 จุด จากนั้นทำการทดสอบว่าท่าจับที่สุ่มมานั้นมีคุณสมบัติปิดของแรงหรือไม่ โดยวิธีสุ่มแล้วทดสอบแบบนี้จะเป็นวิธีที่ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพเนื่องจากต้องทำการทดสอบคุณสมบัติปิดของแรงซึ่งทำงานบนปริภูมิเวกซ์ 6 มิติจึงใช้เวลาในการคำนวณนานและท่าจับที่มีโอกาสสุ่มขึ้นมาได้นั้นมีมากถึงประมาณจำนวนจุดบนพื้นผิววัตถุยกกำลังสี่

เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการคำนวณ ขั้นตอนวิธีที่เราได้นำเสนอนั้นจะอาศัยทฤษฎีบทที่ 5 เพื่อสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันซึ่งก็เป็นท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงด้วยเช่นกัน โดยขั้นตอนวิธีที่เราได้นำเสนอนั้นจะยอมเสียสละความสมบูรณ์ของเซตคำตอบเพื่อแลกกับความเร็วในการประมวลผล กล่าวคือขั้นตอนวิธีที่เราได้นำเสนอจะไม่สามารถสังเคราะห์ท่าจับที่ไม่ใช่ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันได้ แต่ก็ทำให้ประมวลผลได้เร็วขึ้นนั่นเอง แนวคิดหลักที่ทำให้ขั้นตอนวิธีของเราประมวลผลได้เร็วขึ้นคือ การหีบจุด $p_i \in \mathbb{R}^3$ แล้วสมมติให้จุดนี้เป็นจุดร่วม (concurrent point) จากนั้นจึงกรองจุดสัมผัสที่ไม่มีจุด p_i อยู่ในกรวยแรงเสียดทานสองด้านออก ซึ่งจุดสัมผัสที่ไม่ได้ถูกกรองออกเป็นจุดสัมผัสที่ผ่านเงื่อนไข P1 ในทฤษฎีบทที่ 5 นั่นเอง จากนั้นจึงค้นหาจุดสัมผัส 4 จุดจากจุดสัมผัสที่เหลือที่ผ่านเงื่อนไข P2 ในทฤษฎีบทที่ 5 เพื่อระบุเป็นท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน

ในบทที่ 3.1 จะอธิบายรายละเอียดของขั้นตอนวิธีที่เราได้นำเสนอเพื่อให้ผู้อ่านมีความเข้าใจมากขึ้น นอกจากนี้ผู้อ่านอาจสังเกตเห็นได้ว่าการเลือกหีบจุดร่วม p_i นั้น ตำแหน่งที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการคำนวณด้วย ซึ่งในหัวข้อที่ 3.2 จะอธิบายวิธีการเลือกหีบจุดร่วม p_i แบบต่างๆ

3.1. รหัสเทียมขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน

ตารางที่ 3.1 รหัสเทียมขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน

ข้อมูลนำเข้า:	
S เซตของจุดบนพื้นผิวสัมผัส และทิศทางในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวที่ชี้เข้าหาวัตถุ, เวลาจำกัดที่กำหนด	
ข้อมูลส่งออก: G เซตของท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน	
1	$G \leftarrow \emptyset$
2	while เวลาที่ใช้ไป < เวลาที่กำหนด do
3	เลือกหีบจุดร่วม $p_i \in \mathbb{R}^3$
4	ให้ M_i เป็นเซตของจุดบนพื้นผิวสัมผัสที่มีจุด p_i อยู่ในกรวยแรงเสียดทานสองด้าน
5	$V_i \leftarrow \{v_m v_m = \text{inward}(p_i - m) \forall m \in M_i\}$
6	$G_i \leftarrow \left\{ (a, b, c, d) \mid \begin{array}{l} v_a, v_b, v_c, v_d \in V_i \wedge \\ v_a, v_b, v_c, v_d \text{ positively span } \mathbb{R}^3 \end{array} \right\}$
7	$G \leftarrow G \cup G_i$

ตารางที่ 3.1 สรุปส่วนสำคัญของขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันที่เราได้นำเสนอ โดยขั้นตอนวิธีจะวนซ้ำบรรทัดที่ 2-7 จนกระทั่งถึงเวลาจำกัดที่กำหนด สำหรับการวนซ้ำแต่ละรอบ ขั้นตอนวิธีจะเลือกหีบจุดร่วม p_i ขึ้นมา (บรรทัดที่ 3) ซึ่งวิธีเลือกหีบจุดร่วมแบบต่าง ๆ นั้นถูกอธิบายในบทที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 หลักจากหีบจุดร่วม p_i ขึ้นมาแล้ว ขั้นตอนวิธีจะสร้างเซตของจุดบนพื้นผิวสัมผัส M_i ขึ้นมา (บรรทัดที่ 4) ซึ่งเซต M_i เป็นเซตของจุดบนพื้นผิวสัมผัสที่ผ่านเงื่อนไข P1 ในทฤษฎีบทที่ 5 หรือก็คือจุดบนพื้นผิวสัมผัสที่มีจุด p_i อยู่ในกรวยแรงเสียดทานสองด้านนั่นเอง สำหรับจุดบนพื้นผิวสัมผัส m แต่ละจุดในเซต M_i ขั้นตอนวิธีจะคำนวณเวกเตอร์ v_m ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ชี้เข้าไปในวัตถุและขนานกับเส้นที่ลากผ่านจุด p_i และจุด m เรานิยามเซตของเวกเตอร์ v_m เหล่านี้ว่า V_i (บรรทัดที่ 5) ต่อมาขั้นตอนวิธีจะค้นหาวิธีจัดหมู่ 4 สมาชิกของสมาชิกของ V_i ทั้งหมดที่แผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^3 เก็บไว้ในเซต G_i ซึ่งเป็นเซตของท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันที่มีจุด p_i เป็นจุดร่วม (บรรทัดที่ 6) โดยรายละเอียดในขั้นตอนนี้จะถูกอธิบายอยู่ในบทที่ 3.1.1. สุดท้ายจึงนำเซตคำตอบที่ได้จากการวนซ้ำรอบนี้ G_i ไปรวมกับเซตของคำตอบทั้งหมด G (บรรทัดที่ 7)

3.1.1. การค้นหาเวกเตอร์ 4 เวกเตอร์ที่แผ่ทั่วทางบวกปริภูมิ 3 มิติ

บรรทัดที่ 6 ของขั้นตอนวิธีในตารางที่ 3.1 เป็นการค้นหาวิธีจัดหมู่ 4 สมาชิกของสมาชิกของ V_i ทั้งหมดที่แผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^3 วิธีการที่ตรงไปตรงมาก็คือการทดสอบการแผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^3 กับการจัดหมู่ 4 สมาชิกของสมาชิกของ V_i ทั้งหมดที่เป็นไปได้ ซึ่งวิธีนี้จะต้องทำการทดสอบการแผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^3 ถึง $O(|V_i|^4)$ ครั้ง ทำให้เสียเวลาในการคำนวณสูงมาก

เพื่อลดเวลาในการประมวลผลขั้นตอนวิธีใน [9] ทำการจัดหมู่เพียง 3 สมาชิกเท่านั้น แล้วจึงใช้โครงสร้างข้อมูลต้นไม้แบบขอบเขตตั้งฉาก (orthogonal range tree) ช่วยในการหาสมาชิกที่ 4 ที่ทำให้การจัดหมู่ 4 สมาชิกนั้นแผ่ทั่ว \mathbb{R}^3 โดยต้นไม้แบบขอบเขตตั้งฉากที่มี n จุดนั้น จะใช้เวลาในการสร้าง $O(n \log n)$ และสามารถสืบค้นจุดที่อยู่ในขอบเขตแบบตั้งฉากได้ในเวลา $O(\log^2 n + k)$ โดย k คือจำนวนคำตอบที่ได้ จากการใช้ต้นไม้แบบขอบเขตตั้งฉากทำให้ลดความซับซ้อนของปัญหาลงเหลือ $O(|V_i|^3 \log^2 |V_i| + K)$ โดย K คือจำนวนของการจัดหมู่ 4 สมาชิกที่แผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^3 โดยขั้นตอนการทำงานจะเป็นดังนี้ ขั้นแรกคือทำการแปลงเวกเตอร์ใน V_i ให้อยู่ในพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate) จากนั้นจึงจัดหมู่เพียง 3 สมาชิกจากสมาชิกของ V_i ทั้งหมด จากนั้นใช้ต้นไม้แบบขอบเขตตั้งฉากค้นหาสมาชิกที่ 4 จากสมาชิกของ V_i ที่เหลือที่อยู่ภายในขอบเขตสามเหลี่ยมบนพิกัดทรงกลมที่มีจุดยอดสามเหลี่ยมเป็นส่วนกลับของสมาชิก 3 ตัวแรก เนื่องจากเราไม่สามารถใช้ต้นไม้แบบขอบเขตตั้งฉากกับขอบเขตที่เป็นสามเหลี่ยมได้ตรงๆ จึงทำการประมาณขอบเขตสามเหลี่ยมด้วยสี่เหลี่ยมย่อยๆแทน และเนื่องจากใช้การประมาณขอบเขตสามเหลี่ยม จึงต้องทำการทดสอบการแผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^3 ซ้ำอีกครั้งเพื่อความถูกต้อง จะเห็นได้ว่าวิธีการนี้ยังมีความยุ่งยากอยู่หลายอย่าง

ในงานวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์ท่าจับที่ไร้แรงเสียดทานบนวัตถุ 2 มิติ [36] ได้เสนอวิธีการค้นหาเวกเตอร์ 4 เวกเตอร์ที่แผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^3 โดยอาศัยทฤษฎีบทต่อไปนี้

ทฤษฎีบทที่ 7 [36] ให้ p'_1, p'_2, v'_1 และ v'_2 เป็นเวกเตอร์ใน \mathbb{R}^3 ที่แตกต่างกัน กำหนดให้ $p_1 = Tp'_1, p_2 = Tp'_2, v_1 = Tv'_1$ และ $v_2 = Tv'_2$ เมื่อ T คือเมทริกซ์ของการหมุนที่ทำให้ p_1 และ p_2 อยู่บนระนาบ xz นอกจากนี้ p_1 กับ p_2 ต้องมีค่า z มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และมุมระหว่าง p_1 กับ p_2 ถูกแบ่งกลางด้วยแกน z เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอที่ทำให้ p'_1, p'_2, v'_1 และ v'_2 แผ่ทั่วทางบวก \mathbb{R}^3 คือ

- เวกเตอร์ v_1 หรือ v_2 อย่างน้อยหนึ่งเวกเตอร์ที่มีค่า z น้อยกว่าศูนย์
- เวกเตอร์ v_1 และ v_2 มีค่า y ในทิศตรงข้ามกัน และทั้งสองเวกเตอร์ไม่อยู่บนระนาบ xz

(c) มีเวกเตอร์ l_1 ที่เป็นผลรวมเชิงเส้นบวกของ p_1 และ p_2 และเวกเตอร์ l_2 ที่เป็นผลรวมเชิงเส้นบวกของ v_1 และ v_2 โดยที่ l_1 และ l_2 ชี้ไปในทิศทางตรงข้ามกัน หรือกล่าวคือ $l_1 = \lambda l_2$ สำหรับ λ ที่มีค่าเป็นบวก และ

(d) ค่า z ของ p_1 และ p_2 มีค่าเป็นบวก

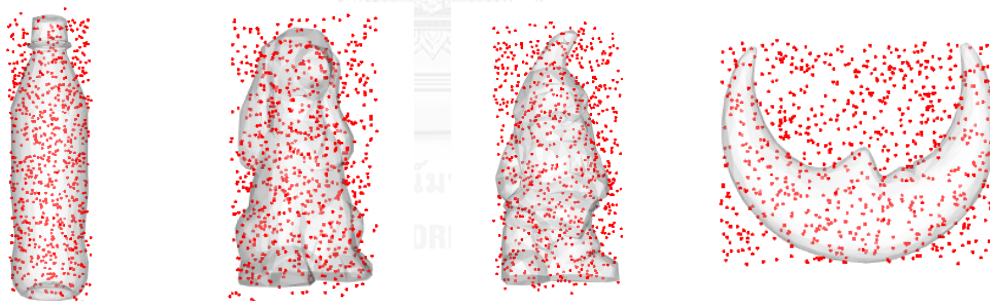
โดยการทำงานจะเริ่มจากแจกแจงเวกเตอร์ใน V_i ที่ละ 2 สมาชิก ได้แก่ p'_1 และ p'_2 ซึ่ง $p'_1 \neq -p'_2$ เพราะหาก $p'_1 = p'_2$ จะทำให้ไม่สามารถผ่านเงื่อนไข (d) ในทฤษฎีบทที่ 7 จากนั้นหาเมทริกซ์ของการหมุน T ที่ทำให้ $p_1 = Tp'_1$ และ $p_2 = Tp'_2$ อยู่บนระนาบ xz นอกจากนี้ p_1 กับ p_2 ต้องมีค่า z ไม่ติดลบ และมุมระหว่าง p_1 กับ p_2 ถูกแบ่งกลางด้วยแกน z เมื่อได้เมทริกซ์ของการหมุน T มาแล้วจึงสร้างเซต U_i ขึ้นจากการหมุนเวกเตอร์ใน V_i ด้วยเมทริกซ์ของการหมุน T จากนั้นเราจะหาคู่เวกเตอร์ v_1 และ v_2 จากเซต U_i ทั้งหมดที่ตรงตามเงื่อนไข (a), (b) และ (c) ในทฤษฎีบทที่ 7 โดยแบ่งเวกเตอร์ใน U_i ออกเป็นเซตย่อยๆตามเครื่องหมายของค่า y และค่า z เป็น 6 เซตย่อย ได้แก่ P_+, P_0, P_-, N_+, N_0 และ N_- โดยตัวอักษร P และ N หมายถึงค่า y มีค่าเป็นบวกและลบตามลำดับ ส่วนเครื่องหมายย่อยท้าย $+, 0$ และ $-$ หมายถึงค่า z มีค่าเป็นบวก, ศูนย์ และลบตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าเราจะไม่สนใจเวกเตอร์ที่ค่า y เท่ากับศูนย์ เพราะจะทำให้เวกเตอร์ v_1 และ v_2 นั้นจะอยู่ในระนาบ xz ซึ่งขัดกับเงื่อนไข (b) นอกจากนี้เพื่อให้ผ่านเงื่อนไข (a) และ (b) เวกเตอร์ v_1 และ v_2 จะต้องมีเวกเตอร์หนึ่งถูกหิบบมาจากเซตย่อย P_- และอีกเวกเตอร์ถูกหิบบมาจากเซตย่อย $N_{+,0,-}$ หรือเวกเตอร์หนึ่งถูกหิบบมาจากเซตย่อย N_- และอีกเวกเตอร์ถูกหิบบมาจากเซตย่อย $P_{+,0,-}$ สำหรับเงื่อนไขสุดท้ายคือเงื่อนไข (c) นั้นเราจะทำการพิจารณาจุด 2 มิติบนระนาบ $z = 1$ โดยให้ $d(v)$ เป็นจุดตัดระหว่างระนาบ $z = 1$ และเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิดและขนานกับเวกเตอร์ v จะสังเกตได้ว่าส่วนของเส้นตรงระหว่างจุด $d(p_1)$ และจุด $d(p_2)$ จะขนานกับแกน x เพื่อให้ทำให้ผ่านเงื่อนไข (c) เราต้องหาเวกเตอร์ v_1 และ v_2 ที่ทำให้ส่วนของเส้นตรงระหว่างจุด $d(v_1)$ และจุด $d(v_2)$ ตัดกับส่วนของเส้นตรงระหว่างจุด $d(p_1)$ และจุด $d(p_2)$ รายละเอียดสามารถดูได้ใน [36]

3.2. การเลือกจุดร่วม

จุดร่วม p_i ที่ใช้ค้นหาท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันในบรรทัดที่ 3 ของขั้นตอนวิธีในตารางที่ 3.1 นั้น แต่ละจุดจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไป บางจุดร่วมสามารถใช้หาท่าจับได้เป็นจำนวนมาก บางจุดหาท่าจับได้เพียงไม่กี่ท่าหรืออาจถึงขั้นหาท่าจับไม่ได้เลย และหากพิจารณาด้วยคุณภาพของท่าจับ จุดร่วมแต่ละจุดก็มีโอกาสสร้างท่าจับที่มีคุณภาพสูงหรือต่ำได้แตกต่างกันด้วย ดังนั้นวิธีการเลือกจุดร่วมนั้น จึงมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพโดยรวมของขั้นตอนวิธีเป็นอย่างมาก โดยในวิทยานิพนธ์นี้ก็ได้เสนอวิธีการเลือกจุดร่วมแบบต่างดังนี้

3.2.1. การเลือกจุดร่วมแบบสุ่มกระจายตัวสม่ำเสมอ

วิธีนี้เป็นวิธีการเลือกหีบจุดร่วมที่เรียบง่ายที่สุดโดยการสุ่มตำแหน่งของจุดที่อยู่ภายในกล่องขอบเขตเล็กที่สุดตามแนวแกนของวัตถุ (object's axis-aligned minimum bounding box) โดยจะใช้การสุ่มแบบกระจายตัวสม่ำเสมอ (uniformly distributed random) ซึ่งทำให้ทุกจุดที่อยู่ภายในกล่องขอบเขตเล็กที่สุดตามแนวแกนของวัตถุมีโอกาสเท่าๆกันที่จะถูกสุ่มขึ้นมาเป็นจุดร่วม ประสิทธิภาพของการเลือกหีบจุดร่วมแบบนี้อาจไม่ดีนัก แต่ก็เป็วิธีที่เรียบง่ายที่สุดจึงเหมาะกับการใช้เป็นบรรทัดฐานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการเลือกจุดร่วมแบบอื่น



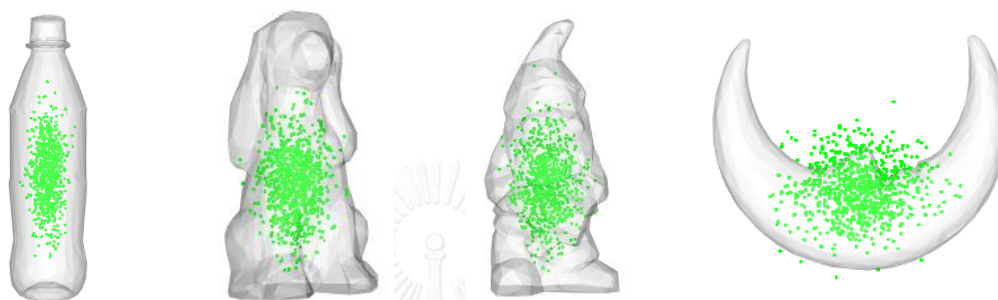
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการเลือกจุดร่วมแบบสุ่มกระจายตัวสม่ำเสมอ

3.2.2. การเลือกจุดร่วมใกล้กับจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ

วิธีการหนึ่งในการเลือกจุดร่วมที่เรานำเสนอคือการสุ่มเลือกจุดที่อยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ ซึ่งได้แนวคิดมาจากการวัดคุณภาพท่าจับโดยใช้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของจุดจับและจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุเป็นตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับ [8], [37] ยิ่งจุดศูนย์กลางของจุดจับอยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุมากเท่าไรคุณภาพท่าจับก็จะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น ถึงแม้จุดร่วมของท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันจะไม่ใช่ว่าจุดศูนย์กลางของท่าจับ แต่การเลือกจุดร่วมให้อยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุก็น่าจะส่งผลให้ท่าจับที่สร้างขึ้นมามีคุณภาพที่ดีตามไปด้วย นอกจากนี้บริเวณจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุเป็นบริเวณที่มีกรวยแรงเสียดทานของจุดบนพื้นผิววัตถุซ้อนทับกันเป็นจำนวนมากการใช้จุด

บริเวณนี้เป็นจุดรวมจึงน่าจะทำให้สร้างท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันได้เป็นจำนวนมากด้วย เพื่อยืนยันสมมุติฐานนี้เราได้ทำการทดลองไว้ในบทที่ 4

สำหรับวิธีการเลือกจุดรวมใกล้กับจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุนั้นทำได้โดยการสุ่มจุดจากการแจกแจงปกติ (normal distribution) ที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่จุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าแปรผันตามขนาดของกล่องขอบเขตเล็กที่สุดตามแนวแกนของวัตถุ ซึ่งทำให้จุดที่อยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางมวลมีโอกาสถูกสุ่มขึ้นมาเป็นจุดรวมมากกว่าจุดที่อยู่ไกลออกไป



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการเลือกจุดรวมใกล้กับจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ

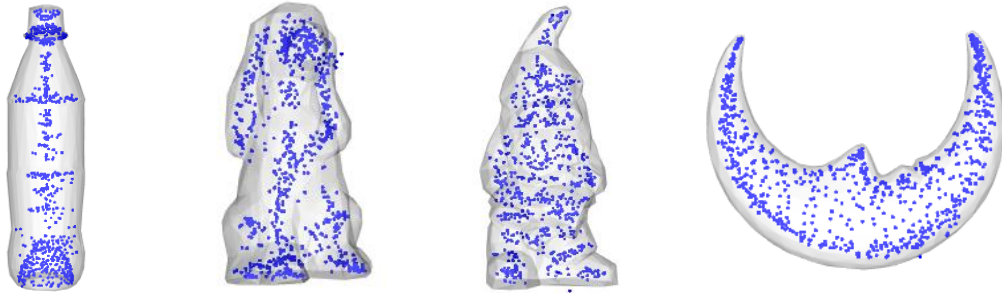
การเลือกจุดรวมใกล้กับจุดศูนย์กลางมวลนั้นถึงแม้ว่าน่าจะทำให้ท่าจับที่สร้างได้มีจำนวนและคุณภาพที่สูงขึ้น แต่ก็อาจทำให้จุดรวมกระจุกอยู่เพียงแค่ว่าบริเวณเล็กๆไม่กระจายตัวทั่วทั้งวัตถุ ทำให้ท่าจับที่สร้างได้ไม่หลากหลาย เมื่อสังเคราะห์ท่าจับไปได้ซักรุ่นท่าจับที่สร้างขึ้นใหม่จะมีโอกาสซ้ำกับท่าจับที่เคยถูกสร้างไว้แล้วมาก ซึ่งเป็นการเสียเวลาประมวลผลไปอย่างเปล่าประโยชน์ จึงน่าจะมีวิธีการแก้ปัญหานี้ เพื่อให้ท่าจับที่สร้างได้มีความหลากหลายมากขึ้น

3.2.3. การเลือกจุดรวมจากแกนกลางของวัตถุ

การนำข้อมูลรูปร่างของวัตถุเข้ามาช่วยในการเลือกหยิบจุดรวมให้มีการกระจายตัวครอบคลุมทั่วทั้งวัตถุน่าจะช่วยให้การหาท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันมีประสิทธิภาพมากขึ้น แกนกลางของวัตถุเป็นวิธีอธิบายรูปร่างของวัตถุที่ช่วยลดปริมาณของข้อมูลลงแต่ก็ยังคงอธิบายความซับซ้อนของรูปร่างของวัตถุได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แกนกลางของวัตถุยังเป็นจุดที่มีกรวยแรงเสียดทานของจุดบนพื้นผิวสัมผัสซ้อนทับกันเป็นจำนวนมาก ทำให้มีโอกาสที่ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันจะมีแกนกลางของวัตถุเป็นจุดรวมมากตามไปด้วย ดังนั้นเราจึงเสนอให้ใช้แกนกลางของวัตถุเป็นจุดรวมในการหาท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน ซึ่งน่าจะช่วยให้สามารถหาท่าจับได้เป็นจำนวนมากขึ้นภายในเวลาที่เท่ากัน

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการประมาณแกนกลางของวัตถุที่เสนอโดยคุณ Ma และคณะ [35] ซึ่งเป็นการหาจุดแกนกลางของวัตถุจากตำแหน่งและทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของจุดบนพื้นผิวของวัตถุ โดยข้อมูลเหล่านี้ก็เป็นข้อมูลนำเข้าของขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่เรานำเสนออยู่แล้ว จึงสามารถ

นำไปใช้ได้ทันที โดยในบรรทัดที่ 3 ของขั้นตอนวิธีในตารางที่ 3.1 จะทำการสุ่มจุดบนพื้นผิวสัมผัส s_i ที่ยังไม่เคยถูกสุ่มขึ้นมา และจึงคำนวณจุดแกนกลางของวัตถุ c_{s_i} จากจุด s_i เพื่อใช้เป็นจุดร่วม p_i ต่อไป สำหรับขั้นตอนวิธีคำนวณแกนกลางของวัตถุได้ถูกอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.7.1



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการเลือกจุดร่วมจากแกนกลางของวัตถุ



บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ที่เรานำเสนอ ในบทนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับแบบต่างๆ โดยจะทำการเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันที่ได้เสนอไว้ในบทที่ 3 โดยใช้วิธีการเลือกจุดร่วมแบบต่างๆตามที่ได้เสนอทั้ง 3 วิธีได้แก่ วิธีการเลือกจุดร่วมแบบสุ่มกระจายตัวสม่ำเสมอ, วิธีการเลือกจุดร่วมใกล้จุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ และวิธีการเลือกจุดร่วมจากแกนกลางของวัตถุ เพื่อให้เห็นความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการเลือกจุดร่วมแบบต่างๆ นอกจากนี้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน และขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรง เรายังได้ทำการเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงโดยการสุ่มตำแหน่งสัมผัส [18] ที่ผ่านการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดด้วยงานวิจัยใหม่ๆที่มีในปัจจุบันอีกด้วย

โดยในการเปรียบเทียบนั้นจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพใน 2 ประเด็นได้แก่ ความเร็วในการสร้างท่าจับ และคุณภาพของท่าจับที่สร้างได้ โดยขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ดีจะต้องสามารถสร้างท่าจับได้เร็วคือสามารถสร้างท่าจับได้เป็นจำนวนมากๆภายในเวลาอันสั้น ซึ่งหากกำหนดเวลาไว้เท่ากัน ขั้นตอนวิธีที่สามารถสังเคราะห์ท่าจับได้เป็นจำนวนมากกว่าก็จะถือว่ามีประสิทธิภาพดีกว่าในแง่ของความเร็วในการสร้างท่าจับ แต่นอกจากจะต้องสามารถสร้างท่าจับได้เร็วแล้วสำหรับขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ดีนั้น ท่าจับที่สังเคราะห์ขึ้นมาจะต้องเป็นท่าจับที่มีคุณภาพที่ดีอีกด้วย เราจึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีต่างๆโดยดูทั้งจำนวนท่าจับที่สร้างได้ และคุณภาพของท่าจับที่สร้างได้

4.1. ระบบที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1. คอมพิวเตอร์ที่ใช้ทำการทดลอง

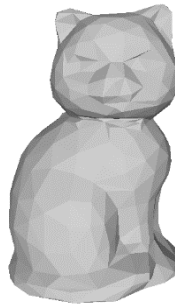
การทดลองทั้งหมดทำงานบนคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) รุ่น Intel® Core™ i7-3770 ความเร็ว 3.40 Ghz และมีหน่วยความจำหลัก (RAM) ขนาด 8GB โดยใช้ระบบปฏิบัติการ Ubuntu 14.04 สถาปัตยกรรม 64 บิต

4.1.2. การเขียนโปรแกรม

โปรแกรมที่ใช้ทำการทดลองถูกเขียนขึ้นโดยใช้ภาษา C++ ผู้สนใจสามารถขอรหัสต้นฉบับ (source code) ได้ทางอีเมลของผู้เขียน



(a) CatLying



(b) CatSitting



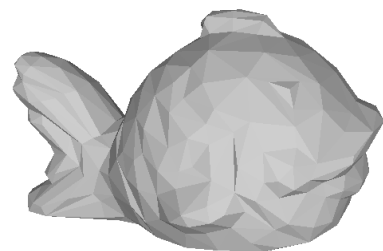
(c) CokePlasticSmallGrasp



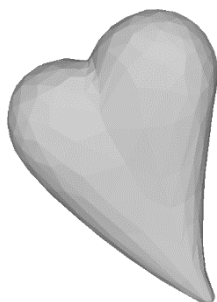
(d) Dog



(e) Dwarf



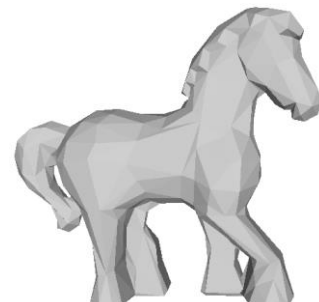
(f) Fish



(g) Heart1



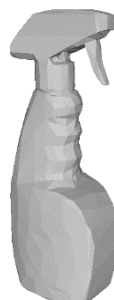
(h) moon



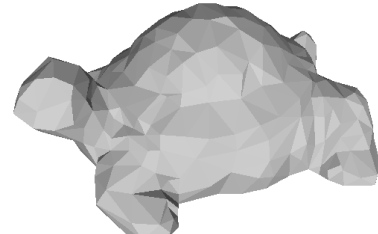
(i) Pony



(j) Seal



(k) Sprayflask



(l) Tortoise

รูปที่ 4.1 วัตถุที่ใช้ในการทดลอง

4.1.3. ข้อมูลนำเข้า

ในการทำการทดลองเราเลือกวัตถุ 12 วัตถุจาก The KIT object model database [38] ได้แก่ CatLying, CatSitting, CokePlasticSmallGrasp, Dog, Dwarf, Fish, Heart1, Moon, Pony, Seal, Sprayflask และ Tortoise ตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยทุกวัตถุจะใช้ความละเอียดระดับที่มีจำนวนหน้า (facet) ประมาณ 800 หน้า โดยใช้จุดศูนย์กลางของแต่ละหน้าเป็นจุดสัมผัสสำหรับเป็นข้อมูลนำเข้าของระบบ ดังนั้นแต่ละวัตถุก็จะมีข้อมูลนำเข้าจุดสัมผัสประมาณ 800 จุดนั่นเอง

4.2. การทดลองเปรียบเทียบการสังเคราะห์ท่าจับแบบต่างๆในเวลา 0.5 วินาที

เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับทั้งหมด 4 วิธี ดังนี้

1. สุ่มจุดสัมผัส 4 จุด (Random4SP)

วิธีนี้เป็นวิธีการสังเคราะห์ท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงโดยการสุ่มตำแหน่งสัมผัส [18] ตามที่ถูกระบุไว้ในหัวข้อที่ 2.6.3 โดยมีการปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดีขึ้นโดยใช้เงื่อนไขที่จำเป็นแต่ไม่เพียงพอสำหรับคุณสมบัติปิดของแรง [19], [20] เป็นตัวกรองท่าจับที่ไม่มีคุณสมบัติปิดของแรงออกไปตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.6.3.1 และใช้ขั้นตอนวิธีสำหรับทดสอบคุณสมบัติปิดของแรงที่ถูกรับเสนอไว้โดยคุณ Zheng และคณะ [6] ซึ่งทำให้การตรวจสอบคุณสมบัติปิดของแรงทำได้อย่างรวดเร็วมาก โดยวิธีนี้ไม่ใช่วิธีที่ถูกรับเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แต่เป็นวิธีที่ใช้คนละแนวทางกัน จึงถูกนำมาใช้เป็นตัวเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงซึ่งก็คือวิธีนี้ และขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันซึ่งเป็นวิธีที่ถูกรับเสนอโดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2. กระจายตัวสม่ำเสมอ (Uniform)

วิธีนี้เป็นวิธีการสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นผลงานหลักของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยใช้ในการเลือกจุดร่วมแบบสุ่มกระจายตัวสม่ำเสมอตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2.1 โดยวิธีนี้จะใช้เป็นบรรทัดฐานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการเลือกจุดร่วมแบบอื่น

3. ใกล้จุดศูนย์กลางมวล (NearCM)

วิธีนี้เป็นวิธีการสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นผลงานหลักของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยใช้ในการเลือกจุดร่วมใกล้จุดศูนย์กลางมวลตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ

ที่ 3.2.2 โดยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะใช้ค่าเศษ 1 ส่วน 9 ของขนาดของกล่องขอบเขตเล็กที่สุดตามแนวแกนของวัตถุ

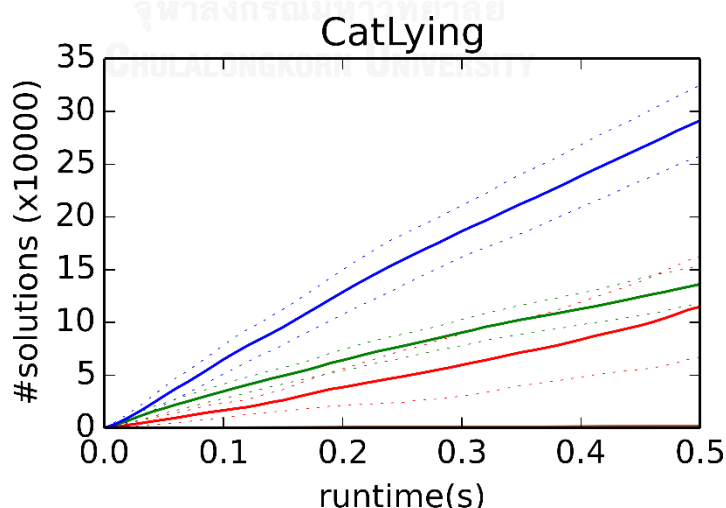
4. จุดแแกนกลาง (MedailPoint)

วิธีนี้เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่จับที่ไปยังจุดเดียวกันตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นผลงานหลักของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยใช้การเลือกจุดร่วมจากแแกนกลางของวัตถุตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2.3

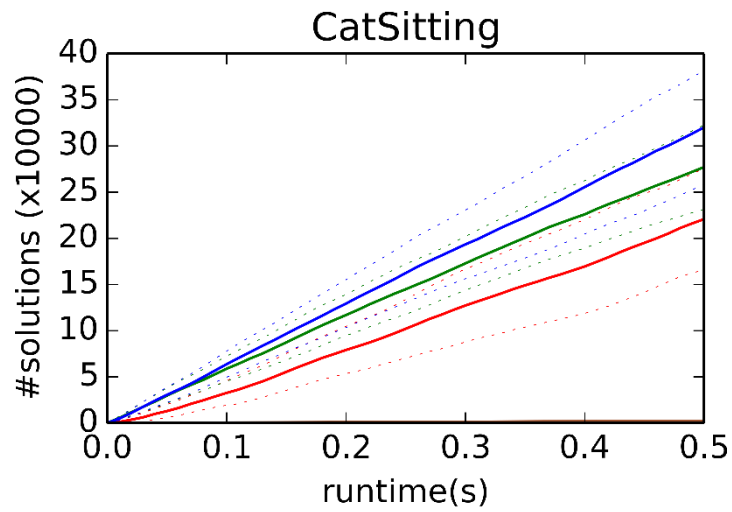
โดยทั้ง 4 วิธีนั้นจะถูกจำกัดการทำงานไว้ที่ 0.5 วินาทีเท่ากัน และเนื่องจากทั้ง 4 วิธีนั้นเป็นขั้นตอนวิธีแบบสุ่ม จึงได้ทำการทดลองแต่ละวิธีซ้ำทั้งหมด 30 ครั้ง

4.2.1. ผลการทดลองแสดงจำนวนท่าจับที่สร้างได้ภายในเวลา 0.5 วินาที

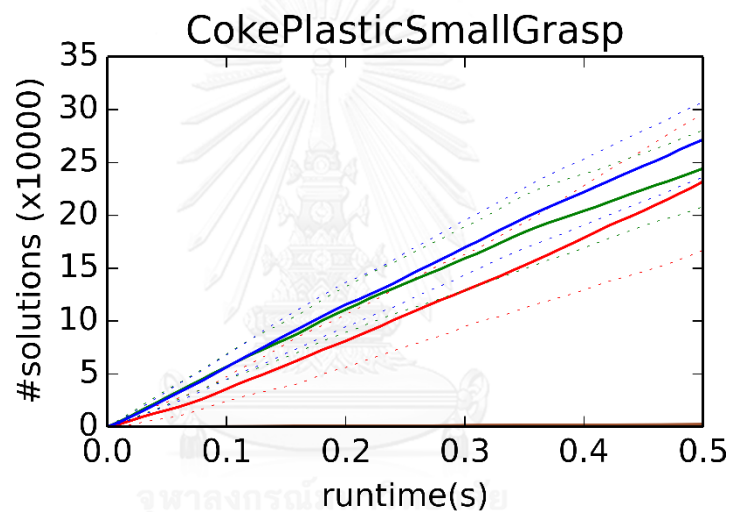
กราฟในรูปที่ 4.2 ถึง รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองที่ทดลองกับวัตถุแต่ละชนิด โดยแสดงเป็นจำนวนของท่าจับที่แตกต่างกัน(ไม่นับท่าจับซ้ำ) ที่แต่ละวิธีสร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที แกน Y ของกราฟคือจำนวนของท่าจับที่แตกต่างกัน แกน X คือเวลาหน่วยเป็นวินาที เส้นกราฟสีน้ำตาล, สีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน แสดงถึงจำนวนท่าจับที่สร้างโดยวิธี Random4SP, Uniform, NearCM และ MedialPoint ตามลำดับ โดยเส้นทึบคือค่าเฉลี่ยของจำนวนท่าจับจากการทดลองทั้งหมด 30 ครั้ง และเส้นประคือค่าบวกและลบ 1 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากเส้นทึบ ยิ่งเส้นกราฟอยู่สูงแสดงว่าวิธีนั้นมีประสิทธิภาพมากเพราะสามารถสร้างท่าจับที่แตกต่างกันได้เป็นจำนวนมากภายในเวลาที่เท่ากัน



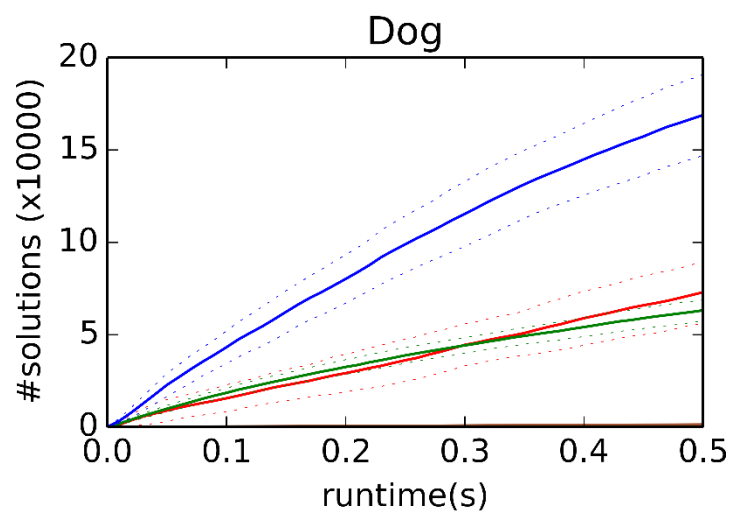
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ CatLying ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที



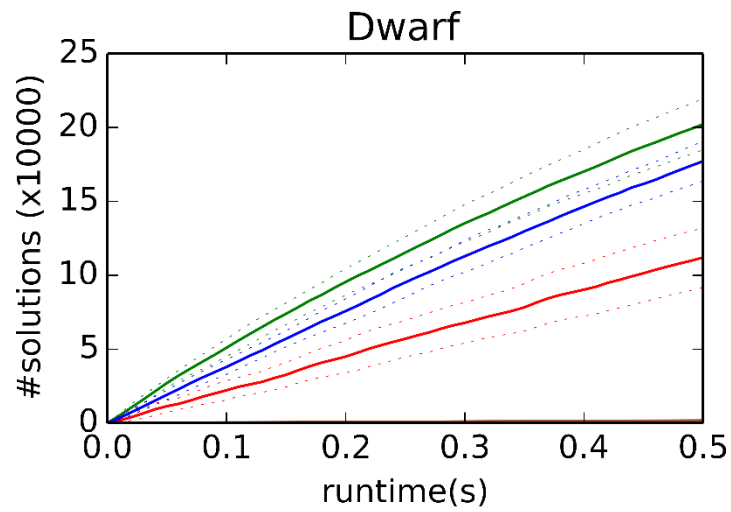
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ CatSitting ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที



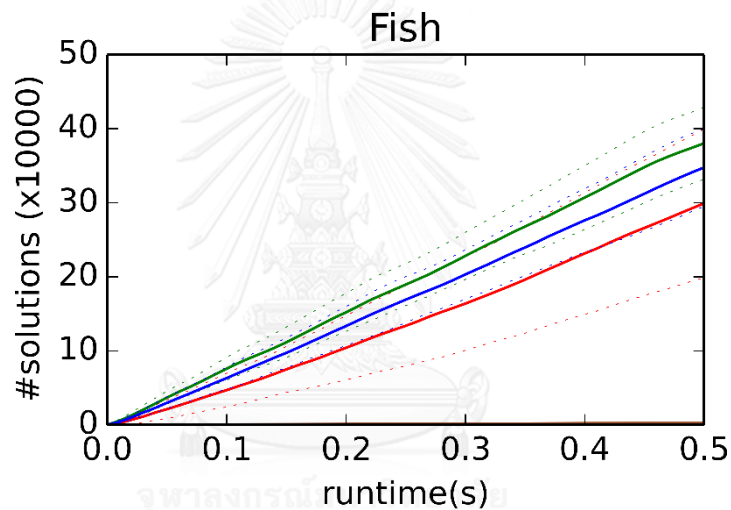
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ CokePlasticSmallGrasp ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที



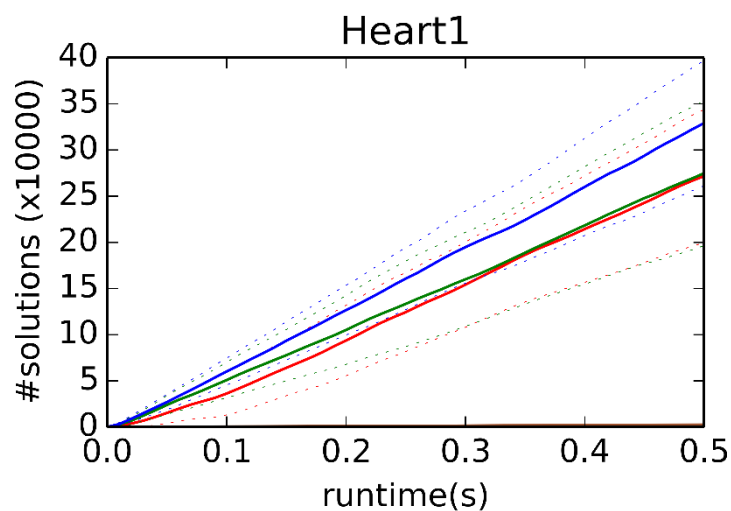
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Dog ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที



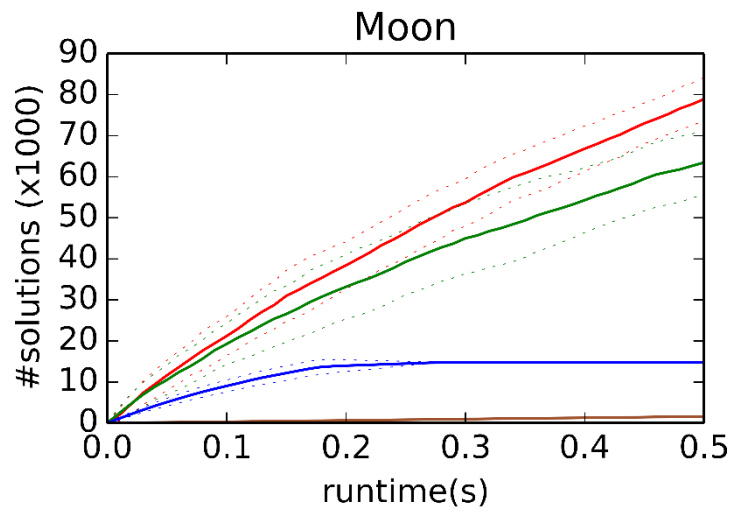
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Dwarf ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที



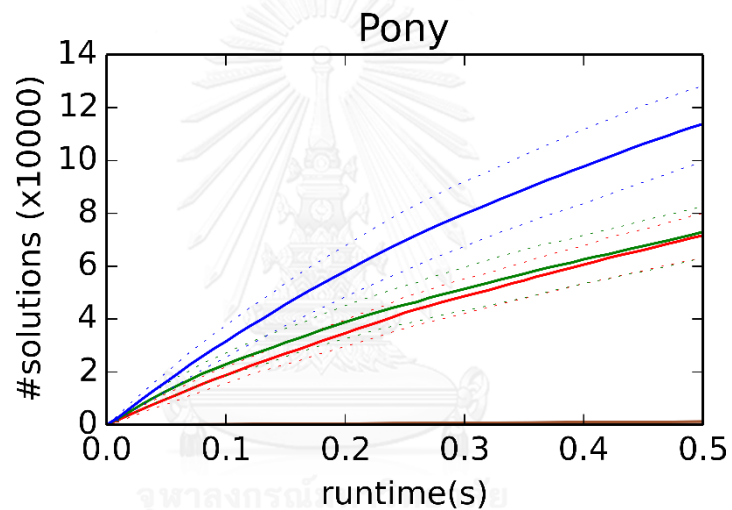
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Fish ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที



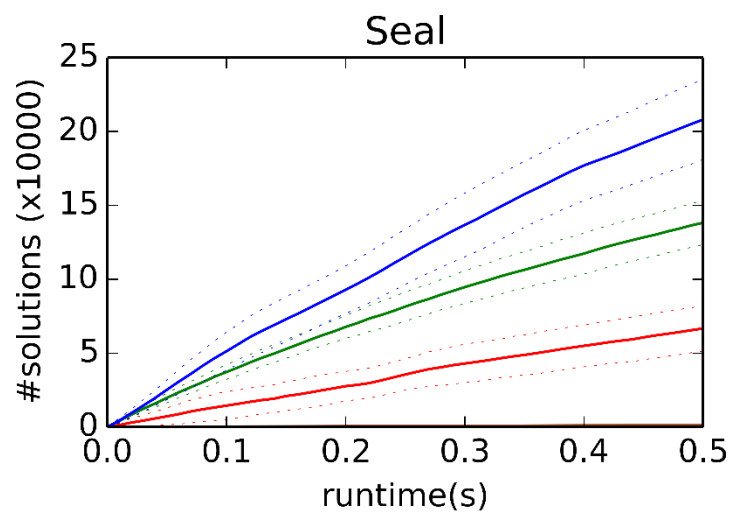
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Heart1 ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที



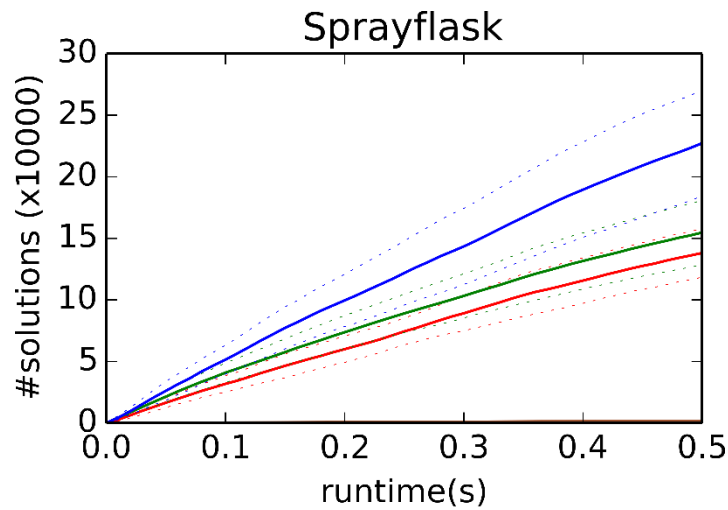
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Moon ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที



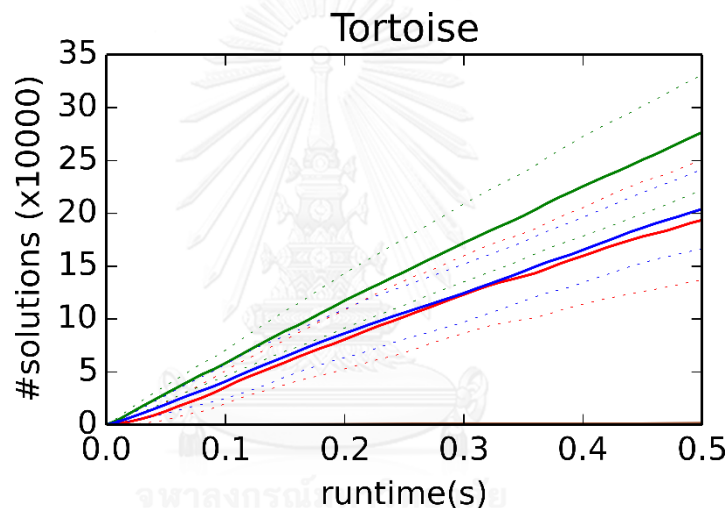
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Pony ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Seal ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Sprayflask ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงจำนวนท่าจับวัตถุ Tortoise ที่สร้างได้ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.5 วินาที

จากกราฟทั้ง 12 กราฟจะเห็นได้ว่าการทดลองบนวัตถุส่วนใหญ่ถึง 8 วัตถุที่วิธี MedialPoint (กราฟเส้นสีน้ำเงิน) นั้นสามารถสร้างท่าจับได้เยอะกว่าวิธีอื่นๆภายในเวลาที่เท่ากัน ส่วนวัตถุที่ผลการทดลองเป็นกราฟเส้นสีเขียวซึ่งคือวิธี NearCM อยู่สูงกว่ากราฟเส้นสีน้ำเงินมีอยู่ 3 วัตถุ นอกจากนี้ยังมีการทดลองที่ให้ผลแตกต่างไปจากการทดลองบนวัตถุอื่นๆอย่างชัดเจนนั่นคือการทดลองกับวัตถุ Moon ที่เส้นสีแดงซึ่งคือวิธี Uniform นั้นอยู่สูงกว่ากราฟเส้นสีอื่นๆ และอยู่สูงกว่ากราฟเส้นสีน้ำเงินอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งนั่นคือวิธี Random4SP (กราฟเส้นสีน้ำตาล) นั้นสามารถสร้างท่าจับได้เข้ามามากๆเมื่อเทียบกับวิธีอื่นจนแทบจะมองไม่เห็นกราฟเส้นสีน้ำตาลเลยเพราะอยู่ติดกับแกน X เป็นอย่างมาก

เพื่อให้เห็นผลการทดลองของวิธี Random4SP ด้วย ในตารางที่ 4.1 ได้แสดงค่าเฉลี่ยของจำนวนท่าจับที่แตกต่างกันที่สร้างได้ภายในเวลา 0.5 วินาทีของแต่ละวิธี โดยจะเห็นได้ว่าวิธี Random4SP

สามารถสร้างท่าจับได้เป็นจำนวนน้อยมากโดยจะอยู่แค่หลักพันเท่านั้น ในขณะที่วิธีอื่นจำนวนท่าจับที่สร้างได้จะอยู่ในหลักหมื่นถึงหลักแสนทั้งสิ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันซึ่งยอมเสียสละความสมบูรณ์ของเซตคำตอบเพื่อแลกกับความเร็วในการทำงานนั้น ไม่ว่าจะใช้วิธีเลือกจุดร่วมแบบไหนก็ทำงานได้เร็วกว่าวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของจำนวนท่าจับที่แตกต่างกันที่สร้างได้ภายในเวลา 0.5 วินาที

ชื่อวัตถุ	Random4SP	Uniform	NearCM	MedailPoint
CatLying	1757	114824	136184	291194
CatSitting	2295	220710	277083	320030
CokePlasticSmallGrasp	2368	231942	244274	271544
Dog	1319	72930	63151	168861
Dwarf	1666	111954	202166	177116
Fish	2593	299100	380227	347511
Heart1	2537	271626	274723	329001
Moon	1587	78909	63452	14803
Pony	1231	71603	72962	113772
Seal	1331	66664	138187	208014
Sprayflask	1737	138030	154635	227160
Tortoise	1435	193566	276526	203973

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธี MedialPoint กับวิธีอื่นให้เห็นได้อย่างชัดเจน ใน ได้แสดงอัตราส่วนของค่าเฉลี่ยของจำนวนท่าจับที่แตกต่างกันที่สร้างได้ภายในเวลา 0.5 วินาทีระหว่างวิธี MedialPoint กับวิธีต่างๆ โดยยิ่งค่าอัตราส่วนนี้มีค่ามากก็หมายความว่าวิธี MedialPoint ยิ่งสามารถสร้างท่าจับได้เป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับวิธีการนั้นๆ และหากค่าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อยกว่าศูนย์นั้นก็หมายความว่าวิธี MedialPoint สร้างท่าจับได้เป็นจำนวนน้อยกว่าวิธีการนั้นๆ โดยข้อมูลในตารางจะเรียงตามค่าอัตราส่วนของวิธี MedialPoint เทียบกับวิธี NearCM

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนของค่าเฉลี่ยของจำนวนท่าจับที่แตกต่างกันที่สร้างได้ภายในเวลา 0.5 วินาที
ระหว่างวิธี MedialPoint กับวิธีต่างๆ

ชื่อวัตถุ	Random4SP	Uniform	NearCM
Dog	128.05	2.32	2.67
CatLying	165.77	2.54	2.14
Pony	92.44	1.59	1.56
Seal	156.29	3.12	1.51
Sprayflask	130.80	1.65	1.47
Heart1	129.66	1.21	1.20
CatSitting	139.47	1.45	1.15
CokePlasticSmallGrasp	114.65	1.17	1.11
Fish	134.01	1.16	0.91
Dwarf	106.29	1.58	0.88
Tortoise	142.11	1.05	0.74
Moon	9.33	0.19	0.23

เมื่อพิจารณา



ตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบวิธี MedialPoint กับวิธี Random4SP นั้นวิธี MedialPoint สามารถสังเคราะห์ท่าจับได้มากกว่าวิธี Random4SP เป็นอย่างมากถึงระดับเป็นร้อยเท่า ยกเว้นเพียงแค่ว่าวัตถุ Moon เท่านั้นที่วิธี MedialPoint ให้ผลไม่ดีนัก แต่ก็ยังดีกว่าวิธี Random4SP อยู่ดี

เมื่อนำวิธี MedialPoint ไปเปรียบเทียบกับวิธี Uniform จะเห็นได้ว่าวิธี MedialPoint ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าบนวัตถุทุกชนิดยกเว้นวัตถุ Moon ที่วิธี Uniform จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยสามารถสังเคราะห์ท่าจับได้เป็น 5.33 ท่าของวิธี MedialPoint, เป็น 1.24 ท่าของวิธี NearCM และเป็น 49.71 ท่าของวิธี Random4SP ซึ่งจะมีการวิเคราะห์วัตถุ Moon ในหัวข้อถัดๆไป

สำหรับการเปรียบเทียบผลจากวิธี MedialPoint และ NearCM นั้นสามารถแบ่งวัตถุออกเป็น 4 กลุ่มดังนี้



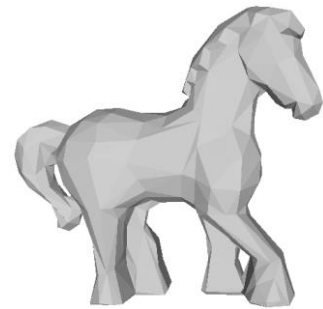
1. กลุ่มวัตถุที่วิธี MedialPoint ทำงานได้ดีกว่าวิธี NearCM เป็นอย่างมาก มีอยู่ 5 วัตถุ ได้แก่ Dog, CatLying, Pony, Seal และ Sprayflask ตามที่แสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างของวัตถุเหล่านี้แล้วจะเห็นได้ว่าเป็นวัตถุเหล่านี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อน มีความโค้งเว้า และมีส่วนย่อยๆที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเช่น ส่วนหัวกับส่วนลำตัว เป็นต้น



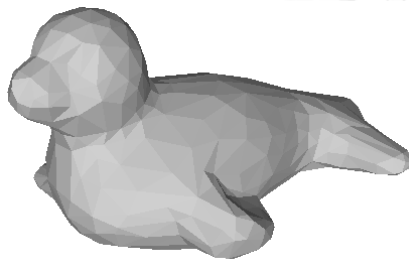
(a) Dog



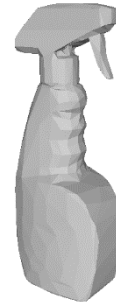
(b) CatLying



(c) Pony



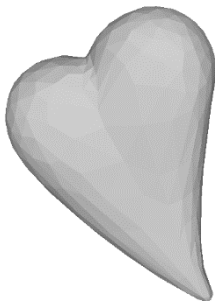
(d) Seal



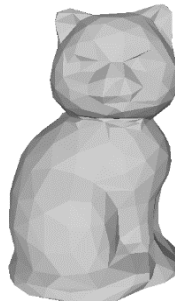
(e) Sprayflask

รูปที่ 4.14 วัตถุที่วิธี MedialPoint ทำงานได้ดีกว่าวิธี NearCM เป็นอย่างมาก

2. กลุ่มวัตถุที่วิธี MedialPoint ทำงานได้ดีกว่าวิธี NearCM อยู่เล็กน้อย มีอยู่ 3 วัตถุ ได้แก่ Heart1, CatSitting และ CokePlasticSmallGrasp ตามที่แสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างของวัตถุเหล่านี้แล้วจะเห็นได้ว่าวัตถุเหล่านี้มีโครงสร้างที่สูงยาว บริเวณพื้นผิวค่อนข้างจะเรียบไม่ค่อยมีส่วนที่ยื่นออกมาหรือเว้าเข้าเท่าไร



(a) Heart1



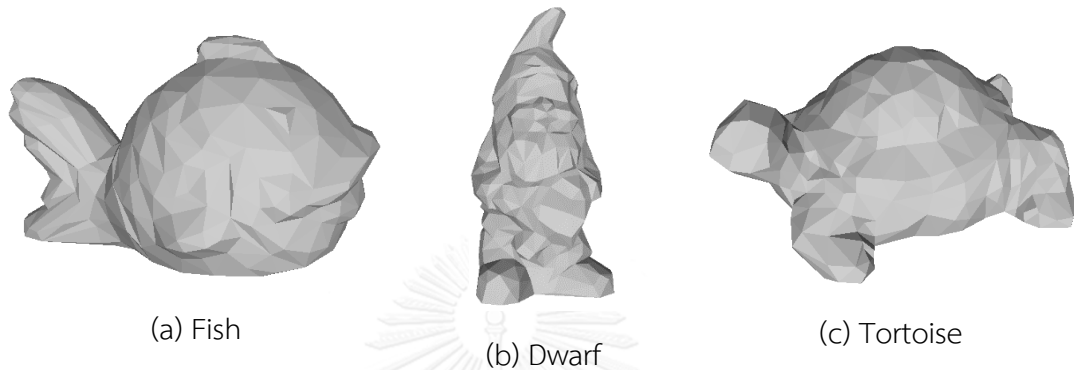
(b) CatSitting



(c) CokePlasticSmallGrasp

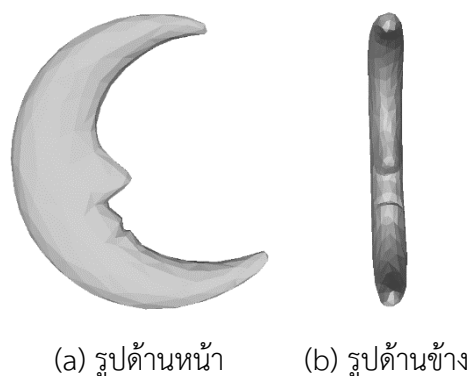
รูปที่ 4.15 วัตถุที่วิธี MedialPoint ทำงานได้ดีกว่าวิธี NearCM อยู่เล็กน้อย

3. กลุ่มวัตถุที่วิธี MedialPoint ทำงานได้แย่กว่าวิธี NearCM อยู่เล็กน้อย มีอยู่ 3 วัตถุ ได้แก่ Fish, Dwarf และ Tortoise ตามที่แสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างของวัตถุเหล่านี้แล้วจะเห็นได้ว่าวัตถุเหล่านี้เป็นวัตถุที่มีรูปร่างที่คล้ายกับรูปร่างพื้นฐาน โดย Fish จะเหมือนกับทรงกลมที่มีหางยื่นออกมา Dwarf จะเหมือนทรงกระบอกสั้นๆไม่ค่อยยาวนัก ส่วน Tortoise นั้นจะเหมือนทรงกลมที่มีหัวและขาเล็กๆยื่นออกมา

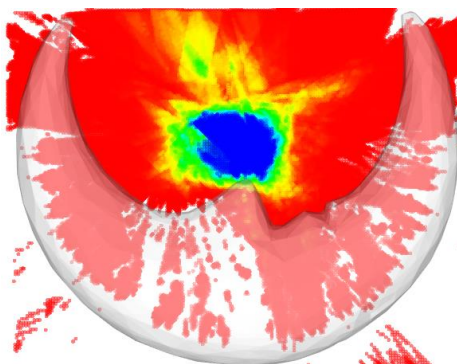


รูปที่ 4.16 วัตถุที่วิธี MedialPoint ทำงานได้แย่กว่าวิธี NearCM อยู่เล็กน้อย

4. วัตถุ Moon โดยเมื่อพิจารณารูปในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าวิธี Uniform ทำงานได้ดีที่สุด รองลงมาคือวิธี NearCM ที่ทำงานได้ดีเหมือนกันแต่ไม่เท่าวิธี Uniform ส่วนวิธี MedialPoint นั้นทำงานได้แย่มาก ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างของวัตถุ Moon ในรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าวัตถุ Moon นั้นมีรูปร่างที่บางเป็นอย่างมาก จึงทำให้ไม่ค่อยมีท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันที่มีจุดร่วมอยู่ภายในวัตถุ Moon โดยท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันส่วนใหญ่จะมีจุดร่วมอยู่ที่บริเวณจุดศูนย์กลางมวลซึ่งอยู่ข้างนอกวัตถุ Moon ตามรูปที่ 4.18 ซึ่งเป็นรูปแสดงจำนวนท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันที่เกิดจากจุดร่วมจุดต่างๆ



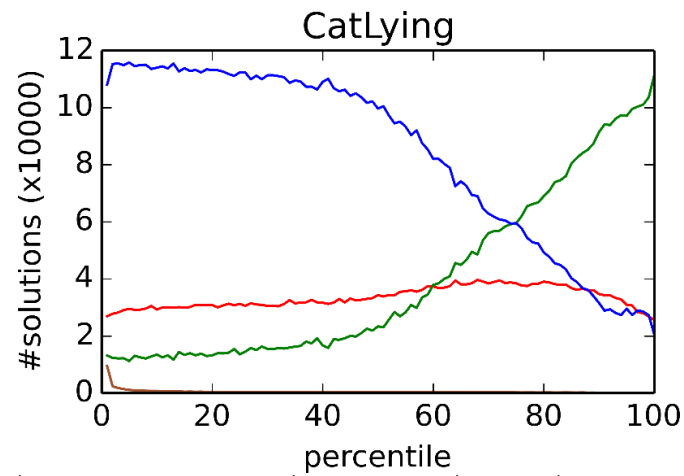
รูปที่ 4.17 รูปด้านหน้าและด้านข้างของวัตถุ Moon



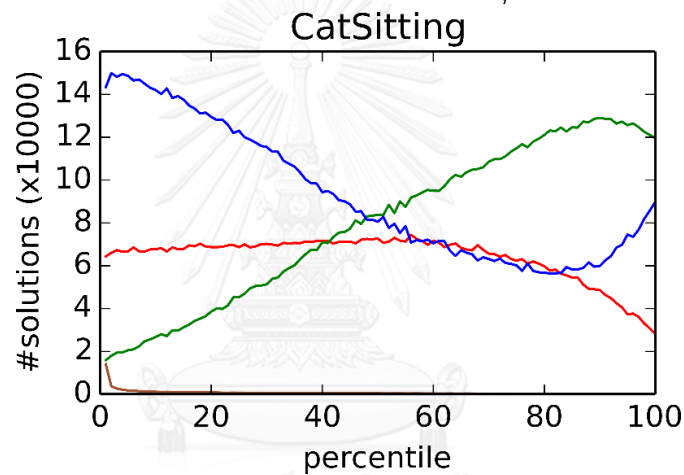
รูปที่ 4.18 รูปแสดงจำนวนท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันของวัตถุ Moon ที่เกิดจากจุดรวมต่างๆ โดยจุดสีน้ำเงิน, เขียว, เหลือง และแดง หมายถึงจุดรวมที่ทำให้เกิดท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันเป็นจำนวนมากไปหาน้อยตามลำดับ

4.2.2. ผลการทดลองแสดงคุณภาพของท่าจับที่สร้างได้จากวิธีต่างๆ

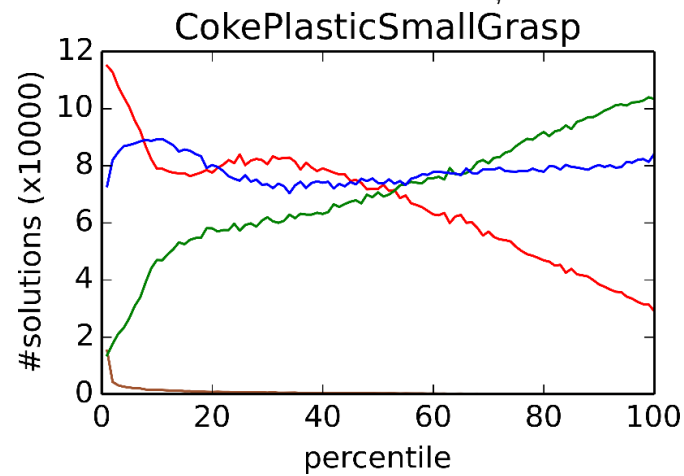
นอกจากความเร็วในการสังเคราะห์ท่าจับแล้ว ยังมีอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญนั่นก็คือคุณภาพของท่าจับที่สังเคราะห์ขึ้นมา นั่นเอง เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของท่าจับที่ถูกสร้างขึ้นโดยแต่ละวิธี เราได้คำนวณคุณภาพท่าจับของท่าจับที่สร้างได้ทั้งหมดจากทุกการทดลอง โดยใช้ความสามารถในการต้านทานเวรชันภายนอกในทิศทางใดๆ (หัวข้อที่ 2.5.2) เป็นตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับ สำหรับวัตถุแต่ละชนิดเราได้นำคุณภาพท่าจับของท่าจับทั้งหมดจากการทดลองวิธีละ 30 ครั้งทุกวิธี (รวมเป็นการทดลองทั้งหมด 120 การทดลอง) มาจัดเรียงจากค่าน้อยไปค่ามากเพื่อใช้หาค่าคุณภาพท่าจับที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึงเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 100 จากนั้นจึงพล็อตกราฟในรูปที่ 4.19 ถึง รูปที่ 4.29 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความถี่จำนวนท่าจับที่มีคุณภาพท่าจับตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 100 โดยความถี่นี้จะนับรวมจากการทดลองทั้ง 30 ครั้งของแต่ละวิธี แกน X คือเปอร์เซ็นต์ไทล์ของคุณภาพท่าจับตั้งแต่ 0 ถึง 100 แกน Y คือจำนวนท่าจับที่สร้างได้ โดยเส้นกราฟสีน้ำตาล, สีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน แสดงถึงจำนวนท่าจับที่สร้างโดยวิธี Random4SP, Uniform, NearCM และ MedialPoint ตามลำดับ สังเกตได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟแต่ละสีนั้นจะมีค่าเท่ากับผลรวมจำนวนท่าจับที่สร้างได้ภายในเวลา 0.5 วินาทีจากการทดลองทั้ง 30 ครั้งของแต่ละวิธี



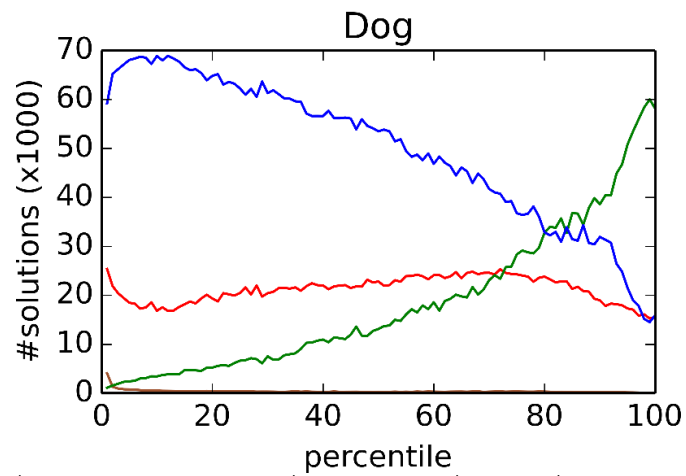
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ CatLying



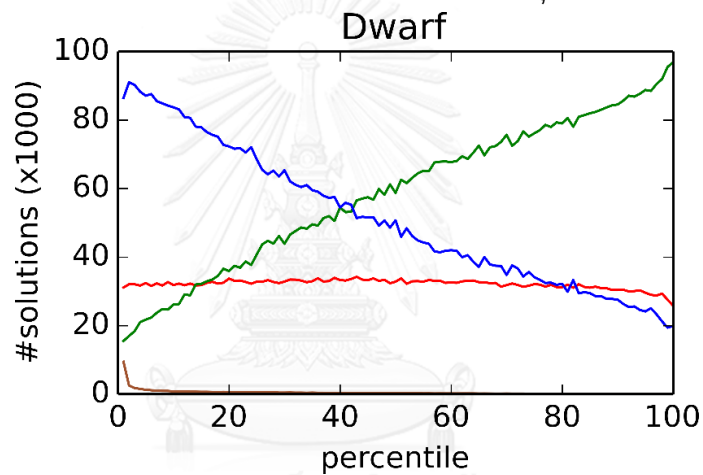
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ CatSitting



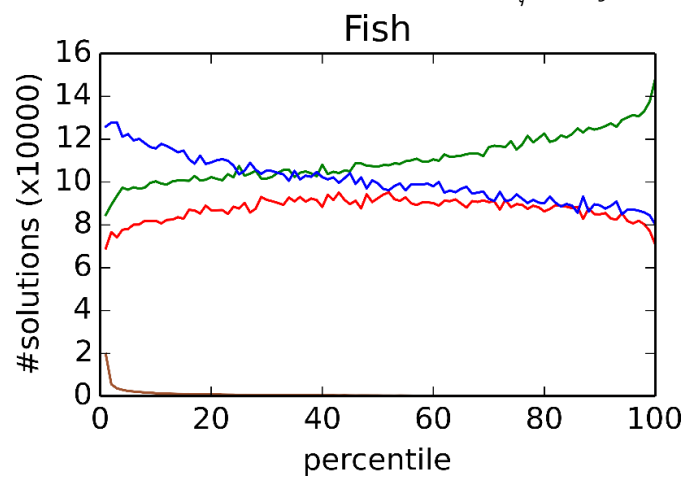
รูปที่ 4. กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ CokePlasticSmallGrasp



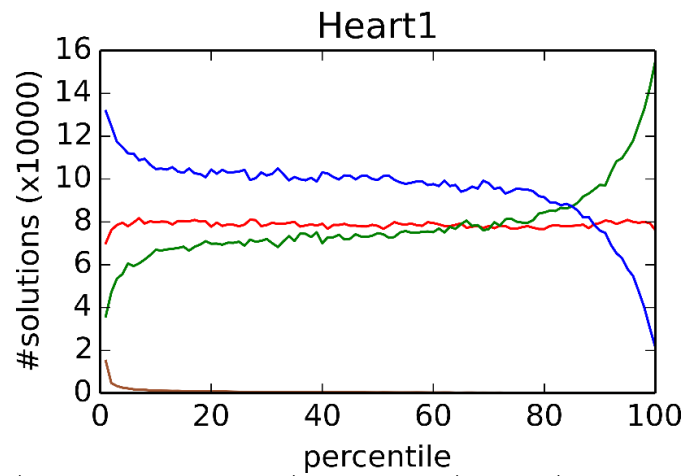
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Dog



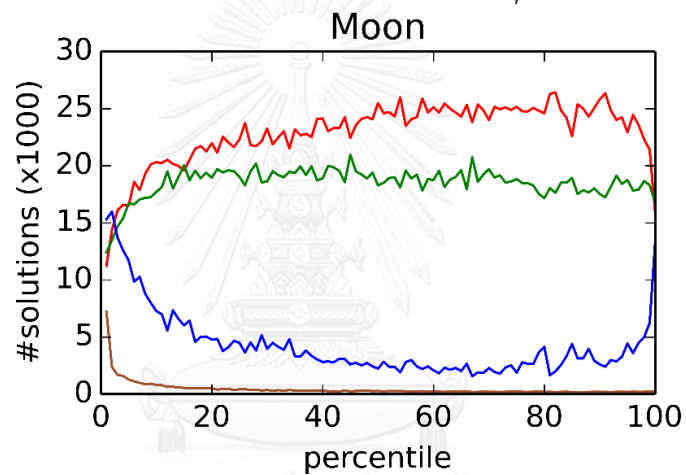
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Dwarf



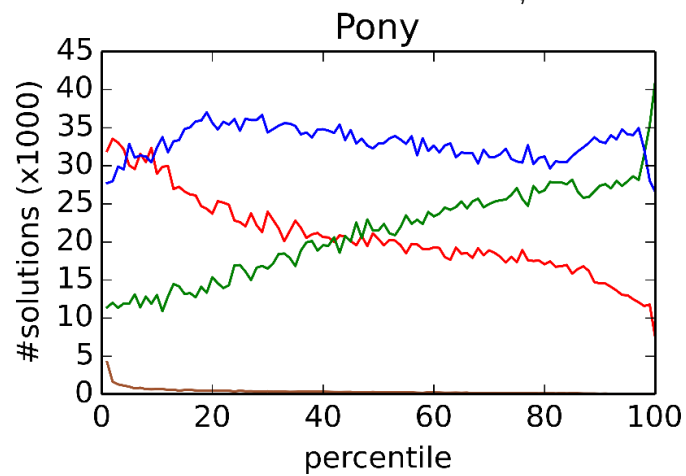
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Fish



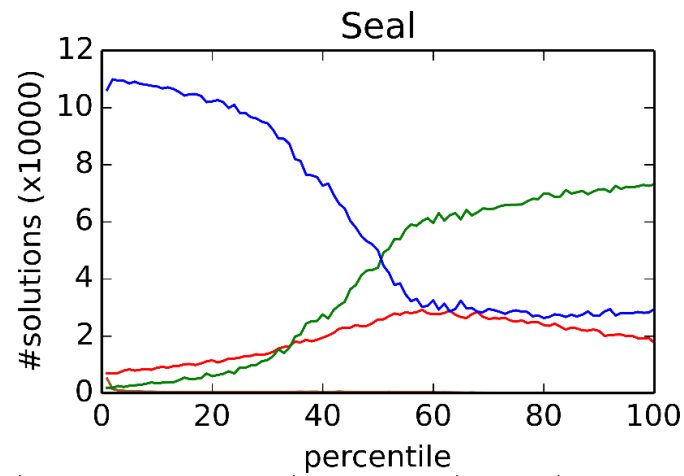
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Heart1



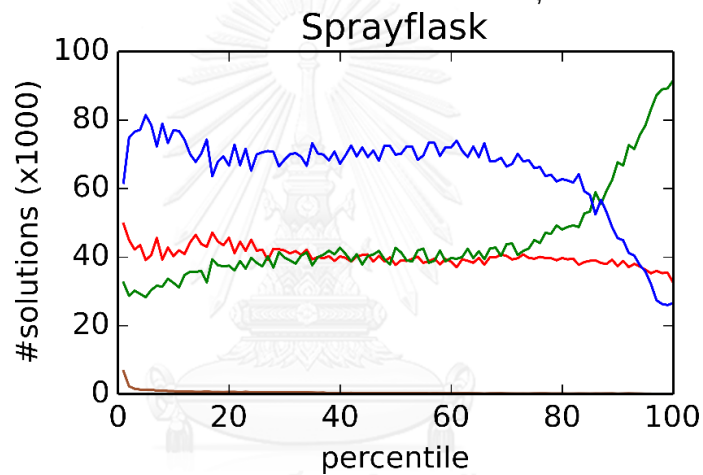
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Moon



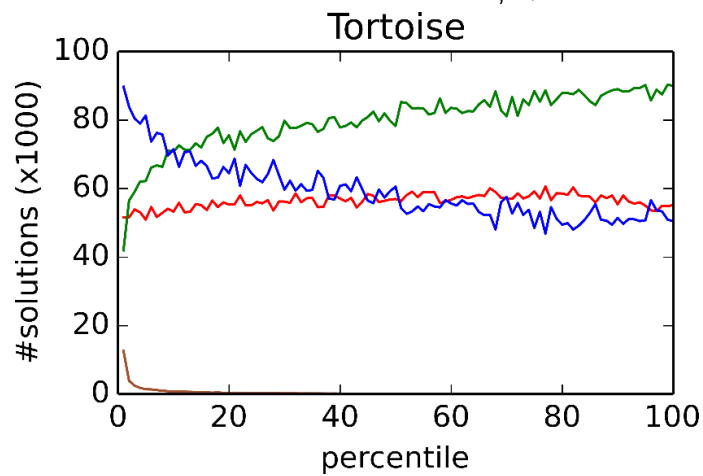
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Pony



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Seal



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Sprayflask



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความถี่จำนวนท่าจับที่สร้างได้ที่มีคุณภาพท่าจับ ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 0 ถึง 100 ของวัตถุ Tortoise

จากกราฟในรูปที่ 4.19 ถึง รูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่ากราฟเส้นสีเขียวซึ่งคือวิธี NearCM นั้นมีแนวโน้มสร้างท่าจับที่มีคุณภาพสูงได้มากกว่าท่าจับที่มีคุณภาพต่ำกว่า เนื่องจากกราฟมีแนวโน้มสูงขึ้นนั่นเอง และเมื่อพิจารณาเฉพาะท่าจับที่มีคุณภาพสูงจะเห็นว่าวิธี NearCM สามารถสร้างท่าจับที่มีคุณภาพสูงๆได้มากกว่าวิธีอื่นๆสำหรับวัตถุเกือบทุกชนิด ยกเว้นเพียงวัตถุ Pony ที่วิธี MedialPoint (กราฟเส้นสีน้ำเงิน) สร้างท่าจับที่มีคุณภาพสูงได้เยอะกว่า และวัตถุ Moon ที่วิธี Uniform (กราฟเส้นสีแดง) สร้างท่าจับที่มีคุณภาพสูงได้มากกว่า

นอกจากนี้หากสังเกตกราฟเส้นสีน้ำตาลซึ่งคือวิธี Random4SP จะเห็นว่านอกจากวิธีนี้จะสร้างท่าจับได้น้อยกว่าวิธีอื่นในเวลาเท่ากันแล้ว ท่าจับที่ได้จากวิธีนี้ส่วนใหญ่ยังเป็นท่าจับที่มีคุณภาพต่ำอีกด้วย โดยกราฟเส้นสีน้ำตาลจะสูงบริเวณที่คุณภาพท่าจับอยู่ประมาณเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 0 ถึงเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 5 นอกจากนี้วิธี Random4SP แทบจะสร้างท่าจับที่มีคุณภาพท่าจับตั้งแต่เปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 10 ขึ้นไปไม่ได้เลยอีกด้วย



บทที่ 5

สรุปการวิจัยและแนวทางวิจัยในขั้นถัดไป

5.1. สรุปการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ที่สามารถสร้างท่าจับที่มีคุณภาพสูงได้เป็นจำนวนมากภายในเวลาอันสั้น โดยอาศัยการค้นหาเฉพาะท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันซึ่งเป็นท่าจับที่มีคุณภาพสูงอยู่แล้ว และยังสามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย วิธีการค้นหาท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันจะเริ่มจากการเลือกจุดขึ้นมาเพื่อใช้เป็นจุดร่วม แล้วจึงทำการค้นหาท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันที่มีจุดที่เลือกขึ้นมาเป็นจุดร่วม ซึ่งการเลือกจุดร่วมแต่ละจุดจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้นำเสนอวิธีการเลือกจุดร่วมที่ทำให้สามารถสร้างท่าจับได้เป็นจำนวนมากในเวลาอันสั้น และได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอกับวิธีการอื่นๆ ทั้งในแง่ของจำนวนท่าจับที่สร้างได้ภายในเวลาเท่ากัน และคุณภาพของท่าจับที่สร้างขึ้นมา

โดยขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกันนั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับโดยการสุ่มจุดสัมผัส 4 จุดอย่างเห็นได้ชัดทั้งในด้านจำนวนท่าจับที่สร้างได้ และคุณภาพของท่าจับที่สร้างได้ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบวิธีการเลือกจุดร่วมสำหรับใช้ค้นหาท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน จะเห็นว่าในแง่ของจำนวนท่าจับที่สร้างได้นั้นวิธีการเลือกจุดร่วมมาจากแกนกลางของวัตถุมีแนวโน้มจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีเลือกจุดร่วมแบบอื่น ส่วนในแง่ของคุณภาพของท่าจับที่สร้างขึ้นมานั้นวิธีการเลือกจุดร่วมใกล้กับจุดศูนย์กลางมวลจะสามารถสร้างท่าจับที่มีคุณภาพสูงกว่าวิธีเลือกจุดร่วมแบบอื่น

5.2. แนวทางวิจัยในขั้นถัดไป

ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นจะสังเกตได้ว่าผลลัพธ์ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างโครงสร้างของวัตถุเป็นอย่างมาก โดยแต่ละวัตถุจะมีวิธีเลือกจุดร่วมที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดแตกต่างกันไป ดังนั้นแนวทางวิจัยในขั้นถัดไปจึงควรลองทำการทดลองกับวัตถุที่หลากหลายขึ้น แล้วหาข้อสังเกตที่ใช้เลือกว่าวัตถุนั้นควรเลือกใช้วิธีเลือกจุดร่วมวิธีไหนที่จะทำให้การสังเคราะห์ท่าจับมีประสิทธิภาพสูงที่สุด รวมถึงการคิดค้นวิธีเลือกจุดร่วมแบบใหม่ขึ้นมาด้วย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีสังเคราะห์ท่าจับแบบต่างๆ ในแง่ของคุณภาพท่าจับโดยใช้ความสามารถในการต้านทานเวรชันภายนอกในทิศทางใดๆ เป็นตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับ ซึ่งยังมีตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับอื่นๆ อีกที่น่าจะนำมาพิจารณาเปรียบเทียบคุณภาพท่าจับที่ได้จากขั้นตอนวิธีต่างๆ นอกจากนี้ยังมีเรื่องที่น่าสนใจในการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีต่างๆ อีก นั่นคือความหลากหลายของท่าจับที่สร้างได้ว่าครอบคลุมพื้นผิวของวัตถุมากน้อยขนาดไหน

การสังเคราะห์ท่าจับเป็นเพียงขั้นตอนหนึ่งของการจับวัตถุของหุ่นยนต์เท่านั้น ซึ่งเราต้องการผลลัพธ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ท่าจับเป็นจำนวนมาก เพราะบางท่าจับนั้นเมื่อนำไปใช้ต่อในขั้นตอนการวางแผนการจับจะไม่สามารถวางแผนการจับได้เนื่องจากข้อจำกัดของมือหุ่นยนต์และสภาพแวดล้อม อาจมองได้ว่าท่าจับที่สังเคราะห์ขึ้นมาแต่ไม่สามารถนำไปวางแผนการจับได้เหล่านี้เป็นการทำงานที่สูญเปล่า ดังนั้นแนวทางในการวิจัยขั้นถัดไปจึงควรนำเงื่อนไขเบื้องต้นของมือหุ่นยนต์และสภาพแวดล้อมเข้ามาพิจารณาในการสังเคราะห์ท่าจับด้วย เพื่อลดการประมวลผลที่สูญเปล่าไปกับท่าจับที่ไม่สามารถนำไปวางแผนการจับได้ ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมดีขึ้น



รายการอ้างอิง

- [1] S. El-Khoury and A. Sahbani, "A Sufficient Condition For Computing N-Finger Force-Closure Grasps of 3D Objects," in *2008 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 2008, pp. 791–796.
- [2] J. K. Salisbury and B. Roth, "Kinematic and Force Analysis of Articulated Mechanical Hands," *J. Mech. Des.*, vol. 105, no. 1, pp. 35–41, Mar. 1983.
- [3] B. Mishra, J. T. Schwartz, and M. Sharir, "On the existence and synthesis of multifinger positive grips," *Algorithmica*, vol. 2, no. 1–4, pp. 541–558, Nov. 1987.
- [4] A. Bicchi, "On the Closure Properties of Robotic Grasping," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 14, pp. 319–334, 1995.
- [5] A. Bicchi and V. Kumar, "Robotic grasping and contact: a review," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00*, 2000, vol. 1, pp. 348–353 vol.1.
- [6] Y. Zheng and C.-M. Chew, "Distance Between a Point and a Convex Cone in - Dimensional Space: Computation and Applications," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 25, no. 6, pp. 1397–1412, Dec. 2009.
- [7] X. Markenscoff, L. Ni, and C. H. Papadimitriou, "The Geometry of Grasping," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 9, no. 1, pp. 61–74, Feb. 1990.
- [8] J. Ponce, S. Sullivan, A. Sudsang, J. Boissonnat, and J.-P. Merlet, "On Computing Four-Finger Equilibrium and Force-Closure Grasps of Polyhedral Objects," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 16, pp. 11–35, 1996.
- [9] N. Niparnan and A. Sudsang, "Fast computation of 4-fingered force-closure grasps from surface points," in *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings, 2004*, vol. 4, pp. 3692–3697 vol.4.
- [10] C. Ferrari and J. Canny, "Planning optimal grasps," in *1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1992. Proceedings, 1992*, pp. 2290–2295 vol.3.

- [11] M. A. Roa and R. Suárez, "Grasp quality measures: review and performance," *Auton. Robots*, pp. 1–24, Jul. 2014.
- [12] A. Miller and P. K. Allen, "Examples of 3D grasp quality computations," in *1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999. Proceedings, 1999*, vol. 2, pp. 1240–1246 vol.2.
- [13] C. B. Barber, D. P. Dobkin, and H. Huhdanpaa, "The Quickhull Algorithm for Convex Hulls," *ACM Trans Math Softw*, vol. 22, no. 4, pp. 469–483, Dec. 1996.
- [14] Y. Zheng, M. C. Lin, and D. Manocha, "A fast n-dimensional ray-shooting algorithm for grasping force optimization," in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2010, pp. 1300–1305.
- [15] Y. Zheng, "An Efficient Algorithm for a Grasp Quality Measure," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 29, no. 2, pp. 579–585, Apr. 2013.
- [16] A. Sahbani, S. El-Khoury, and P. Bidaud, "An overview of 3D object grasp synthesis algorithms," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 60, no. 3, pp. 326–336, Mar. 2012.
- [17] J. Bohg, A. Morales, T. Asfour, and D. Kragic, "Data-Driven Grasp Synthesis : A Survey," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 30, no. 2, pp. 289–309, Apr. 2014.
- [18] C. Borst, M. Fischer, and G. Hirzinger, "Grasping the dice by dicing the grasp," in *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings, 2003*, vol. 4, pp. 3692–3697 vol.3.
- [19] N. Niparnan and A. Sudsang, "Positive Span of Force and Torque Components of Four-Fingered Three-Dimensional Force-Closure Grasps," in *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007*, pp. 4701–4706.
- [20] N. Niparnan, A. Sudsang, and P. Chongstitvatana, "Positive Span of Force and Torque Components in Three-Dimensional Four-Finger Force-Closure Grasps," *Adv. Robot.*, vol. 22, no. 13–14, pp. 1497–1520, 2008.
- [21] S. El-Khoury and A. Sahbani, "On computing robust n-finger force-closure grasps of 3D objects," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009. ICRA '09, 2009*, pp. 2480–2486.

- [22] C. Sangkhavijit, N. Niparnan, and P. Chongstitvatana, "Computing 4-Fingered Force-Closure Grasps from surface Points Using Genetic Algorithm," in *2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 2006, pp. 1–5.
- [23] A. Miller and P. K. Allen, "Graspi! A versatile simulator for robotic grasping," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 11, no. 4, pp. 110–122, Dec. 2004.
- [24] R. Diankov, "Automated Construction of Robotic Manipulation Programs," Carnegie Mellon University, Robotics Institute, 2010.
- [25] A. T. Miller, S. Knoop, H. I. Christensen, and P. K. Allen, "Automatic grasp planning using shape primitives," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03*, 2003, vol. 2, pp. 1824–1829 vol.2.
- [26] C. Goldfeder, P. K. Allen, C. Lackner, and R. Pelosof, "Grasp Planning via Decomposition Trees," in *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 4679–4684.
- [27] K. Huebner, S. Ruthotto, and D. Kragic, "Minimum volume bounding box decomposition for shape approximation in robot grasping," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008*, 2008, pp. 1628–1633.
- [28] M. Przybylski, T. Asfour, and R. Dillmann, "Unions of balls for shape approximation in robot grasping," in *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2010, pp. 1592–1599.
- [29] M. Przybylski, T. Asfour, and R. Dillmann, "Planning grasps for robotic hands using a novel object representation based on the medial axis transform," in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2011, pp. 1781–1788.
- [30] M. Przybylski, M. Wachter, T. Asfour, and R. Dillmann, "A skeleton-based approach to grasp known objects with a humanoid robot," in *2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2012, pp. 376–383.
- [31] R. Balasubramanian, L. Xu, P. D. Brook, J. R. Smith, and Y. Matsuoka, "Human-guided grasp measures improve grasp robustness on physical robot," in *2010*

- IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2010, pp. 2294–2301.
- [32] R. Balasubramanian, L. Xu, P. D. Brook, J. R. Smith, and Y. Matsuoka, “Physical Human Interactive Guidance: Identifying Grasping Principles From Human-Planned Grasps,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 28, no. 4, pp. 899–910, Aug. 2012.
- [33] E. Rombokas, P. Brook, J. R. Smith, and Y. Matsuoka, “Biologically inspired grasp planning using only orthogonal approach angles,” in *2012 4th IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 2012, pp. 1656–1661.
- [34] H. Blum, “A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape,” *Models Percept. Speech Vis. Form*, pp. 362–380, 1967.
- [35] J. Ma, S. W. Bae, and S. Choi, “3D medial axis point approximation using nearest neighbors and the normal field,” *Vis. Comput.*, vol. 28, no. 1, pp. 7–19, Apr. 2011.
- [36] N. Niparnan, T. Phoka, and A. Sudsang, “Computing Frictionless Force-Closure Grasps of 2D Objects from Contact Point Set,” in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2006. ROBIO '06*, 2006, pp. 872–877.
- [37] D. Ding and S. Wang, “Computation of 3-D form-closure grasps,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 17, no. 4, pp. 515–522, Aug. 2001.
- [38] A. Kasper, Z. Xue, and R. Dillmann, “The KIT object models database: An object model database for object recognition, localization and manipulation in service robotics,” *Int. J. Robot. Res.*, p. 0278364912445831, May 2012.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวัชรพล วัชรวิเศษกุล เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จากภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ณ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา ในปีการศึกษา 2556 ถึง 2557



