

(โครงร่างวิทยานิพนธ์)
วิธีการสังเคราะห์ทำจับที่มีคุณภาพสูงอย่างรวดเร็ว

นายวัชรพล วัชรวิเศษกุล

โครงร่างวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(THESIS PROPOSAL)

A Fast Approach in Generating High Quality Grasps

Mr. Watcharapol Watcharawisetkul

A Thesis Proposal 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.นันทิ นิภานันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับโครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรณวิทย์ สุตแสง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิ นิภานันท์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ณัฐพงศ์ ชินธเนศ)

วัชรพล วัชรวิเศษกุล : วิธีการสังเคราะห์ท่าจับที่มีคุณภาพสูงอย่างรวดเร็ว (A Fast Approach in Generating High Quality Grasps) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. นัทธี นิภาพันธ์, 15 หน้า.

No data found

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5670373521 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS:

WATCHARAPOL WATCHARAWISETKUL: A Fast Approach in Generating High
Quality Grasps. ADVISOR: ASST. PROF.NATTEE NIPARNAN, Ph.D., 15 pp.

No data found

Department: Computer Engineering Student's Signature

Field of Study: Computer Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	2
2.1. แบบจำลองของนิ้ว (finger model).....	2
2.2. แรง (force), แรงบิด (torque) และเวรณซ์ (wrench).....	3
2.3. สภาวะสมดุล (equilibrium) และคุณสมบัติปิดของแรง (force closure).....	3
2.4. เรขาคณิตของเส้นตรง (line geometry).....	4
2.5. ปริภูมิเวรณซ์ของการจับ (grasp wrench space).....	5
2.6. ความสามารถในการต้านทานเวรณซ์ภายนอกในทิศทางใดๆ.....	5
3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
4. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	9
5. แนวคิดของงานวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	9
5.1. แนวคิดของการวิจัย.....	9
5.2. วิธีวัดผลการทดลอง.....	10
6. ขอบเขตของงานวิจัย.....	11
7. ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	12
รายการอ้างอิง.....	13
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	15

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

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

เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหาการจับของหุ่นยนต์ เราสามารถแบ่งปัญหาการหาท่าจับของหุ่นยนต์ออกเป็นส่วนย่อยได้แก่ การสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ และการวางแผนการจับของหุ่นยนต์ โดยการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์นั้นจะเป็นการหาจุดจับบนวัตถุเท่านั้น ส่วนการวางแผนการจับของหุ่นยนต์จะเป็นการวางแผนว่าจะต้องควบคุมแขนและมือของหุ่นยนต์อย่างไร เพื่อให้นิ้วของหุ่นยนต์สัมผัสกับวัตถุที่จุดจับที่ได้จากการสังเคราะห์ท่าจับ ซึ่งสำหรับมือแต่ละชนิดก็จะมีวางแผนท่าจับที่แตกต่างกัน จะสังเกตได้ว่าขั้นตอนการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์นั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลลักษณะของมือหุ่นยนต์ก็ได้ และยังสามารถนำคำตอบไปใช้ในการวางแผนการจับของมือหุ่นยนต์ที่แตกต่างกันได้อีกด้วย

หากพิจารณาการจับวัตถุหนึ่งๆ ท่าจับที่เป็นไปได้ทั้งหมดนั้นมีความหลากหลายมาก ซึ่งก็มีทั้งท่าจับที่ดีและไม่ดี ท่าจับที่ดีนั้นจะต้องสามารถทนแรงและแรงบิดภายนอกในทิศทางต่างๆได้ นอกจากจะแบ่งท่าจับออกเป็นท่าจับที่ดีและท่าจับที่ไม่ดีแล้วนั้น ท่าจับที่ดีแต่ละท่าก็มีคุณภาพที่ไม่เท่ากัน ในการพิจารณาคุณภาพของท่าจับนั้นก็มิเคยมีการพิจารณามากมาย ไม่ว่าจะเป็นความสามารถในการทนต่อแรงกระทำภายนอก, ความคงทนต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสัมผัส และความเข้ากันได้กับงานที่จะทำ เป็นต้น การจะเลือกท่าจับที่มีคุณภาพดีที่สุดเพียงท่าเดียวนั้นไม่เพียงพอ เพราะอาจจะเป็นท่าจับที่มีคุณภาพไม่ดีในเกณฑ์พิจารณาอื่น หรืออาจจะไม่สามารถนำไปวางแผนการจับได้ เช่นท่าจับที่สามารถทนทานต่อแรงภายนอกได้มากที่สุดนั้น กลไกของมือหุ่นยนต์อาจจะไม่สามารถจับใน

ลักษณะนั้นได้ ในการสังเคราะห์ท่าจับนั้นจึงต้องการท่าจับที่มีคุณภาพในระดับหนึ่งหลายๆท่า เพื่อใช้ในการวางแผนการจับของหุ่นยนต์ และพิจารณาคุณภาพด้วยเกณฑ์พิจารณาอื่นต่อไป

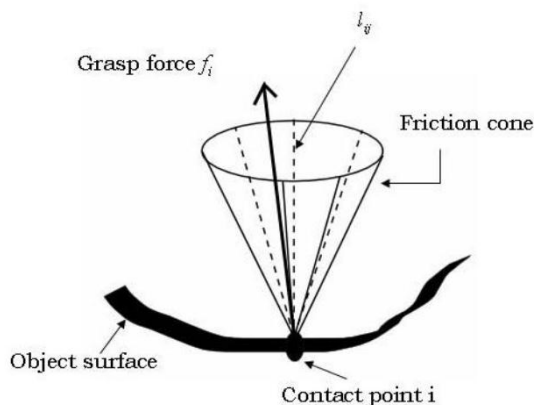
การหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ในบางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องปฏิบัติด้วยความรวดเร็ว เช่นการรับสิ่งของที่มนุษย์ยื่นให้ หากมนุษย์ต้องรอนานจะทำให้เกิดความไม่พอใจได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับวัตถุที่หนักหรือมีอุณหภูมิสูง วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นไปที่การนำเสนอขั้นตอนวิธีสำหรับสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ที่สามารถสร้างท่าจับที่มีคุณภาพดีเป็นจำนวนมากได้ในเวลาอันสั้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. แบบจำลองของนิ้ว (finger model)

แบบจำลองของนิ้วสำหรับใช้คำนวณท่าจับของหุ่นยนต์นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ นิ้วแข็ง (hard finger) ซึ่งสามารถออกได้เพียงแรงที่จุดสัมผัสเท่านั้น ไม่สามารถออกแรงบิดได้ และนิ้วอ่อน (soft finger) ซึ่งสามารถออกได้ทั้งแรงและแรงบิดที่จุดสัมผัส นอกจากนี้ในงานวิจัยเกี่ยวกับการจับของหุ่นยนต์ส่วนใหญ่นิยามกำหนดให้นิ้วสามารถออกแรงกระทำกับวัตถุเป็นค่าศูนย์หรือบวกเท่านั้น กล่าวคือนิ้วไม่สามารถออกแรงดึงวัตถุได้ หรือเป็นนิ้วที่ไม่มีความเหนียวนั่นเอง

นอกจากนี้สำหรับนิ้วแข็งหากพิจารณาแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสของนิ้วแล้วยังสามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภทคือ ผิวสัมผัสที่ไม่มีแรงเสียดทาน และผิวสัมผัสที่มีแรงเสียดทาน สำหรับผิวสัมผัสที่ไม่มีแรงเสียดทานนั้นนิ้วจะสามารถออกแรงกระทำกับวัตถุได้ในทิศทางตั้งฉากกับผิวสัมผัสเท่านั้น ในขณะที่ผิวสัมผัสที่มีแรงเสียดทานนั้นทิศทางของแรงที่นิ้วสามารถกระทำกับวัตถุโดยไม่ทำให้นิ้วเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับวัตถุนั้นจะถูกกำหนดโดยแรงเสียดทาน แบบจำลองแรงเสียดทานที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้ในงานด้านการจับของหุ่นยนต์นั้นอธิบายโดยใช้กฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) [1] โดยแรงที่นิ้วกระทำกับวัตถุโดยไม่ทำให้นิ้วเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับวัตถุ (f) จะต้องอยู่ในกรวยแรงเสียดทาน (friction cone) ซึ่งเป็นกรวยที่มีจุดยอดอยู่ที่จุดสัมผัสและมีเส้นตั้งฉากกับผิวสัมผัสเป็นแกนหมุน โดยมีครึ่งมุม (half angle) $\theta = \tan^{-1} \mu$ โดยที่ μ คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของนิ้วและวัตถุ



รูปที่ 1 [21] แรงที่นิ้วกระทำกับวัตถุ (f_i) ที่อยู่ภายในกรวยแรงเสียดทาน

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

แรงที่นิ้วออกไปที่วัตถุนอกจากจะเป็นการพยายามทำให้วัตถุเคลื่อนที่แล้ว ยังเป็นการพยายามทำให้วัตถุหมุนอีกด้วย ซึ่งเราสามารถวิเคราะห์การหมุนได้ด้วยแรงบิดหรือกล่าวคือเมื่อนิ้วออกแรงไปยังวัตถุที่จุดสัมผัสจะทำให้เกิดแรงบิดขึ้นด้วย โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่า $\tau = r \times f$ เมื่อ τ คือแรงบิด, r คือตำแหน่งจุดสัมผัสเทียบกับจุดกำเนิด และ f คือแรงที่กระทำที่จุดสัมผัส ในงานวิจัยการจับของหุ่นยนต์แรงและแรงบิดมักถูกใช้ในการวิเคราะห์ด้วยกันเสมอ จึงนิยมนำแรงและแรงบิดรวมเข้าด้วยกันเรียกว่าเวรณซ์โดยเวรณซ์จะมีค่า $w = [f^T, \tau^T]^T$ เมื่อ w คือเวรณซ์, f คือแรง และ τ คือแรงบิด

2.3. สถานะสมดุล (equilibrium) และคุณสมบัติปิดของแรง (force closure)

การจับของหุ่นยนต์นั้นต้องการให้วัตถุอยู่นิ่งเมื่อเทียบกับมือของหุ่นยนต์หรือก็คือต้องการให้วัตถุอยู่ในสถานะสมดุลนั่นเอง โดยวัตถุจะอยู่ในสถานะสมดุลเมื่อแรงและแรงบิดลัพธ์ที่กระทำกับวัตถุมีค่าเป็นศูนย์ หรือหากพิจารณาด้วยเวรณซ์ก็คือเวรณซ์ลัพธ์ที่กระทำกับวัตถุมีค่าเท่ากับศูนย์นั่นเอง แต่ในบางครั้งท่าจับที่ทำให้วัตถุอยู่ในสถานะสมดุลเพียงอย่างเดียวนั้นอาจไม่เพียงพอ เพราะท่าจับที่ดีควรที่จะสามารถออกแรงต้านทานแรงและแรงลัพธ์ที่กระทำจากภายนอกในทิศทางใดๆได้ด้วย เมื่อกำหนดให้นิ้วสามารถออกแรงได้ไม่จำกัด โดยคุณสมบัตินี้เรียกว่าคุณสมบัติปิดของแรง

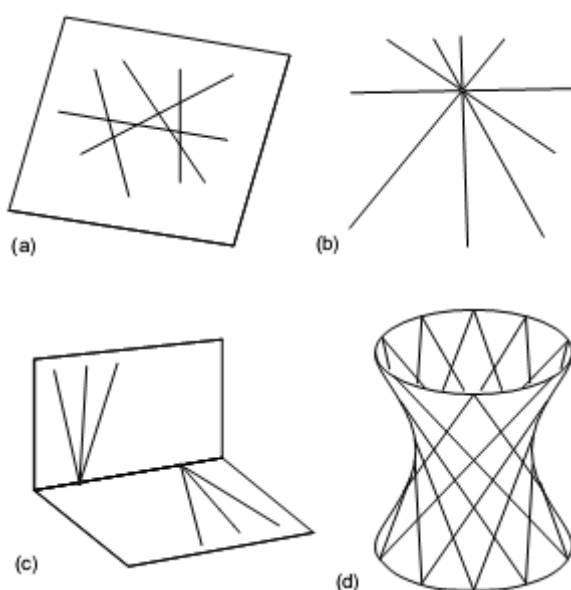
ทฤษฎีบทที่ 1 [2] เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับคุณสมบัติปิดของแรงนั้นคือ มีผลรวมบวกเชิงเส้นของเวรณซ์ตั้งต้นที่มีค่าเท่ากับศูนย์ และเวรณซ์ตั้งต้นแผ่ทั่วปริภูมิเวรณซ์

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

2.4. เรขาคณิตของเส้นตรง (line geometry)

เราสามารถมองเวอร์นซ์เป็นเส้นของการกระทำ (line of action) และสามารถเขียนเส้นของการกระทำให้อยู่ในรูปของพิกัด Plücker ของเส้นได้

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



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

ซึ่งจากรูปแบบทั้ง 4 แบบนี้ จะมีแค่ 3 แบบที่ไม่ใช่อยู่บนระนาบเดียวกันเท่านั้นที่ทำให้เกิดการจับที่อยู่ใต้อาสมมูล

ทฤษฎีบทที่ 4 [4] เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับจุดที่ไม่ได้อยู่บนระนาบเดียวกัน 4 จุดที่ทำให้เกิดการจับที่อยู่ใต้อาสมมูลด้วยแรงที่จุดสัมผัส 4 แรงที่ไม่เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

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

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

โดยเราสามารถแบ่งท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน (concurrent grasps), ท่าจับแบบกลุ่มของเส้น (pencil grasps) และท่าจับแบบเรกิวลัส (regulus grasps) [5] ได้ประยุกต์ทฤษฎีบทที่ 4 โดยสนใจเฉพาะท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน

ทฤษฎีบทที่ 5 [5] เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับจุดที่ไม่ได้อยู่บนระนาบเดียวกัน 4 จุดที่ทำให้เกิดการจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรง นั้นคือ

(P1) มีเส้นที่อยู่ในกรวยแรงเสียดทานสองด้าน 4 เส้นที่ตัดกันที่จุดเดียว และ

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

2.5. ปริภูมิเวรช์ของการจับ (grasp wrench space)

ปริภูมิเวรช์ของการจับคือปริภูมิของเวรช์ทั้งหมดที่ท่าจับนั้นๆ สร้างได้เมื่อกำหนดขนาดสูงสุดของแรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสที่นิ้วสามารถออกได้ โดยวิธีที่นิยมใช้มีอยู่ 2 วิธีได้แก่

1. กำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์ออกแรงรวมกันได้ไม่เกิน 1 หน่วย ด้วยวิธีนี้ปริภูมิเวรช์ของการจับจะเกิดจากคอนเวกซ์ฮัลของเวรช์ที่แต่ละนิ้วสามารถออกได้โดยแรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสของแต่ละนิ้วมีค่าไม่เกิน 1 หน่วย วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้การคำนวณน้อย และสอดคล้องกับมือหุ่นยนต์ที่แต่ละนิ้วใช้แหล่งกำเนิดแรงตัวเดียวกัน

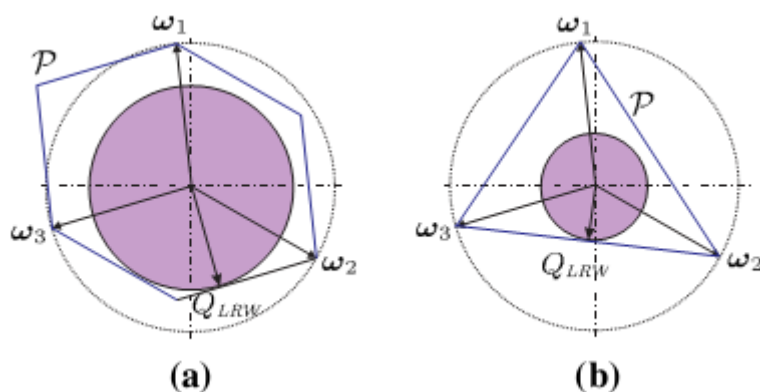
2. กำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์แต่ละนิ้วออกแรงได้ไม่เกิน 1 หน่วย ด้วยวิธีนี้ปริภูมิเวรช์ของการจับจะเกิดจากผลรวมมิงคอฟสกี (Minkowski sum) ของเวรช์ที่แต่ละนิ้วสามารถออกได้โดยแรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสของแต่ละนิ้วมีค่าไม่เกิน 1 หน่วย วิธีนี้มีความสอดคล้องกับมือหุ่นยนต์ที่แต่ละนิ้วมีแหล่งกำเนิดแรงเป็นของตัวเอง และใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าการกำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์ออกแรงรวมกันได้ไม่เกิน 1 หน่วย

2.6. ความสามารถในการต้านทานเวรช์ภายนอกในทิศทางใดๆ

ความสามารถในการต้านทานเวรช์ภายนอกในทิศทางใดๆ [6] เป็นตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับที่ได้รับ ความนิยมเป็นอย่างมาก โดยเป็นขนาดของเวรช์ที่น้อยที่สุดที่ท่าจับไม่สามารถออกได้และทำให้การจับเสียสมดุล ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดยที่ $\partial(GWS)$ คือขอบของปริภูมิเวรช์ของการจับ



รูปที่ 3 [7] ตัวอย่างปริภูมิเวรณซ์ของการจับและความสามารถในการต้านทานเวรณซ์ภายนอกในทิศทางใดๆของการจับวัตถุ 2 มิติโดยใช้นิ้ว 3 นิ้ว (a) กำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์แต่ละนิ้วออกแรงได้ไม่เกิน 1 หน่วย และ (b) กำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์ออกแรงรวมกันได้ไม่เกิน 1 หน่วย

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์นั้นมีความหมายเพื่อหาท่าจับที่มีความคงทนซึ่งต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานอย่างหนึ่งนั่นคือคุณสมบัติปิดของแรง (force closure) กล่าวคือท่าจับนั้นต้องสามารถต้านแรงและแรงบิดที่กระทำจากภายนอกได้จากทุกทิศทาง J. K. Salisbury และ B. Roth [2] ได้นำเสนอเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับคุณสมบัติปิดของแรง นั่นคือมีผลรวมเวกเตอร์เชิงเส้นของเวรณซ์ตั้งต้น (primitive wrench) ที่มีค่าเท่ากับศูนย์ และเวรณซ์ตั้งต้นแผ่ทั่วปริภูมิเวรณซ์ ซึ่งเงื่อนไขนี้มีความหมายเท่ากับจุดกำเนิดของปริภูมิเวรณซ์อยู่ในคอนเวกซ์ฮัลล์ (convex hull) ของเวรณซ์ตั้งต้น [3] ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่นิยมใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติปิดของแรง เพื่อสร้างท่าจับให้มีคุณสมบัติปิดของแรงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับจำนวนนิ้วที่เพียงพอต่อการจับวัตถุที่มีคุณสมบัติปิดของแรง โดย X. Markenscoff, และคณะ [8] ได้พิสูจน์ไว้ว่าสำหรับกรณีทั่วไป ถ้าไม่คำนึงถึงแรงเสียดทานการใช้ 4 นิ้วและ 7 นิ้วนั้นเพียงพอแล้วในการจับวัตถุที่ไม่สมมาตรการหมุนใน 2 มิติ และ 3 มิติตามลำดับให้เกิดคุณสมบัติปิดของแรง และหากพิจารณาถึงแรงเสียดทานด้วยนั้น การใช้ 3 นิ้วและ 4 นิ้วนั้นเพียงพอต่อการจับวัตถุที่ไม่สมมาตรการหมุนใน 2 มิติ และ 3 มิติตามลำดับให้เกิดคุณสมบัติปิดของแรง งานวิจัยที่เกี่ยวกับคุณสมบัติปิดได้ถูกรวบรวมและสรุปไว้ใน [9, 10] และขั้นตอนวิธีสำหรับทดสอบคุณสมบัติปิดของแรงที่มีประสิทธิภาพสูงได้ถูกนำเสนอไว้ใน [11] อย่างไรก็ตามคุณสมบัติปิดของแรงนั้นเป็นการทดสอบเชิงคุณภาพที่ให้คำตอบได้แค่ 2 คำตอบเท่านั้น คือมีหรือไม่มีคุณสมบัติปิดของแรง ทำให้มีงานวิจัยที่คิดค้นการทดสอบเชิงปริมาณหรืออาจเรียกว่าตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับ (grasp quality measure) ซึ่งหนึ่งในตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับที่ได้รับความนิยมอย่างมากรุนั้นคือความสามารถในการต้านทานเวรณซ์ภายนอกในทิศทางใดๆที่ถูกเสนอโดย [6] A. Miller และ P. K. Allen [12] ได้เสนอวิธีคำนวณตัวชี้วัด

คุณภาพท่าจับนี้โดยใช้ขั้นตอนวิธี Quickhull [13] ต่อมา Y. Zheng และคณะ [14, 15] ได้เสนอขั้นตอนวิธีคำนวณความสามารถในการต้านทานเวรณซ์ภายนอกในทิศทางใดๆโดยใช้ขั้นตอนวิธีการยิงเส้นรัศมีซึ่งสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้แล้วยังมีตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับอื่นๆอีกมากมายซึ่งได้ถูกรวบรวมและสรุปไว้ใน [7]

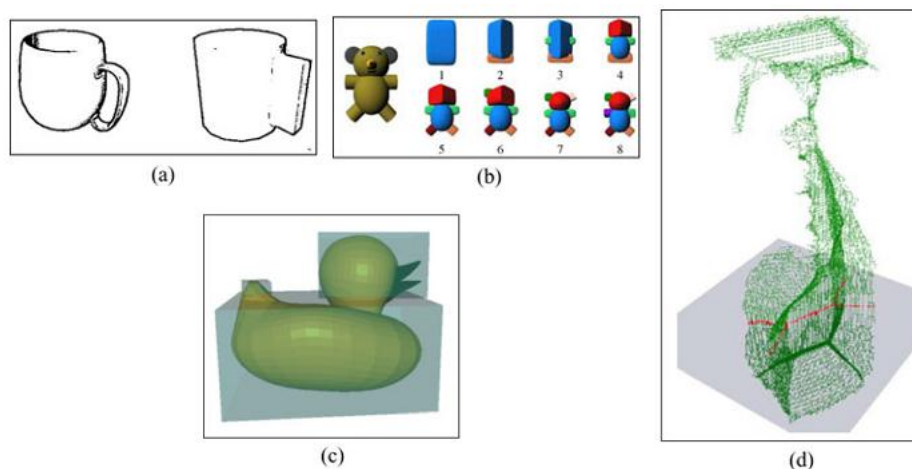
ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีงานวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์อยู่มากมาย ได้มีการรวบรวมงานวิจัยการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์และทำการสรุปไว้ใน [16] โดยแบ่งการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆได้แก่วิธีการเชิงวิเคราะห์ (Analytical approaches) และวิธีการเชิงประจักษ์ (Empirical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

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 [21, 22] ได้เสนอเงื่อนไขที่เพียงพอแต่ไม่จำเป็นสำหรับคุณสมบัติปิดของแรงโดยอาศัยความจริงที่ว่าเวรณซ์ที่เกิดจากจุดจับ 3 จุดใดๆที่ไม่ได้เรียงกันในแนวเส้นตรงจะทำให้เกิดส่วนประกอบหลัก (basis) ของปริภูมิเวรณซ์ ด้วยเงื่อนไขนี้สามารถนำไปใช้หาท่าจับของหุ่นยนต์ที่มีคุณสมบัติปิดของแรงได้อย่างรวดเร็วแล้กว่าการสูญเสียความสมบูรณ์ของคำตอบ กล่าวคือด้วยเงื่อนไขนี้จะสามารถหาท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงได้เพียงบางท่าเท่านั้น

เมื่อพิจารณาการจับวัตถุใน 3 มิติด้วยนิ้ว 4 นิ้วที่ไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกันโดยใช้เรขาคณิตของเส้นตรงจะสามารถแบ่งท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ท่าจับที่ไปยังจุดเดียวกัน

(concurrent grasps), ทำจับแบบกลุ่มของเส้น (pencil grasps) และทำจับแบบเรกิวลัส (regulus grasps)] J. Ponce และคณะ [4] ได้เสนอเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับทำจับ 4 นิ้วที่ไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกันที่มีคุณสมบัติสมดุส และได้เสนอขั้นตอนวิธีในการคำนวณหาทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันไว้ด้วย N. Niparnan และ A. Sudsang [5] ได้เสนอขั้นตอนวิธีแบบสุ่มในการคำนวณหาทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันโดยการเลือกจุดร่วม (concurrent point) แล้วจึงใช้เงื่อนไขบางส่วนจาก [4] เพื่อหาทำจับที่ไปยังจุดเดียวกันสำหรับจุดร่วมที่เลือกมา C. Sangkhavijit และคณะ [23] ได้พัฒนาขั้นตอนวิธีใน [5] ให้ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการคำนวณหาทำจับที่ไปยังจุดเดียวกัน โดยใช้จุดสัมผัสเป็นโครโมโซม

สำหรับวิธีการเชิงประจักษ์นั้นมักจะสร้างทำจับของหุ่นยนต์โดยสนใจรูปร่างของวัตถุเป็นหลัก และมักใช้โครงสร้างของมือหุ่นยนต์มาประกอบการพิจารณาด้วยโดยการทดลองจับวัตถุด้วยมือของหุ่นยนต์ในระบบจำลองการจับของหุ่นยนต์ [24, 25] จึงนิยมอธิบายลักษณะของทำจับด้วยการจัดวางของมือหุ่นยนต์แทนที่จะเป็นตำแหน่งของจุดสัมผัส โดยมีทั้งการใช้การแก้ปัญหาแบบศึกษาสำนึก (heuristic approach) การเรียนรู้จากการจับของมนุษย์, การเรียนรู้โดยการแบ่งประเภทชุดข้อมูลฝึกสอน และการเรียนรู้จากการลองผิดลองถูก A. T. Miller และคณะ [26] ได้เสนอการวางแผนทำจับของหุ่นยนต์โดยการประมาณโครงสร้างของวัตถุเป็นรูปทรงพื้นฐานเช่น ทรงกลม, กรวย, ทรงกระบอก หรือกล่อง การแบ่งวัตถุออกเป็นรูปทรงพื้นฐานย่อยๆ เพื่อใช้วางแผนทำจับของหุ่นยนต์ได้ถูกเสนอไว้ใน [27] ต่อมา K. Huebner [28] ได้เสนอการวางแผนทำจับของหุ่นยนต์โดยประมาณและแบ่งวัตถุออกเป็นกล่องขอบเขตที่มีปริมาตรน้อยที่สุด ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้พลังในการประมวลผลน้อย M. Przybylski [29, 30, 31] ได้เสนอการวางแผนทำจับของหุ่นยนต์ด้วยการประมาณวัตถุเป็นโครงกระดูกที่ยังคงมีรายละเอียดที่สำคัญของวัตถุอยู่ นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการวางแผนทำจับโดยมนุษย์แล้วพบว่ามนุษย์มักเลือกทำจับโดยพิจารณาถึงแกนมุขสำคัญ (principal axis) ของวัตถุ [32, 33] ต่อมา E. Rombokas และคณะ [34] ได้เสนอการนำแกนมุขสำคัญของวัตถุไปพิจารณาในการวางแผนทำจับของหุ่นยนต์



รูปที่ 4 (a) การประมาณวัตถุเป็นรูปทรงพื้นฐาน [26], (b) การแบ่งวัตถุออกเป็นรูปทรงพื้นฐานย่อยๆ [27], (c) ประมาณและแบ่งวัตถุออกเป็นกล่องขอบเขตที่มีปริมาตรน้อยที่สุด [28] และ (d) การประมาณวัตถุเป็นโครงกระดูก [29, 30, 31]

4. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อคิดค้นและพัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่าจับที่มีคุณภาพสูง โดยมุ่งเน้นไปที่การลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

5. แนวคิดของงานวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

5.1. แนวคิดของการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าวิธีการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์ที่เสนอโดย [5] (ต่อไปนี้จะเรียกวิธีการนี้ว่า "วิธีการดั้งเดิม") นั้น เป็นวิธีที่สามารถหาท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงได้อย่างรวดเร็ว และท่าจับที่ได้นั้นยังเป็นท่าจับที่มีคุณภาพสูงอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงนำวิธีการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์วิธีนี้มาปรับปรุงเพิ่มเติมโดยมุ่งเน้นไปที่การลดเวลาในการคำนวณเป็นหลัก

หากพิจารณาภาพรวมการทำงานใน 1 รอบการวนซ้ำของวิธีการดั้งเดิมแล้ว เราสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอนได้ดังนี้

1. เลือกจุดร่วม (concurrent point) มา 1 จุด
2. หาจุดบนพื้นผิวของวัตถุที่มีจุดร่วมนี้อยู่ภายในกรวยแรงเสียดทานสองด้าน สังเกตว่าเมื่อหยิบจุดเหล่านี้มา 4 จุดใดๆ ทั้ง 4 จุดนั้นจะผ่านเงื่อนไข P1 ในทฤษฎีบทที่ 5

3. หากทำจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรง โดยการหีบจุดบนพื้นผิวจากขั้นตอนที่ 2 มา 4 จุด แล้วทำการทดสอบเงื่อนไข P2 ในทฤษฎีบทที่ 5

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการดั้งเดิม ผู้ทำวิจัยสังเกตเห็นถึงแนวทางในการปรับปรุงวิธีการดั้งเดิม ดังนี้

1. การเลือกจุดร่วมในขั้นตอนที่ 1 นั้น จุดแต่ละจุดจะทำให้เกิดคำตอบอย่างน้อยแตกต่างกัน ดังนั้นหากเพิ่มเงื่อนไขในการเลือกจุดร่วมให้เลือกจุดที่น่าจะทำให้เกิดคำตอบเป็นจำนวนมากไปประมวลผลก่อน ก็จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบดีขึ้น
2. ในขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 นั้นสามารถปรับปรุงขั้นตอนวิธีให้สามารถทำงานแบบขนานบนหน่วยประมวลผลกราฟฟิคได้ แต่สำหรับขั้นตอนที่ 3 นั้นมีการทำงานที่ซับซ้อนการนำไปทำงานแบบขนานบนหน่วยประมวลผลกราฟฟิคตรงๆอาจทำให้ประสิทธิภาพแย่งได้ จึงอาจจะต้องมีการปรับปรุงขั้นตอนวิธีให้เหมาะสมกับการทำงานบนหน่วยประมวลผลกราฟฟิค และทำการทดสอบประสิทธิภาพเทียบกับวิธีดั้งเดิม
3. หากทำการแบ่งวัตถุออกเป็นส่วนย่อยๆแล้วทำการสังเคราะห์ทำจับที่ละส่วนน่าจะทำให้การคำนวณทำได้เร็วขึ้น แต่ก็จะทำให้ความสมบูรณ์ของคำตอบลดลงไปด้วย

5.2. วิธีวัดผลการทดลอง

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองกับวัตถุ 9 ชิ้น โดยวัตถุแต่ละชิ้นจะทำการทดลองดังต่อไปนี้

1. การทดลองตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ

ทำจับที่เป็นคำตอบของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจำเป็นจะต้องเป็นทำจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรง เพื่อทดสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจึงทำการทดลองโดยนำทำจับที่เป็นคำตอบของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไปตรวจสอบคุณสมบัติปิดของแรงอีกครั้งโดยใช้วิธีการตรวจสอบคุณสมบัติปิดของแรงที่เสนอโดย [11]

2. การทดลองอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธีที่นำเสนอเทียบกับจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด

ขั้นตอนวิธีที่เสนอนั้นไม่สามารถใช้หาทำจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงทั้งหมดได้ จึงทำการทดลองเพื่อหาว่าขั้นตอนวิธีที่เสนอนั้นสามารถสังเคราะห์ทำจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงได้เป็นอัตราส่วนเท่าไรเทียบกับทำจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงทั้งหมดที่เป็นไปได้ แต่เนื่องจากการหาทำจับ

ที่มีคุณสมบัติปิดของแรงทั้งหมดนั้นต้องใช้เวลาในการคำนวณเยอะมาก จึงทำการลดจำนวนผิวหน้าของวัตถุลงให้เหลือประมาณ 100 ด้านเพื่อใช้ในการทดลองนี้

3. การทดลองเปรียบเทียบกับวิธีอื่น

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับวิธีอื่นอีก 2 วิธี ได้แก่

- I. ขั้นตอนวิธีการสังเคราะห์ท่าจับที่เสนอโดย [18] ที่ปรับปรุงขึ้นโดยใช้ตัวกรองที่เสนอโดย [19, 20] และใช้วิธีการตรวจสอบคุณสมบัติปิดของแรงที่เสนอโดย [11]
- II. ขั้นตอนวิธีการสังเคราะห์ท่าจับที่เสนอโดย [5] โดยปรับเปลี่ยนวิธีการเลือกจุดร่วมเป็นการสุ่มจุดที่อยู่ในกล่องขอบเขตเล็กที่สุดตามแนวแกนของวัตถุ

เนื่องจากขั้นตอนวิธีที่นำเสนอและขั้นตอนวิธีที่นำมาเปรียบเทียบเป็นขั้นตอนวิธีแบบสุ่ม จึงทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้งสำหรับแต่ละวิธีแล้วใช้ค่าเฉลี่ยในการวัดผล โดยจะทำการวัดผลดังนี้

- I. วัดผลเปรียบเทียบจำนวนท่าจับที่ไม่ซ้ำกันที่ได้ทั้งหมดเมื่อใช้เวลาคำนวณ 5 วินาที
- II. วัดผลเปรียบเทียบจำนวนท่าจับที่ไม่ซ้ำกันที่มีคุณภาพดีเมื่อใช้เวลาคำนวณ 5 วินาที โดยกำหนดว่าท่าจับที่มีคุณภาพดีนั้นคือท่าจับที่มีค่าความสามารถในการต้านทานเวรชันภายนอกในทิศทางใดๆมากกว่าหรือเท่ากับเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าคุณภาพของท่าจับที่เปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 80 จากท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงทั้งหมดบนวัตถุที่มีจำนวนผิวหน้าประมาณ 100 ด้าน

6. ขอบเขตของงานวิจัย

- 6.1. งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การสังเคราะห์ท่าจับเท่านั้น
- 6.2. งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การจับแบบใช้ 4 นิ้วเท่านั้น
- 6.3. งานวิจัยนี้ใช้จุดบนพื้นผิวของวัตถุซึ่งประกอบไปด้วยพิกัดของจุดและทิศทางในแนวซี้เข้าหาวัตถุเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการสังเคราะห์ท่าจับ
- 6.4. งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การจับวัตถุ 3 มิติเท่านั้น โดยจะใช้โมเดลวัตถุ 9 ชิ้นเลือกมาจาก The KIT object models database [35] โดยโมเดลวัตถุแต่ละชิ้นมีผิวหน้า (facet) ประมาณ 800 ด้าน และใช้จุดศูนย์กลางผิวหน้าแต่ละด้านเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการสังเคราะห์ท่าจับ

- 6.5. งานวิจัยนี้ถือว่าวัตถุประสงค์มีการกระจายความหนาแน่นของมวลอย่างสม่ำเสมอ และใช้จุดศูนย์กลางมวลของวัตถุเป็นจุดกำเนิดสำหรับคำนวณแรงบิด
- 6.6. งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองของนิ้วแบบนี้ชี้แจง, ผิวสัมผัสแบบมีแรงเสียดทาน และนิ้วไม่สามารถออกแรงดึงวัตถุได้
- 6.7. งานวิจัยนี้ใช้ความสามารถในการต้านทานเวรชันภายนอกในทิศทางใดๆเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาคุณภาพของท่าจับ โดยกำหนดให้นิ้วของหุ่นยนต์ออกแรงรวมกันได้ไม่เกิน 1 หน่วย
- 6.8. งานวิจัยนี้ทำการทดลองในระบบจำลองเท่านั้น

7. ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 7.1. ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการจับของหุ่นยนต์
- 7.2. ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์
- 7.3. คิดค้นวิธีเพิ่มประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์
- 7.4. ออกแบบการทดลอง
- 7.5. พัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ท่าจับของหุ่นยนต์
- 7.6. ทำการทดลองและเก็บบันทึกผล
- 7.7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 7.8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

รายการอ้างอิง

- [1] M.E. Merchant, The Friction and Lubrication of Solids. F. P. Bowden and D. Tabor. New York: Oxford Univ. Press, 1950. 337 pp. 7.00, Science. 113 (1951) 443–444. doi:10.1126/science.113.2938.443-a.
- [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] J. Ponce, S. Sullivan, A. Sudsang, J. Boissonnat, and J.-P. Merlet, “On Computing Four-Finger Equilibrium and Force-Closure Grasps of Polyhedral Objects,” International Journal of Robotics Research, vol. 16, pp. 11–35, 1996.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] M. A. Roa and R. Suárez, “Grasp quality measures: review and performance,” Auton Robot, pp. 1–24, Jul. 2014.
- [8] X. Markenscoff, L. Ni, and C. H. Papadimitriou, “The Geometry of Grasping,” The International Journal of Robotics Research, vol. 9, no. 1, pp. 61–74, Feb. 1990.
- [9] A. Bicchi, “On the Closure Properties of Robotic Grasping,” International Journal of Robotics Research, vol. 14, pp. 319–334, 1995.
- [10] 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.

- [11] Y. Zheng and C.-M. Chew, "Distance Between a Point and a Convex Cone in - Dimensional Space: Computation and Applications," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 6, pp. 1397–1412, Dec. 2009.
- [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 Transactions on Robotics*, 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," *Robotics and Autonomous Systems*, 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 Transactions on Robotics*, vol. 30, no. 2, pp. 289–309, Apr. 2014.
- [18] C. Borst, M. Fischer, G. Hirzinger, "Grasping the dice by dicing the grasp," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, 2003, pp.3692–3697.
- [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," *Advanced Robotics*, vol. 22, no. 13–14, pp. 1497–1520, 2008.
- [21] 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.

- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] A. Miller and P. K. Allen, "Graspt! A versatile simulator for robotic grasping," *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 11, no. 4, pp. 110–122, Dec. 2004.
- [25] R. Diankov, "Automated construction of robotic manipulation programs," Ph.D. dissertation, Robotics Inst., Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, PA, USA, Aug. 2010.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.

- [32] 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.
- [33] 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 Transactions on Robotics*, vol. 28, no. 4, pp. 899–910, Aug. 2012.
- [34] 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.
- [35] 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," *The International Journal of Robotics Research*, p. 0278364912445831, May 2012.

ภาคผนวก

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

