

โครงร่างวิทยานิพนธ์ (THESIS PROPOSAL)

ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย)	การปรับปรุงวิธีคำนวณตัวชี้วัดคุณภาพการจับโดยใช้แรงกระทำภายนอกบนวัตถุน้อยที่สุดในการทำละลายจับ
ชื่อเรื่อง (ภาษาอังกฤษ)	Improved Method for Computation of Grasp Quality Metric Using Minimal Breaking Force on Objects
เสนอโดย	นายมานะ บวรผดุงกิตติ
รหัสนิสิต	5670343721
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สถานที่ติดต่อ	ภาควิชาคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทรศัพท์	08-4917-0839
อีเมล	Mana.Bo@student.chula.ac.th
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.นัทที นิภานันท์
คำสำคัญ (ภาษาไทย)	การจับ, ตัวชี้วัดคุณภาพการจับ
คำสำคัญ (ภาษาอังกฤษ)	Grasping, Grasp Quality Metric

การปรับปรุงวิธีคำนวณตัวชี้วัดคุณภาพการจับโดยใช้แรงกระทำภายนอกบนวัตถุน้อย ที่สุดในการทำลายท่าจับ

(Improved Method for Computation of Grasp Quality Metric Using Minimal Breaking Force on Objects)

นายมานะ บวรผดุงกิตติ

1 ตุลาคม 2557

1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การนำหุ่นยนต์เข้ามาช่วยทำงานแทนมนุษย์นั้น มีมาตั้งแต่สมัยโบราณกาลแล้ว และเริ่มมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา ส่งผลให้หุ่นยนต์เริ่มมีบทบาทและความสำคัญต่อมนุษย์มากในปัจจุบัน และมีแนวโน้มที่จะมากขึ้นต่อไปในอนาคต หุ่นมีประโยชน์ในหลายๆ ด้าน เช่น เป็นผู้ช่วยทำงานแทนมนุษย์ สามารถทำงานอันตรายแทนมนุษย์ได้ สามารถทำงานได้อย่างไม่เหน็ดเหนื่อย ทำตามคำสั่งที่สั่งไว้ได้อย่างแม่นยำ หรือแม้กระทั่งเป็นเพื่อนกับมนุษย์ ประโยชน์เหล่านี้จะมีไม่ได้เลยหากขาดความสามารถพื้นฐานเหล่านี้ เช่น การเคลื่อนไหว การเคลื่อนที่ การรับรู้สภาพแวดล้อม การรู้จำสิ่งของ การหยิบจับวัตถุสิ่งของ เป็นต้น

การหยิบจับสิ่งของนี้เอง ก็ยังคงเป็นปัญหาที่ท้าทาย และเป็นหนึ่งในศาสตร์ที่มันักวิจัยให้ความสนใจแก้ปัญหาเป็นจำนวนมาก โดยมีความพยายามในการแก้ปัญหาการจับในหลากหลายแง่มุม ตั้งแต่การออกแบบแขนกลให้เหมาะสมและยืดหยุ่นต่อการจับวัตถุ ให้สามารถหยิบจับวัตถุได้หลากหลายรูปร่าง/พื้นผิว วิธีคำนวณการเคลื่อนที่ของแขนกลให้สามารถเข้าไปจับวัตถุได้ โดยไม่ชนกับสิ่งแวดล้อมภายนอก วิธีการจับวัตถุที่แข็งแรง วัตถุไม่สามารถหลุดออกจากมือไปได้โดยง่าย วิธีการจับที่ขึ้นอยู่กับว่าเราต้องการทำอะไรกับวัตถุ หรือแม้กระทั่งการศึกษาวิธีการจับของมนุษย์ และพยายามนำท่าทางการจับของมนุษย์มาใช้กับหุ่นยนต์ แต่ก็ยังไม่มียุุ่นยนต์ที่สามารถหยิบจับวัตถุสิ่งของได้ดี และฉลาดเทียบเท่ามนุษย์

การที่หุ่นยนต์ไม่สามารถหยิบจับวัตถุได้เหมือนดังเช่นมนุษย์นั้น มีสาเหตุหลากหลายประการ เช่น ความแตกต่างของมือหุ่นยนต์และมือมนุษย์ นิ้วมือมนุษย์สามารถรับรู้ถึงแรงกระทำได้ และมีลักษณะอ่อนนุ่ม ทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างนิ้วและวัตถุมีมาก ความสามารถในการรับรู้สภาพแวดล้อม ความสามารถในการรู้จำวัตถุ ถึงแม้คนจะมองไม่เห็นวัตถุทั้งหมด ก็สามารถรู้ได้ว่าส่วนที่มองไม่เห็นมีลักษณะประมาณไหนจากประสบการณ์ที่อาจเคยเห็นวัตถุนั้นในมุมมองอื่นมาแล้ว หรือจากการคาดการณ์จากวัตถุที่รู้จักที่มีลักษณะใกล้เคียง คล้ายคลึงกับวัตถุที่เห็น การเลือกจับวัตถุตามความเหมาะสม สอดคล้องกับเป้าหมายที่ก่อให้เกิดความต้องการหยิบจับวัตถุ เป็นต้น

การเลือกวิธีการจับวัตถุที่ถูกต้องเหมาะสม และมีคุณภาพนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลากหลายประการ เช่น จุดที่มือสัมผัสกับวัตถุ ท่าทางของมือ เป้าหมายของการจับวัตถุ ซึ่งคำว่าเหมาะสมนั้น ก็เป็นตัวชี้วัดเชิงคุณภาพ ซึ่งนำมาใช้ในการคำนวณและเปรียบเทียบได้ยาก เราจึงต้องการตัวชี้วัดเชิงปริมาณ ที่สามารถคำนวณได้จาก

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการจับ และสามารถนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างท่าจับหลายๆ ท่าได้ง่าย ซึ่งปัญหาการวัดคุณภาพของท่าจับนั้น มีผู้ให้ความสนใจ และให้นิยามของคำว่า “คุณภาพ” กันหลากหลายออกไป และรู้จักกันในชื่อ “ตัวชี้วัดคุณภาพการจับ” (Grasp Quality Metric) ถึงแม้ว่าจะมีผู้ให้นิยามของคำว่า “คุณภาพ” กันมากมาย แต่ก็ไม่มีตัวชี้วัดใดที่ได้รับการยอมรับว่าดี และถูกใช้งานจริงอย่างกว้างขวาง หรือบางตัวชี้วัดมีความต้องการทรัพยากรในการคำนวณมาก ทำให้คำนวณได้ช้า ไม่สามารถนำไปใช้ได้แบบตามเวลาจริง (real-time) แม้จะมีบางตัวชี้วัดที่ไม่ต้องการใช้ทรัพยากรในการคำนวณมาก แต่ความหมายของตัวชี้วัดนั้นก็ดูจะไม่ให้ความหมายที่ถูกต้องในเชิงฟิสิกส์นัก

งานวิจัยนี้จึงพยายามมุ่งเน้นไปที่การนิยามคุณภาพของท่าจับที่มีความหมายถูกต้องในเชิงฟิสิกส์ รวมถึงวิธีการคำนวณคุณภาพนั้นอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้แบบตามเวลาจริงมากขึ้น เพื่อที่จะเป็นแนวทางในการจับวัตถุให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจับของแขนกล มีคุณสมบัติหนึ่งที่มีความจำเป็นคือ การจับวัตถุให้อยู่ในสภาพสมดุล (equilibrium) หมายความว่า ไม่มีแรงและแรงบิดลัพธ์ใดๆ จากมือกระทำต่อวัตถุ หรือ ผลรวมของแรงและแรงบิดจากมือที่กระทำต่อวัตถุเป็นศูนย์ ส่งผลให้วัตถุไม่เคลื่อนที่ระหว่างการจับหากไม่มีแรงกระทำจากภายนอก แต่ถ้าหากมีแรงภายนอกมากระทำกับวัตถุแล้ว คุณสมบัติ equilibrium ก็ไม่เพียงพออีกต่อไป แต่ต้องอาศัยคุณสมบัติที่จำกัดมากกว่านั้น คือ คุณสมบัติของการจับที่สามารถต้านทานแรงกระทำจากภายนอกได้ เรียกว่าการจับแบบปิดของแรง (force-closure) [1] หมายความว่านิ้วสามารถออกแรงและแรงบิดเพื่อต้านทานแรงและแรงบิดจากภายนอกใดๆ ก็ได้ เมื่อกำหนดให้นิ้วสามารถออกแรงได้อย่างไม่จำกัด ทำให้วัตถุอยู่ในสภาพสมดุลได้ตลอดเวลา ไม่ขึ้นกับแรงกระทำภายนอก ได้มีการพิสูจน์ไว้ใน [1,2] ว่าท่าจับที่มีคุณสมบัติสมดุล และแรงที่ออกเพื่อให้สมดุลอยู่ด้านในของกรวยเสียดทาน จะมีคุณสมบัติ force-closure หรืออีกนัยหนึ่งคือ ท่าจับที่มีคุณสมบัติสมดุลสำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานใดๆ จะมีคุณสมบัติ force-closure สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มากกว่าเสมอ

คุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับ force-closure คือ คุณสมบัติ form-closure โดย form-closure คำนึงถึงความสามารถในการต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในเชิงเรขาคณิต กล่าวคือ การวางตัวของนิ้วไม่สามารถทำให้วัตถุเคลื่อนที่ได้ เมื่อกำหนดให้นิ้วของมืออยู่หนึ่ง ซึ่งท่าจับใดๆ จะมีคุณสมบัติ form-closure ก็ต่อเมื่อท่าจับนั้นมีคุณสมบัติ force-closure ในกรณีที่ไม่สนใจแรงเสียดทาน [1,3,4] โดยมีผู้เขียนบทความรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติ force-closure และ form-closure ไว้ที่ [5]

ปัญหาที่เกี่ยวกับคุณสมบัติ force-closure หลักๆ มีสองส่วนคือ

1) ทดสอบว่าท่าจับนี้มีคุณสมบัติ force-closure หรือไม่

การทดสอบคุณสมบัติ force-closure นั้น มีวิธีการทดสอบที่หลากหลาย ทั้งวิธีที่คำนึงถึงการจับวัตถุ ในสองมิติเท่านั้น [6] วิธีที่คำนึงถึงท่าจับที่มีจำนวนนิ้วคงที่ [7,8] และวิธีที่ใช้กับท่าจับในสามมิติและมีก้นนิ้วก็ได้ [9–11]

2) คำนิยามท่าจับที่มีคุณสมบัติ force-closure

การคำนวณท่าจับที่มีคุณสมบัติ force-closure นั้น วิธีที่ตรงไปตรงมาที่สุดก็คือการหาท่าจับที่เป็นไปได้ทั้งหมด แล้วนำท่าจับนั้นมาทดสอบด้วยวิธีทดสอบคุณสมบัติ force-closure ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่มีประสิทธิภาพ และใช้เวลาในการประมวลผลนาน มีนักวิจัยหลากหลายท่านที่นำเสนอวิธีการหาท่าจับที่มีคุณสมบัติ force-closure ออกมาให้ได้จำนวนมาก โดยอาจได้ครบทุกท่าจับที่เป็นไปได้หรือไม่ครบก็ได้ ซึ่งมีทั้งในกรณีสองมิติ สามมิติ มีแรงเสียดทาน ไม่มีแรงเสียดทาน วัตถุเป็นรูปทรงหลายด้าน หรือวัตถุเป็นจุด จำนวนมาก [2,12–24]

จากงานวิจัยที่คำนวณท่าจับที่มีคุณสมบัติ force-closure นั้นจะได้ท่าจับออกมาเป็นจำนวนมาก แต่ท่าจับที่ดีนั้น นอกจากจะต้องมีคุณสมบัติ force-closure ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นของท่าจับแล้ว ยังต้องคำนึงถึงเป้าหมายของการจับอีกด้วย เป้าหมายของการจับนี้เองที่จะเป็นตัวช่วยตัดสินใจเลือกหนึ่งในท่าจับที่มีคุณสมบัติ force-closure จำนวนมากมาใช้จับวัตถุจริงๆ หนึ่งในวิธีการเลือกท่าจับที่เหมาะสมมาใช้จับวัตถุนั้นก็คือวิธีการให้คะแนนคุณภาพของท่าจับ หรือการวัดคุณภาพท่าจับเชิงปริมาณ ที่สามารถแทนค่าคุณภาพได้ด้วยตัวเลข ที่เรียกว่า “ตัวชี้วัดคุณภาพการจับ” ซึ่งก็เกิดจากคำถามที่ว่า ควรจะจับวัตถุตรงไหน และจับอย่างไรเพื่อให้สามารถทำงานที่ต้องการให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณและเลือกท่าจับวัตถุที่ผ่านมา ได้ถูกสรุปรวบรวมไว้ใน [25] ซึ่งโดยรวมสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนใหญ่ๆ ตามเป้าหมายของงานที่ต้องการ ได้แก่

1. การจับวัตถุให้ได้โดยทั่วไป หรือการจับที่ไม่คำนึงถึงเป้าหมาย

การจับวัตถุโดยไม่คำนึงถึงเป้าหมายนั้น มีตัวชี้วัดคุณภาพหนึ่งที่น่าสนใจอย่างแพร่หลาย นั่นก็คือความสามารถในการต้านทานแรงและแรงบิดภายนอกในทิศทางใดๆ ก็ได้ โดยไม่คำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและแรงบิด [26,27]

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

โดยที่

∂ คือ boundary function

GWS คือ แรงและแรงบิดที่ท่าจับนี้สามารถออกได้ หรือปริภูมิเวรณซ์ของการจับ (Grasp Wrench Space)

ตัวชี้วัดนี้มีคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของกรอบอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณแรงบิด ซึ่งกรอบอ้างอิงนั้นเป็นเพียงแค่สิ่งสมมติที่ใช้ช่วยในการคำนวณเท่านั้น วิธีคำนวณหาคุณภาพนี้โดยหาระยะห่างที่น้อยที่สุดจากจุดกำเนิดถึงขอบของรูปทรงของแรงและแรงบิดที่มือสามารถออกได้ ได้ถูกนำเสนอโดย [28] โดยกำหนดขอบเขต

สูงสุดของแรงที่แต่ละนิ้วออกได้ หลังจากนั้น วิธีการคำนวณตัวชี้วัดนี้ยังมีประสิทธิภาพโดยใช้การวนซ้ำ ได้ ถูกเสนอโดย [29]

มีนักวิจัยจำนวนมากเสนอตัวชี้วัดคุณภาพที่ไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของกรอบอ้างอิง เช่น การใช้ปริมาตรของแรงและแรงบิดของปริภูมิเวรนซ์ของการจับ [28,30] หรือการใช้ตำแหน่งของจุดจับบนวัตถุมาคำนวณคุณภาพ [1,2,31–38] ซึ่งก็มีหลากหลายวิธี หนึ่งในตัวชี้วัดที่ใช้ตำแหน่งของจุดจับบนวัตถุมาคำนวณที่ได้รับ ความนิยามกันอย่างแพร่หลายก็คือ บริเวณสัมผัสอิสระ (Independent Contact Region) คือบริเวณของ จุดสัมผัสบนวัตถุที่แต่ละนิ้วสามารถวางบนวัตถุได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับนิ้วอื่นๆ แต่ยังคงคุณสมบัติ force-closure ไว้ได้ วิธีการคำนวณหาบริเวณสัมผัสอิสระได้ถูกนำเสนอในกรณีสองมิติโดย [1,37–39] และสำหรับกรณีวัตถุ สามมิติโดย [36] ซึ่งเสนอวิธีการคำนวณบริเวณสัมผัสอิสระบนวัตถุที่แทนด้วยกลุ่มของจุด การนำบริเวณสัมผัส อิสระมาใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพการจับ มีทั้งการใช้ขนาดของผิวสัมผัสอิสระที่น้อยที่สุด [37] และการใช้ขนาด รวมของผิวสัมผัสอิสระ [39]

2. การจับวัตถุโดยคำนึงถึงเป้าหมายของการจับ (Task-oriented)

การจับวัตถุโดยคำนึงถึงเป้าหมายของการจับนั้น แน่แน่นอนว่าจะต้องมีการนิยามเป้าหมายของการจับ ด้วย ซึ่งวิธีการนิยามเป้าหมายที่ได้รับความนิยมนั้นก็คือ การนิยามด้วยแรงและแรงบิดที่ต้องการเพื่อให้สามารถ ทำงานนั้นได้ ซึ่งเป้าหมายนี้สามารถแทนได้ด้วยรูปทรงปิดในหกมิติ [30] การนิยามเป้าหมายการจับเช่นนี้มี ปัญหาหลักที่สำคัญคือ วิธีการหารูปทรงปิดหกมิติที่ใช้จะแทนงานที่จะทำ การนิยามเป้าหมายการจับแบบนี้ สามารถไปคำนวณตัวชี้วัดคุณภาพการจับได้ โดยใช้ค่าตัวชี้วัดเป็นขนาดของอัตราส่วนมากที่สุดที่ใช้ย่อ/ขยาย แรงและแรงบิดที่อยู่ในเป้าหมายของการจับทั้งหมดแล้วทำจับนั้นยังสามารถออกแรงและแรงบิดที่ถูกย่อ/ขยาย นั้นได้อยู่

$$d = \max \lambda ; \lambda TWS \subseteq GWS, \lambda \geq 0$$

โดยที่

TWS คือ แรงและแรงบิดที่ต้องการเพื่อให้สามารถทำการกิจของงานให้สำเร็จ หรือปริภูมิเวรนซ์ของ การกิจ (Task Wrench Space)

GWS คือ แรงและแรงบิดที่ท่าจับนี้สามารถออกได้ หรือปริภูมิเวรนซ์ของการจับ (Grasp Wrench Space)

งานวิจัยที่เป็นแรงบันดาลใจ และเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้มากที่สุดคือ งานวิจัยของ Strandberg และ Wahlberg [40] ที่ทำการเสนอตัวชี้วัดคุณภาพของท่าจับที่ไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของกรอบอ้างอิงที่ใช้ คำนวณแรงบิด โดยอาศัยข้อมูลของวัตถุที่ถูกจับมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาความสามารถในการต้านทานต่อ แรงกระทำภายนอก ที่กระทำลงบนวัตถุ นอกจากนี้ตัวชี้วัดนี้ยังสามารถนำข้อมูลเกี่ยวกับเป้าหมายของงานจับ มาคิดรวมกันได้อย่างง่ายดาย มีนักวิจัยที่หาตัวชี้วัดคุณภาพที่มีความหมายใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ออกมา หรือนำตัวชี้วัดนี้ไปต่อยอดเพื่อให้ได้วิธีการคำนวณที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น และใกล้เคียงผลเฉลยที่แท้จริงมากยิ่งขึ้น เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหา วิธีการคำนวณความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระทำภายนอก โดย

คำนึงถึงเฉพาะผิวสัมผัสที่เป็นแบบไร้แรงเสียดทานเท่านั้น ได้ถูกเสนอโดย [41] หรือพูดในอีกนัยหนึ่งคือ คำนึงถึงเฉพาะแรงที่กระทำลงบนพื้นผิววัตถุในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิววัตถุเท่านั้น วิธีคำนวณตัวชี้วัดนี้โดยใช้วิธียิงลำเส้นตรง (ray-shooting) [43] ทำให้ไม่จำเป็นต้องแปลงกรวยแรงเสียดทานเป็นพีระมิด ได้ถูกเสนอโดย [42] ซึ่งนอกจากจะส่งผลให้ได้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นแล้ว ยังช่วยลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณอีกด้วย

งานวิจัยข้างต้นนั้น มีความหมายในเชิงฟิสิกส์ ไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของกรอบอ้างอิงที่ใช้คำนวณแรงบิด และสามารถรวบรวมเป้าหมายของงานจับเข้าไปได้ช่วยในการประเมินคุณภาพได้ แต่ใช้เวลาในการคำนวณมาก จึงไม่เหมาะในการนำมาใช้เปรียบเทียบและเลือกท่าจับที่มีจำนวนมากๆ ได้ ซึ่งปัญหาของเวลาที่ใช้นี้เองก็เป็นปัญหามุ่งสนใจ วิทยานิพนธ์นี้จึงต้องการนำเสนอวิธีการคำนวณตัวชี้วัดคุณภาพข้างต้น โดยเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการคำนวณตัวชี้วัดข้างต้น ซึ่งจะช่วยลดเวลาที่ต้องใช้ในการประเมินคุณภาพของท่าจับด้วยตัวชี้วัดนี้ลงได้

3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อคิดค้น สร้าง และพัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาคุณภาพของท่าจับ ซึ่งคำนึงถึงความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระทำภายนอก ที่กระทำลงบนวัตถุที่มีข้อมูลอยู่ก่อนล่วงหน้า โดยเน้นไปที่ประสิทธิภาพและเวลาที่ใช้ในการคำนวณคุณภาพของท่าจับเป็นหลัก

4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 แบบจำลองของนิ้วจับ (finger model)

การใช้นิ้วหุ่นยนต์มาสัมผัสกับวัตถุถือเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นในการจับและจัดการวัตถุด้วยมือของหุ่นยนต์ นิ้วหุ่นยนต์ถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักๆ คือ

1) นิ้วแข็ง (hard finger)

นิ้วออกได้เพียงแรงบริสุทธิ์ที่จุดสัมผัสเท่านั้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะถือว่านิ้วหุ่นยนต์ทุกนิ้วเป็นนิ้วแข็งทั้งหมด

2) นิ้วอ่อน (soft finger)

นิ้วสามารถออกได้ทั้งแรงบริสุทธิ์และแรงบิดรอบจุดสัมผัส

นอกจากนี้ แบบจำลองของนิ้วแข็ง ยังถูกแบ่งออกตามลักษณะของผิวสัมผัสระหว่างนิ้วและวัตถุได้เป็นสองประเภท คือ

1) ผิวสัมผัสที่ไม่มีแรงเสียดทาน

นิ้วออกแรงได้ในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสเท่านั้น

2) ผิวสัมผัสที่มีแรงเสียดทาน

นิ้วออกแรงได้ทั้งในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส และในแนวขนานกับผิวสัมผัส โดยแรงกระทำในแนวขนานกับผิวสัมผัสจะถูกกำหนดด้วยธรรมชาติของแรงเสียดทาน แบบจำลองของแรงเสียดทานที่นิยมใช้และได้รับการ

ยอมรับว่าแม่นยำเพียงพอในการอธิบายแรงเสียดทานก็คือ กฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) [44] ซึ่งกล่าวว่าขนาดของแรงเสียดทานสถิต หรือแรงเสียดทานเมื่อไม่มีการลื่นไถลระหว่างผิวสัมผัสจะมีค่าไม่เกิน $\mu \|F_N\|$ โดยที่ μ คือค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน และ F_N คือแรงที่ออกในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส

จากกฎของคูลอมบ์ จะเห็นได้ว่า แรงรวมลัพธ์ที่นิ้วสามารถกระทำลงบนวัตถุได้จะมีลักษณะเป็นกรวย ซึ่งมีจุดยอดอยู่ที่จุดสัมผัส และมีแกนกลางในทิศทางตั้งฉากกับผิวสัมผัส โดยมีครึ่งมุมจุดยอด (half cone's angle) $\theta = \tan^{-1}(\mu)$ และเรียกรวยนี้ว่า กรวยแรงเสียดทาน (friction cone)

สำหรับในกรณีสองมิตินั้น กรวยแรงเสียดทานจะมีลักษณะเป็นพัดลม (fan) และสามารถเขียนแทนได้ด้วย convex combination ของ vector ที่ขอบของพัดลมสองอัน แต่ในกรณีของสามมิตินั้น กรวยแรงเสียดทานจะมีลักษณะเป็นทรงกรวยในสามมิติ ซึ่งไม่สามารถเขียนแทนได้ด้วย convex combination ของ vector จำนวนจำกัดได้ ส่งผลให้การนำกรวยแรงเสียดทานไปคิดคำนวณในสามมิตินั้น เป็นไปได้ยาก ไม่สามารถแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงเส้นได้อีกต่อไป วิธีการประมาณทรงกรวยด้วยรูปทรงพีระมิดฐานหลายเหลี่ยมแทน [45] ได้รับความนิยมน้อยกว่าหลาย ซึ่งก็เป็นการแลกเปลี่ยนความแม่นยำกับความสามารถในการแก้ปัญหา โดยหากต้องการความแม่นยำที่เพิ่มมากขึ้น ก็สามารถใช่วิธีเพิ่มด้านของรูปทรงพีระมิด ซึ่งจะทำให้รูปทรงพีระมิดมีลักษณะใกล้เคียงกับทรงกรวยมากยิ่งขึ้น

4.2 แรงและแรงบิด (force and torque)

แรงที่นิ้วหุ่นยนต์สามารถกระทำกับวัตถุนั้น แบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ

- 1) แรง (force)
- 2) แรงบิด (torque)

สำหรับแบบจำลองของนิ้วที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้นั้น เป็นแบบนิ้วแข็ง ซึ่งกระทำได้เพียงแรงอย่างเดียวเท่านั้น ไม่สามารถออกแรงบิดได้โดยตรง แต่แรงบิดสามารถเกิดจากได้จากแรงรอบจุดกำเนิด ซึ่งเขียนได้เป็น

$\tau = \vec{r} \times \vec{F}$ เมื่อ τ คือแรงบิด, \vec{r} คือตำแหน่งของนิ้วเทียบกับจุดกำเนิด และ \vec{F} คือแรงที่นิ้วกระทำต่อวัตถุ เนื่องจากทั้งแรงและแรงบิดถูกใช้พร้อมๆ กันบ่อยครั้ง ในการแก้ปัญหา จึงนิยมนำ vector แรง และ vector แรงบิดมาต่อกันเป็น vector อันเดียว โดยเรียก vector นี้ว่า เวนช์ (wrench) สำหรับปัญหาในสองมิติ wrench จะมีขนาดสามมิติ ประกอบด้วยแรงสองมิติและแรงบิดหนึ่งมิติ ส่วนปัญหาในสามมิติ wrench จะมีขนาดหกมิติ ประกอบด้วยแรงสามมิติและแรงบิดสามมิติ

4.3 คุณสมบัติปิดของแรง (force-closure)

วัตถุจะอยู่ในสภาพสมดุล (equilibrium) ได้ก็ต่อเมื่อแรงและแรงบิดรวมที่กระทำต่อวัตถุเป็นศูนย์ ทำจ็ับที่ออกแรงและแรงบิดรวมต่อวัตถุเป็นศูนย์นั้น จะสามารถรักษาวัดถูกให้ไม่ลื่นหลุดออกจากมือได้เมื่อไม่มีแรงกระทำจากภายนอก นอกจากนี้ ทำจ็ับที่มีคุณสมบัติที่เข้มงวดรัดกุมมากยิ่งขึ้นก็คือ ทำจ็ับที่สามารถรักษาวัดถูกให้อยู่ในสภาพสมดุลได้ตลอดเวลา ไม่ว่าจะมีความกระทำภายนอกต่อวัตถุขนาดเท่าใดก็ตาม เมื่อกำหนดให้แรงที่

นิ้วกระทำต่อวัตถุได้ มีขนาดไม่จำกัด ซึ่งทำจับนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่เรียกว่า “คุณสมบัติปิดของแรง” (force-closure)

จะเห็นได้ว่า ทำจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงนั้น เพียงพอที่จะทำให้วัตถุมีคุณสมบัติสมดุลได้ แต่ทำจับที่สามารถทำให้วัตถุอยู่ในสภาพสมดุลได้นั้นไม่จำเป็นจะต้องมีคุณสมบัติปิดของแรง ที่น่าสนใจคือ ทำจับที่สามารถทำให้วัตถุอยู่ในสภาพสมดุลได้ จะมีคุณสมบัติปิดของแรงสำหรับกรณีที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากกว่าเสมอ [1,2]

4.4 ปริภูมิเวรช์ของการจับ (Grasp Wrench Space) [46,47]

ทำจับใดๆ นั้น จะมีเวรช์ที่เกิดขึ้นจากการที่นิ้วสัมผัสกับวัตถุ เมื่อกำหนดขนาดของแรงมากสุดในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสที่แต่ละนิ้วออกได้แล้ว เราจะได้ปริภูมิของเวรช์ที่ทำจับนั้นสามารถสร้างได้ โดยเรียกปริภูมินี้ว่า “ปริภูมิเวรช์ของการจับ” (Grasp Wrench Space)

ทำจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงจะมีจุดกำเนิดอยู่ภายในปริภูมินี้อย่างเคร่งครัดเสมอ ซึ่งวิธีนี้เองก็เป็นหนึ่งในวิธีทดสอบว่าทำจับนี้มีคุณสมบัติปิดของแรงหรือไม่

การกำหนดขนาดของแรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสมากที่สุดที่แต่ละนิ้วออกได้นั้น มีวิธีการกำหนดที่นิยมใช้กันหลักๆ อยู่สองวิธี [26] ได้แก่

1) กำหนดขนาดของแรงที่ทุกๆ นิ้วออกได้รวมกันไม่เกิน

ด้วยวิธีนี้ ปริภูมิเวรช์ของการจับจะเกิดจาก convex hull ของเวรช์ที่แต่ละนิ้วออกได้

$$GWS = \text{conv}(\omega | \omega = \bigcup_{i=0}^{N_F} \omega_i)$$

โดยที่

ω_i คือ เวรช์ที่นิ้วที่ i สามารถสร้างได้

N_F คือ จำนวนนิ้ว

conv คือ convex hull function

2) กำหนดขนาดของแรงที่แต่ละนิ้วออกได้แยกกันไม่เกิน

ด้วยวิธีนี้ ปริภูมิเวรช์ของการจับจะเกิดจาก convex hull ของผลรวมทุกรูปแบบ (Minkowski sum) ของเวรช์ที่แต่ละนิ้วออกได้

$$GWS = \text{conv}(\omega | \omega = \bigoplus_{i=0}^{N_F} \omega_i)$$

โดยที่

\bigoplus คือ Minkowski sum

การนิยามปริภูมิเวรณซ์ของการจับแบบนี้ จะทำให้ได้แบบจำลองที่ใกล้เคียงกับความจริงมากกว่าการนิยามแบบแรก เพราะโดยลักษณะธรรมชาติการออกแรงของมือหุ่นยนต์นั้น แต่ละนิ้วมีแรงจำกัดที่ออกได้แยกกัน ไม่ได้ถูกจำกัดรวมกัน

มีตัวชี้วัดคุณภาพการจับบางตัว ที่สนใจเพียงแค่ปริภูมิเวรณซ์ของการจับเท่านั้น เช่น ระยะห่างจากจุดกำเนิดถึงขอบของปริภูมิการจับที่น้อยที่สุด [26] สำหรับตัวชี้วัดประเภทนี้ จะไม่สนใจเป้าหมายของภารกิจในการจับวัตถุเลย ส่งผลให้ตัวชี้วัดนี้เป็นการประเมินท่าจับในภาพรวม แต่ไม่สามารถใช้แทนคุณภาพของการจับที่มีเป้าหมายของภารกิจได้

4.5 ปริภูมิเวรณซ์ของภารกิจ (Task Wrench Space) [30,46,48]

เนื่องจากปริภูมิเวรณซ์ของการจับเพียงอย่างเดียวนั้น ไม่สามารถใช้ประเมินคุณภาพของท่าจับที่มีเป้าหมายได้ ดังเช่นตัวชี้วัดที่ใช้ระยะห่างจากจุดกำเนิดถึงขอบของปริภูมิเวรณซ์ของการจับที่น้อยที่สุด จึงมีการเสนอวิธีประเมินคุณภาพของท่าจับที่มีเป้าหมายโดยอาศัยการนิยาม “ภารกิจ” ด้วยรูปทรงปิดของเวรณซ์ที่คาดหวังว่าจะเกิดขึ้นในระหว่างที่ทำภารกิจ และมือหุ่นยนต์ควรจะสามารถต้านทานได้ [30] ทั้งที่ถูกแทนด้วยรูปทรงรี [30] หรือแทนด้วยรูปทรงปิดนูนหลายหน้า (convex polytope) [4,49] ปริภูมินี้ได้ถูกเรียกว่า “ปริภูมิเวรณซ์ของภารกิจ” [46,48]

ปริภูมิเวรณซ์ของภารกิจถูกนำไปใช้ในการคำนวณตัวชี้วัดคุณภาพการจับ ด้วยขนาดของค่าอัตราส่วนที่มากที่สุดที่ใช้ย่อ/ขยายปริภูมิเวรณซ์ของภารกิจโดยที่ยังอยู่ภายในปริภูมิเวรณซ์ของการจับ

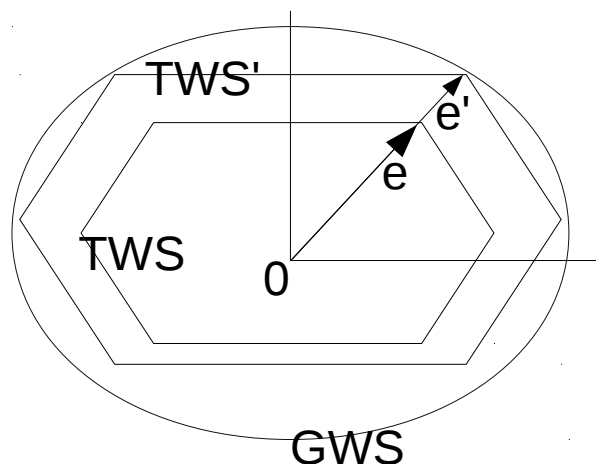
$$Quality = \max \lambda ; \lambda \cdot TWS \subseteq GWS , \lambda \geq 0$$

โดยที่

TWS คือ ปริภูมิเวรณซ์ของภารกิจ

GWS คือ ปริภูมิเวรณซ์ของการจับ

รูปที่ 1. แสดงตัวอย่างของตัวชี้วัดคุณภาพการจับด้วยวิธีข้างต้นในปริภูมิเวรณซ์ขนาดสองมิติ



รูปที่ 1. ตัวอย่างของตัวชี้วัดคุณภาพการจับด้วยขนาดของค่าอัตราส่วนที่มากที่สุดที่ใช้ย่อ/ขยายปริภูมิเวรณซ์ของภารกิจโดยที่ยังอยู่ภายในปริภูมิเวรณซ์ของการจับ สำหรับปริภูมิเวรณซ์ในสองมิติ โดยที่ $Quality = \frac{e'}{e}$

ท่าจับที่มีค่าอัตราส่วนนี้มากกว่า ก็หมายความว่าท่าจับนี้ด้านทานเวรณซ์ที่เกิดระหว่างการทำงานได้มากกว่า [48,50] สำหรับตัวชี้วัดที่ใช้ระยะห่างจากจุดกำเนิดถึงขอบของปริภูมิเวรณซ์ของการจับที่น้อยที่สุด ก็สามารถมองเป็นตัวชี้วัดข้างต้นที่ถือว่าเวรณซ์ที่ควรต้านระหว่างทำภารกิจในแต่ละทิศทางมีโอกาสเกิดขึ้นเท่าๆ กัน ปริภูมิเวรณซ์ของภารกิจนี้ มีข้อเสียข้อหนึ่งคือ การประมาณและสร้างปริภูมินี้สำหรับภารกิจที่ต้องการเป็นไปได้อย่าง

4.6 ปริภูมิเวรณซ์ของวัตถุ (Object Wrench Space) [46,48]

ปริภูมิของเวรณซ์ที่สามารถสร้างได้จากแรงกระทำตรงไหนก็ได้ในทิศทางที่อยู่ภายในกรวยเสียดทานบนวัตถุที่มีขนาดรวมกันเท่ากับหนึ่งหน่วย ถูกเรียกว่า “ปริภูมิเวรณซ์ของวัตถุ” [46] โดยสามารถมองปริภูมินี้เป็นปริภูมิเวรณซ์ของการจับที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้สำหรับมือหุ่นยนต์ที่มีนิ้วไม่จำกัดจำนวนได้ เมื่อกำหนดให้แรงรวมที่แต่ละนิ้วออกได้มีรวมกันเท่ากับหนึ่งหน่วย

เนื่องจากความยากในการสร้างปริภูมิเวรณซ์ของภารกิจขึ้นมา การนำปริภูมิเวรณซ์ของวัตถุมาใช้เป็นปริภูมิเวรณซ์ของภารกิจ ได้ถูกเสนอโดย [48] ซึ่งอาศัยการประมาณปริภูมิเวรณซ์ของวัตถุด้วยรูปทรงรี ค่าตัวชี้วัดข้างต้นที่ได้จากการนำปริภูมิเวรณซ์ของวัตถุมาใช้เป็นปริภูมิเวรณซ์ของภารกิจ เมื่อพิจารณาในเชิงฟิสิกส์แล้ว จะมีความหมายคือ ขนาดของแรงกระทำบนวัตถุที่มากที่สุดที่ท่าจับสามารถต้านทานได้ไม่ว่าจะกระทำลง ณ จุดใดบนวัตถุก็ตาม งานของ [40] เสนอตัวชี้วัดที่คล้ายกับ [48] แต่ใช้วิธีแบ่งทิศทางของแรงให้มีจำนวนจำกัด แล้ววัดผลออกมาเป็นรูปทรงปิดแทน เนื่องจากการประมาณปริภูมิเวรณซ์ของวัตถุให้ตรงตามนิยามนั้นเป็นไปได้อย่าง การใช้ปริภูมิเวรณซ์ของวัตถุที่สนใจเฉพาะแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของวัตถุแทน [41] ก็เป็นอีกหนึ่งตัวเลือก ต่อมาภายหลัง มีผู้เสนอวิธีการคำนวณตัวชี้วัดคุณภาพเดียวกันนี้แบบปรับปรุง [42] ทั้งในเชิงของความแม่นยำของผลเฉลยโดยใช้วิธียิงลำเส้นตรง [43] ทำให้ไม่ต้องประมาณกรวยเสียดทานด้วยพีระมิดฐานหลายเหลี่ยม และในเชิงของประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี ที่สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วกว่าวิธีของ [40]

5 แนวคิดของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

5.1) แนวคิดของการวิจัย

สืบเนื่องจากตัวชี้วัดคุณภาพของท่าจับข้างต้น ที่ถูกนำเสนอโดย [40–42,48] นั้นมีความหมายที่สมเหตุสมผลในเชิงของฟิสิกส์ คือ ขนาดของแรงกระทำบนวัตถุที่มากที่สุดที่ท่าจับสามารถต้านทานได้ไม่ว่าจะกระทำลง ณ จุดใดบนวัตถุก็ตาม แต่ข้อเสียของตัวชี้วัดคุณภาพนี้คือ ยังต้องอาศัยเวลาในการคำนวณมาก เนื่องจากต้องทำการพิจารณาทั้งวัตถุ ทำให้ไม่สามารถประเมินผลท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงจำนวนมากที่ได้มาจากขั้นตอนวิธีอื่นๆ ได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงต้องการนำเสนอวิธีการคำนวณตัวชี้วัดนี้แบบปรับปรุงในเชิงของเวลาประมวลผลที่ใช้น้อยลง

จากวิธีการที่ผ่านมา นั้น จะเห็นว่า วิธีของ [48] นั้นอาศัยการประมาณปริภูมิเวรณซ์ของวัตถุด้วยรูปทรงรี สำหรับวิธีของ [41] นั้นใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงเส้น (linear optimization) ซึ่งใช้เวลานาน กว่าวิธีของ [40,42] ซึ่งอาศัยการแก้ปัญหาที่เฉพาะเจาะจงมากขึ้น โดยการหาจุดตัดระหว่างลำเส้นตรงของเวรณซ์ที่เกิดขึ้นจากแรงบนวัตถุ กับปริภูมิเวรณซ์ของวัตถุ ซึ่งต้องอาศัยการตรวจสอบทุกๆ จุดบนพื้นผิววัตถุ ทำให้ต้องใช้เวลานาน

จากข้อสังเกตนี้เอง ทำให้ได้แนวคิดที่ว่า อาจมีบางจุดบนวัตถุที่ไม่จำเป็นต้องนำมาคิดหาจุดตัด เกิดเป็นแนวคิดหลักของวิทยานิพนธ์นี้ คือการลดปริมาณของข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในการหาตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับ เนื่องจากตัวชี้วัดนี้จำเป็นต้องพิจารณาวัตถุทั้งหมด แต่อันที่จริงแล้ว จุดบนวัตถุที่บอบบางต่อแรงกระทำภายนอกมากที่สุดเพียงจุดเดียวเท่านั้นที่จะส่งผลต่อค่าตัวชี้วัดนี้ แสดงว่าพื้นผิวบนวัตถุส่วนใหญ่ไม่จำเป็นต้องนำมาคิด ในทางเดียวกัน จุดบนพื้นผิวของปริภูมิเวรณซ์ของวัตถุที่จะต้องนำไปคิดแทนปริภูมิเวรณซ์ของภารกิจนั้นก็มีเพียงจุดๆ เดียวเท่านั้นที่มีอัตราส่วนย่อ/ขยาย น้อยสุด ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของท่าจับ

นอกจากนี้ ทุกวิธีนั้นต้องอาศัยการประมาณไม่ว่าจะเป็น การประมาณปริภูมิเวรณซ์ของวัตถุด้วยรูปทรงรี การประมาณกรวยแรงเสียดทานด้วยพีระมิด หรือการเลือกตัวอย่างทิศทางของแรงจากพื้นผิวของทรงกลมในสามมิติ ทำให้ได้เพียงผลเฉลยที่เป็นค่าประมาณ โดยไม่มีการพิสูจน์ขอบเขตของค่าผิดพลาด ผลเฉลยที่ได้ไม่ถูกต้องนัก

วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการลดจำนวนจุดบนพื้นผิวของวัตถุที่ต้องนำมาทดสอบ โดยจุดที่ลดนั้นจะต้องไม่ส่งผลต่อค่าผลเฉลยของตัวชี้วัด รวมทั้งการลดปริมาณพื้นผิวของปริภูมิเวรณซ์ของวัตถุที่จะต้องนำไปทดสอบ และขั้นตอนวิธีที่ให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับค่าผลเฉลยจริงมากขึ้น โดยลดการประมาณในบางขั้นตอนที่ไม่จำเป็นให้เหลือน้อยลง

5.2) การวัดผลการทดลอง

การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ จะถูกแบ่งเป็นสามส่วน ดังนี้

1) การทดลองเพื่อวัดผลความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอ โดยจะดำเนินการพัฒนาขั้นตอนวิธีที่ถูกนำเสนอโดย [40,42] และเปรียบเทียบค่าของตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับที่ได้ ระหว่างขั้นตอนวิธีที่ไม่ใช้ตัวกรองก่อนกับการใช้ตัวกรองก่อนเรียกใช้ขั้นตอนวิธี โดยคาดหวังว่า ค่าของตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับที่ได้จากแต่ละวิธีนั้น จะต้องมีค่าเท่ากัน นั่นคือ ตัวกรองไม่มีผลต่อตัวชี้วัดคุณภาพท่าจับดังกล่าว

2) การทดลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในการประมวลผล โดยจะนำเวลาที่ใช้ในการคำนวณตัวชี้วัดมาเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีจำนวนสี่ขั้นตอนวิธี ได้แก่

1. ขั้นตอนวิธีของ [40]
2. ขั้นตอนวิธีที่ใช้ตัวกรองข้อมูลที่นำเสนอก่อน แล้วค่อยใช้วิธีของ [40]
3. ขั้นตอนวิธีของ [42]
4. ขั้นตอนวิธีที่ใช้ตัวกรองข้อมูลที่นำเสนอก่อน แล้วค่อยใช้วิธีของ [42]

ในการทดลองนี้ มีความคาดหวังว่าเวลาที่ใช้ใน 2. ควรจะน้อยกว่า 1. และเวลาที่ใช้ใน 4. ควรจะน้อยกว่า 3.

3) การทดลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลี่ยที่ได้จากขั้นตอนวิธีที่ในวรรณกรรม กับขั้นตอนวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ โดยจะนำค่าตัวชี้วัดคุณภาพการจับมาเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีจำนวนสามขั้นตอนวิธี ได้แก่

1. ขั้นตอนวิธีของ [40]
2. ขั้นตอนวิธีของ [42]
3. ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

ในการทดลองนี้ มีความคาดหวังว่าผลเฉลี่ยที่ได้จาก 3. ควรจะใกล้เคียงผลเฉลี่ยจริงมากกว่า โดยผลเฉลี่ยจริงจะหามาจากการเลือกใช้ 2. แล้วเลือกจำนวนทิศทางของแรงให้มากขึ้น จนใกล้เคียงกับทรงกลม

6 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) งานวิจัยนี้จะคิดค้น สร้าง และพัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้คำนวณหา เฉพาะคุณภาพของท่าจับที่คำนึงถึงความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระทำภายนอกที่กระทำลงบนวัตถุเท่านั้น
- 2) ระบบมีข้อมูลของวัตถุล่วงหน้าอย่างครบถ้วน
- 3) ข้อมูลของวัตถุสามารถอยู่ในรูปแบบกลุ่มของจุด (point cloud) พร้อมทั้งทิศทางในแนวซี้เข้าวัตถุ หรือเป็นด้าน (mesh) ที่กำหนดจุดยอดเป็นจุดสามจุดก็ได้
- 4) ระบบใช้ข้อมูลของจุดสัมผัสในรูปแบบกลุ่มของจุด พร้อมทั้งทิศทางในแนวซี้เข้าวัตถุ
- 5) ระบบเพียงแค่คำนวณตัวชี้วัดคุณภาพของท่าจับเท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงวิธีการเคลื่อนแขนหุ่นยนต์ไปวางนิ้วลงบนวัตถุ หรือวิธีการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง
- 6) งานวิจัยนี้จะทดลองในระบบจำลองเท่านั้น

7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการจับ
- 2) ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับตัวชี้วัดคุณภาพการจับ
- 3) ศึกษาวิธีที่เกี่ยวข้องในการคำนวณแรงที่น้อยที่สุดที่ท่าจับสามารถต้านทานได้
- 4) คิดค้นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่ใช้คำนวณคุณภาพของท่าจับ
- 5) ดำเนินการพัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพของการคำนวณคุณภาพท่าจับ
- 6) วัดผลและจัดเก็บผลการทดลอง
- 7) สรุปผลการทดลอง และทำการเรียบเรียงรูปเล่มวิทยานิพนธ์

8 เอกสารอ้างอิง

- [1] V.-D. Nguyen, Constructing Force- Closure Grasps, *The International Journal of Robotics Research*. 7 (1988) 3–16. doi:10.1177/027836498800700301.
- [2] J. Ponce, S. Sullivan, A. Sudsang, J. Boissonnat, J.-P. Merlet, On Computing Four-Finger Equilibrium and Force-Closure Grasps of Polyhedral Objects, *International Journal of Robotics Research*. 16 (1996) 11–35.
- [3] E. Rimon, J. Burdick, On force and form closure for multiple finger grasps, in: , 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996. Proceedings, 1996: pp. 1795–1800 vol.2. doi:10.1109/ROBOT.1996.506972.
- [4] X. Zhu, J. Wang, Synthesis of force-closure grasps on 3-D objects based on the Q distance, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 19 (2003) 669–679. doi:10.1109/TRA.2003.814499.
- [5] A. Bicchi, On the Closure Properties of Robotic Grasping, *International Journal of Robotics Research*. 14 (1995) 319–334.
- [6] R.C. Brost, M.T. Mason, Graphical Analysis of Planar Rigid-body Dynamics with Multiple Frictional Contacts, in: *The Fifth International Symposium on Robotics Research*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1990: pp. 293–300. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=112687.112719> (accessed October 23, 2014).
- [7] N. Niparnan, A. Sudsang, P. Chongstitvatana, Positive Span of Force and Torque Components in Three-Dimensional Four-Finger Force-Closure Grasps, *Advanced Robotics*. 22 (2008) 1497–1520. doi:10.1163/156855308X360596.
- [8] N. Niparnan, T. Phoka, Y. Suttasupa, A. Sudsang, New computational method for three-fingered force-closure test, *Robotica*. FirstView (2013) 1–21. doi:10.1017/S0263574713001057.
- [9] Y.-H. Liu, Qualitative test and force optimization of 3-D frictional form-closure grasps using linear programming, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 15 (1999) 163–173. doi:10.1109/70.744611.
- [10] N. Niparnan, T. Phoka, A. Sudsang, Heuristic approach for multiple queries of 3D n-finger frictional force closure grasp, in: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009. IROS 2009, 2009: pp. 1817–1822. doi:10.1109/IROS.2009.5354481.

- [11] Y. Zheng, C.-M. Chew, Distance Between a Point and a Convex Cone in n -Dimensional Space: Computation and Applications, *IEEE Transactions on Robotics*. 25 (2009) 1397–1412. doi:10.1109/TRO.2009.2033333.
- [12] V.-D. Nguyen, Constructing stable grasps in 3D, in: 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings, 1987: pp. 234–239. doi:10.1109/ROBOT.1987.1088008.
- [13] J. Ponce, S. Sullivan, J.-D. Boissonnat, J.-P. Merlet, On characterizing and computing three- and four-finger force-closure grasps of polyhedral objects, in: , 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993. Proceedings, 1993: pp. 821–827 vol.2. doi:10.1109/ROBOT.1993.291933.
- [14] D. Ding, Y.-H. Liu, S. Wang, Computing 3-D optimal form-closure grasps, in: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00, 2000: pp. 3573–3578 vol.4. doi:10.1109/ROBOT.2000.845288.
- [15] D. Ding, Y.-H. Liu, M.Y. Wang, On computing immobilizing grasps of 3-D curved objects, in: Proceedings 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2001, 2001: pp. 11–16. doi:10.1109/CIRA.2001.1013165.
- [16] C. Borst, M. Fischer, 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: pp. 3692–3697 vol.3. doi:10.1109/IROS.2003.1249729.
- [17] J.-W. Li, H. Liu, H. Cai, On computing three-finger force-closure grasps of 2-D and 3-D objects, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 19 (2003) 155–161. doi:10.1109/TRA.2002.806774.
- [18] Y.-H. Liu, M. Lam, D. Ding, A complete and efficient algorithm for searching 3-D form-closure grasps in the discrete domain, *IEEE Transactions on Robotics*. 20 (2004) 805–816. doi:10.1109/TRO.2004.829500.
- [19] N. Niparnan, 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: pp. 3692–3697 vol.4. doi:10.1109/IROS.2004.1389989.
- [20] N. Niparnan, T. Phoka, 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. doi:10.1109/ROBIO.2006.340335.

- [21] N. Niparnan, A. Sudsang, A Heuristic Approach for Computing Frictionless Force-Closure Grasps of 2D Objects from Contact Point Set, in: 2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2006: pp. 1–6. doi:10.1109/RAMECH.2006.252659.
- [22] N. Niparnan, A. Sudsang, Computing All Force-Closure Grasps of 2D Objects from Contact Point Set, in: 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006: pp. 1599–1604. doi:10.1109/IROS.2006.282049.
- [23] C. Sangkhavijit, N. Niparnan, 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. doi:10.1109/RAMECH.2006.252746.
- [24] S. El-Khoury, 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. doi:10.1109/ROBOT.2009.5152272.
- [25] M.A. Roa, R. Suárez, Grasp quality measures: review and performance, *Auton Robot.* (2014) 1–24. doi:10.1007/s10514-014-9402-3.
- [26] C. Ferrari, J. Canny, Planning optimal grasps, in: , 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1992. Proceedings, 1992: pp. 2290–2295 vol.3. doi:10.1109/ROBOT.1992.219918.
- [27] D. Kirkpatrick, B. Mishra, C.-K. Yap, Quantitative Steinitz's theorems with applications to multifingered grasping, *Discrete Comput Geom.* 7 (1992) 295–318. doi:10.1007/BF02187843.
- [28] A. Miller, P.K. Allen, Examples of 3D grasp quality computations, in: 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999. Proceedings, 1999: pp. 1240–1246 vol.2. doi:10.1109/ROBOT.1999.772531.
- [29] Y. Zheng, An Efficient Algorithm for a Grasp Quality Measure, *IEEE Transactions on Robotics.* 29 (2013) 579–585. doi:10.1109/TRO.2012.2222274.
- [30] Z. Li, S.S. Sastry, Task-oriented optimal grasping by multifingered robot hands, *IEEE Journal of Robotics and Automation.* 4 (1988) 32–44. doi:10.1109/56.769.
- [31] Y.C. Park, G.P. Starr, Grasp Synthesis of Polygonal Objects Using a Three-fingered Robot Hand, *Int. J. Rob. Res.* 11 (1992) 163–184. doi:10.1177/027836499201100301.

- [32] B. Mirtich, J. Canny, Easily computable optimum grasps in 2-D and 3-D, in: , 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994. Proceedings, 1994: pp. 739–747 vol.1. doi:10.1109/ROBOT.1994.351399.
- [33] D. Ding, Y.-H. Lee, S. Wang, Computation of 3-D form-closure grasps, IEEE Transactions on Robotics and Automation. 17 (2001) 515–522. doi:10.1109/70.954765.
- [34] E. Chinellato, A. Morales, R.B. Fisher, A.P. del Pobil, Visual quality measures for Characterizing Planar robot grasps, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews. 35 (2005) 30–41. doi:10.1109/TSMCC.2004.840061.
- [35] R. Balasubramanian, L. Xu, P.D. Brook, J.R. Smith, 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. doi:10.1109/ROBOT.2010.5509855.
- [36] M.A. Roa, R. Suarez, Computation of Independent Contact Regions for Grasping 3-D Objects, IEEE Transactions on Robotics. 25 (2009) 839–850. doi:10.1109/TRO.2009.2020351.
- [37] J. Ponce, B. Faverjon, On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects, IEEE Transactions on Robotics and Automation. 11 (1995) 868–881. doi:10.1109/70.478433.
- [38] T. Phoka, P. Vongmasa, C. Nilwatchararang, P. Pipattanasomporn, A. Sudsang, Optimal Independent Contact Regions for Two-fingered Grasping of Polygon, Robotica. 30 (2012) 879–889. doi:10.1017/S0263574711001044.
- [39] J.P. D. Stam, A System For Planning And Executing Two-finger Force-Closure Grasps Of Curved 2D Objects, 1 (1992) 210 – 217. doi:10.1109/IROS.1992.587323.
- [40] M. Strandberg, B. Wahlberg, A method for grasp evaluation based on disturbance force rejection, IEEE Transactions on Robotics. 22 (2006) 461–469. doi:10.1109/TRO.2006.870665.
- [41] H. Jeong, J. Cheong, Evaluation of 3D grasps with physical interpretations using object wrench space, Robotica. 30 (2012) 405–417. doi:10.1017/S0263574711000713.
- [42] S. Wen, T. Wu, Grasp evaluation and contact points planning for polyhedral objects using a ray-shooting algorithm, J. Zhejiang Univ. - Sci. C. 13 (2012) 218–231. doi:10.1631/jzus.C1100151.

- [43] Y. Zheng, M.C. Lin, 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. doi:10.1109/ROBOT.2010.5509297.
- [44] 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.
- [45] Y.-H. Liu, M. Wang, Qualitative test and force optimization of 3D frictional force-closure grasps using linear programming, in: 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998. Proceedings, 1998: pp. 3335–3340 vol.4. doi:10.1109/ROBOT.1998.680953.
- [46] N. Pollard, Synthesizing Grasps from Generalized Prototypes, in: In Proc. IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation, 1996: pp. 2124–2130.
- [47] C. Borst, M. Fischer, G. Hirzinger, A fast and robust grasp planner for arbitrary 3D objects, in: 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999. Proceedings, 1999: pp. 1890–1896 vol.3. doi:10.1109/ROBOT.1999.770384.
- [48] C. Borst, M. Fischer, G. Hirzinger, Grasp planning: how to choose a suitable task wrench space, in: 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04, 2004: pp. 319–325 Vol.1. doi:10.1109/ROBOT.2004.1307170.
- [49] X. Zhu, H. Ding, H. Li, A quantitative measure for multi-fingered grasps, in: 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2001. Proceedings, 2001: pp. 213–219 vol.1. doi:10.1109/AIM.2001.936456.
- [50] R. Haschke, J.J. Steil, I. Steuwer, H. Ritter, Task-oriented quality measures for dextrous grasping, in: 2005 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2005. CIRA 2005. Proceedings, 2005: pp. 689–694. doi:10.1109/CIRA.2005.1554357.