

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องประดับเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีการส่งออก เพื่อนำรายได้เข้าสู่ประเทศไทย และมีการจ้างแรงงานภายในประเทศจำนวนมากจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ช่วยฟื้นฟูเศรษฐกิจของประเทศได้ แต่การแข่งขันสูงทำให้การพัฒนาต้องใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยร่วมกับการจัดระบบการบริหาร/จัดการผลิตเพื่อนำไปสู่การแข่งขันทางด้านคุณภาพและราคา นั่นคือการลดต้นทุนในการผลิต การประยุกต์ใช้หุ่นยนต์เพื่อช่วยในการประกอบเครื่องประดับ จึงเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มคุณภาพและลดต้นทุนให้ผู้ประกอบไทย ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนา การประกอบเครื่องประดับด้วย หุ่นยนต์แบบขนาน เพื่อช่วยเพิ่มความเร็ว ลดความสูญเสีย ลดต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพของการประกอบเครื่องประดับ

1.1.1 สถานการณ์การค้าสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับปี 2552 (ม.ค.-ต.ค.)

การส่งออก

การส่งออกสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับของไทย [1] ในช่วง 10 เดือน (ม.ค.-ต.ค.) ปี 2552 มีมูลค่ารวมทั้งสิ้น 8,774.84 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ เพิ่มขึ้นจากระยะเดียวกันของปี 2551 ร้อยละ 30.85 คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 7.07 ของมูลค่าการส่งออกทั้งหมดของไทย โดยสินค้าที่ส่งออกมาใน ช่วง 10 เดือน (ม.ค.-ต.ค.) ปี 2552 [1] ได้แก่ ทองคำยังไม่ได้ขึ้นรูป เครื่องประดับแท้ อัญมณี เครื่องประดับอัญมณีเทียม และโลหะมีค่าและของที่หุ้มด้วยโลหะมีค่าอื่นๆ ตามลำดับ

มูลค่า: ล้านบาท

ตารางที่ 1.1 มูลค่าการส่งออกสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับ [1]

| รายการสินค้า | ปี 2551 (ม.ค.-ต.ค.) | ปี 2552 (ม.ค.-ต.ค.) | (%) เปลี่ยนแปลง 52/51 (ม.ค.-ต.ค.) | (%) สัดส่วน ปี 2552 (ม.ค.- ต.ค.) |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|--|
| ทองคำยังไม่ได้ขึ้นรูป | 2,480.32 | 5,396.54 | 117.57 | 61.50 |
| เครื่องประดับแท้ | 1,465.11 | 1,012.89 | -30.87 | 11.54 |
| อัญมณี | 163.88 | 175.65 | 7.18 | 2.00 |
| เครื่องประดับอัญมณีเทียม | 103.33 | 94.55 | -8.49 | 1.01 |
| โลหะมีค่าและของที่หุ้มด้วยโลหะมีค่า | 60.81 | 50.21 | -17.43 | 0.57 |
| อื่นๆ | | | | |
| อื่นๆ | | | | |
| รวม | 6,705.87 | 8,774.84 | 30.85 | 100.00 |

การนำเข้า

ไทยนำเข้าสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับในช่วง 10 เดือน (ม.ค.-ต.ค.) ปี 2552 มูลค่ารวมทั้งสิ้น 4,082.70 ล้านบาท ลดลงร้อยละ 38.02 เทียบกับระยะเดียวกันของปี 2551 โดยนำเข้าอัญมณีและเครื่องประดับที่มีการนำเข้ามากในช่วง 10 เดือนแรกของปี 2552 ได้แก่ ทองคำ เพชร และเครื่องประดับแท้ ตามลำดับ [1]

มูลค่า: ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ

ตารางที่ 1.2 มูลค่าการนำเข้าสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับ

| รายการสินค้า | ปี 2551 (ม.ค.-ต.ค.) | ปี 2552 (ม.ค.-ต.ค.) | (%) เปลี่ยนแปลง 52/51 (ม.ค.-ต.ค.) | (%) สัดส่วน ปี 2552 (ม.ค.- ต.ค.) |
|--------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|--|
| ทองคำ | 3,986.99 | 2,379.82 | -40.31 | 58.29 |
| เพชร | 1,236.11 | 622.22 | -49.66 | 15.24 |
| เครื่องประดับแท้ | 517.86 | 414.60 | -19.94 | 10.16 |
| เครื่องประดับเทียม | 18.28 | 16.08 | -12.04 | 0.39 |
| อื่นๆ | 827.79 | 649.98 | -21.48 | 15.92 |
| รวม | 6,587.03 | 4,082.70 | -38.02 | 100.00 |

1.1.2 ปัญหาและอุปสรรค จากการประชุมหารือร่วมกันระหว่างภาครัฐ/เอกชน

เพื่อพิจารณาประเมินสถานการณ์และแนวโน้มการส่งออกสินค้าอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับพบว่าสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับยังมีปัญหาอุปสรรคดังนี้

1. การขาดแรงงานมีฝีมือ และต้นทุนแรงงานสูงขึ้นทุกๆปี
2. การขาดเทคโนโลยีใหม่ๆ ในการผลิตเครื่องประดับและการเชื่อมโยงอุตสาหกรรมต้นน้ำจนถึงปลายน้ำยังมีไม่เพียงพอ

แนวทางแก้ไข สำหรับแนวทางแก้ไขปัญหาที่ประชุมเห็นว่า ภาครัฐและเอกชนต้องร่วมกันแก้ไขปัญหา โดยมีแนวทางคือ พัฒนาเทคโนโลยีในการผลิต การกระจาย การออกแบบ และการบริหารจัดการ เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มและความเชื่อมั่นให้แก่สินค้าให้เป็นที่ยอมรับให้มากขึ้น

จากภาวะวิกฤติเศรษฐกิจโลก โดยเฉพาะตลาดสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และยุโรป ที่ทำให้ผู้บริโภคต้องประหยัดค่าใช้จ่ายลง โดยมีทั้งกลุ่มที่ชะลอหรือไม่ซื้อเลย และกลุ่มที่หันไปซื้อสินค้าเครื่องประดับที่มีราคาไม่แพงมากนักแทน อาทิ เครื่องประดับเงิน และเครื่องประดับเทียม ส่งผลให้ผู้ประกอบการหลายรายประสบปัญหาสภาพคล่องทางการเงิน

จากทิศทางการเติบโตของความต้องการเครื่องประดับเทียมและปัญหาของการผลิตดังกล่าว ทำให้อุตสาหกรรมการออกแบบและผลิตเครื่องประดับเทียมจำเป็นต้องมีการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการ

ผลิตให้สอดคล้องกับแนวโน้มความต้องการที่เพิ่มขึ้นและแก้ไขปัญหาในการผลิต ซึ่งอุตสาหกรรม การผลิตเครื่องประดับเทียมเป็นอุตสาหกรรมที่พึ่งแรงงานฝีมือเป็นจำนวนมากซึ่งถือเป็นทรัพยากร การผลิตที่สำคัญและเป็นตัวชี้วัดผลผลิตทั้งในแง่เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพและอุตสาหกรรมนี้มัก เผชิญปัญหาอย่างมากเมื่อใบสั่งผลิตเข้ามาแต่ไม่สามารถจัดหาหรือพัฒนาแรงงานฝีมือเหล่านี้ได้ทัน กับความต้องการ ดังนั้นการนำเอาระบบควบคุมอัตโนมัติและหุ่นยนต์เข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมผลิต เครื่องประดับเทียมนั้นทำให้ลดความเสี่ยงจากการขาดแคลนแรงงาน ลดต้นทุนทางด้านแรงงาน และ ทำให้สินค้าที่ได้มีคุณภาพสม่ำเสมอมากขึ้น เนื่องจากคุณภาพสินค้าของแรงงานคนนั้นมีค่าไม่แน่นอน แต่เครื่องจักรและหุ่นยนต์สามารถผลิตสินค้าที่มีคุณภาพแน่นอนและยืดหยุ่นกว่า อีกทั้งยังสามารถ ทำงานได้อย่างเต็มที่อยู่ตลอดเวลา

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบ แบบหุ่นยนต์แบบขนาน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ กับการประกอบเครื่องประดับ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. สามารถประกอบเครื่องประดับแบบ ฟังเม็ดอัญมณีลงบนตัวเรือนแบบ ยึดติดด้านเดียวได้
2. สามารถเข้าชิ้นงานเชิงมุมได้ $0 - 20$ องศา รอบแกน Z และสามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ได้ 10 มิลลิเมตร
3. มีรูปทรงพื้นที่ทำงาน (Working Space) เป็นทรงกระบอก และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Working Space ไม่เกิน 83 มิลลิเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบแบบ Parallel เพื่อช่วยประกอบอัญมณีเทียมลง บนตัวเรือนได้
2. สามารถนำงานวิจัยนี้ไปเป็นพื้นฐานของการวิจัยการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ในการประกอบ ชิ้นงานที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้

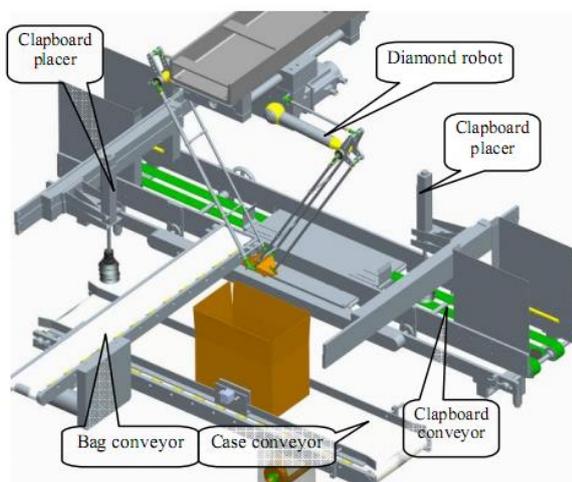
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นทั้งหมดเจ็ดบท บทที่หนึ่งประกอบด้วยความสำคัญ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ในบทที่สองเป็นรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในบทที่สามเป็น รายละเอียดของทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางกลของแขนหุ่นยนต์ ในบทที่สี่ได้อธิบาย รายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบแขนหุ่นยนต์ ในบทที่ห้าเป็นรายละเอียดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และแนวทางในการเขียนโปรแกรมควบคุมแขนหุ่นยนต์ บทที่หกเป็นการทดลองและผลการทดลอง และบทที่เจ็ดเป็นการสรุปเนื้อหาของงาน ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

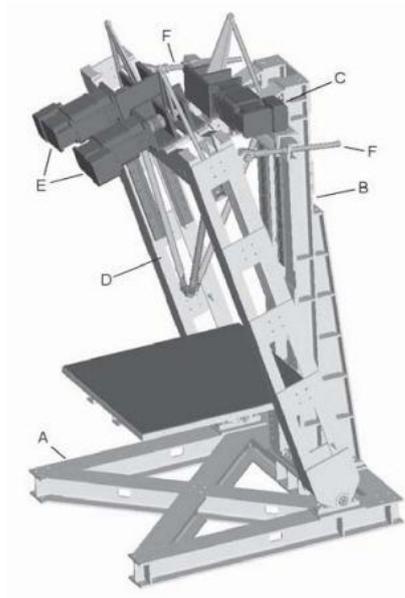
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ในการช่วยในอุตสาหกรรมนั้นมีมาอยู่หลากหลาย ไม่เว้นแม้แต่หุ่นยนต์แบบขนาน ประกอบชิ้นงานมีมาให้เห็นอยู่ในหลากหลายอุตสาหกรรม Liangan Zhang [2] ซึ่งทำงานอยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัย Tianjin ในประเทศจีน ได้ทำการศึกษา กระบวนการผลิตเดิมและ ได้ออกแบบแขนกลแบบ Parallel Link Robot แบบ Translational 2 DOF ที่ชื่อว่า Diamond robot ในงานขนถ่าย non-PVC Bags ซึ่งขณะนั้น การเติบโตของการผลิต non-PVC Transfusion Bags เป็นไปอย่างมาก ทำให้ Line การบรรจุ Transfusion Bags' แบบเดิมล้าสมัยไปอย่างรวดเร็ว จึงได้นำ Diamond Robot เข้ามาใช้ในขั้นตอน Case Packaing เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขนถ่ายลดปัญหาคอขวดในระบบและทำให้ระบบมีความเป็นอัตโนมัติ (Automation) และ ยืดหยุ่น (Flexible) ขึ้นมาได้



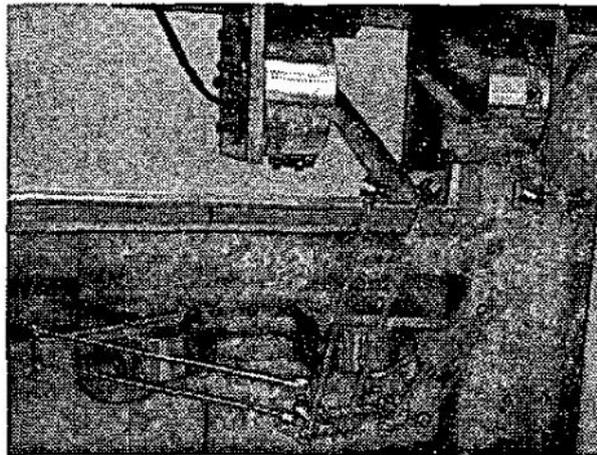
รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์ลำเลียงสินค้าแบบ Parallel [2]

อุปสรรคอย่างหนึ่งของการออกแบบหุ่นยนต์แบบ Parallel คือการลดต้นทุน โดยเฉพาะเมื่อต้องเทียบกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่สร้างแบบ Serial Robot ที่ผลิตเป็นจำนวนมากเชิงอุตสาหกรรม และมีความเชี่ยวชาญในการผลิตไปแล้ว แม้ว่าโครงสร้างและส่วนประกอบของ หุ่นยนต์แบบขนาน นั้นง่ายกว่า Serial Robots Bruzzone L.E. [3] ได้ออกแบบหุ่นยนต์โดยใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไปนั้นยอมทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง



รูปที่ 2.2 ต้นแบบของ Low-Cost Parallel Robot [3]

ส่วนในงานที่ต้องการ DOF มากกว่า 2 เช่น หุ่นยนต์แบบขนานแบบ 4-DOF การหาจลนศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics) นั้นซับซ้อนมาก Hee-Byoung Choi [4] ได้ศึกษาจลนศาสตร์ไปข้างหน้าของหุ่นยนต์แบบขนานแบบ 4-DOF H4 ปรากฏว่า Solution ของ จลนศาสตร์ไปข้างหน้า อยู่ในรูปสมการ Polynomial 16 Degree ซึ่งซับซ้อนและใช้กำลังของเครื่องคอมพิวเตอร์สูงในการประมวลผล ดังรูปที่ 2.3

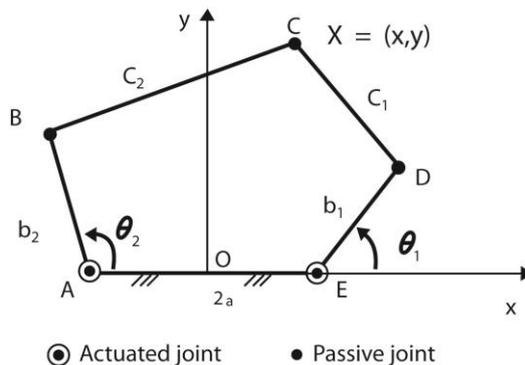


รูปที่ 2.3 Prototype ของหุ่นยนต์ H4 [4]

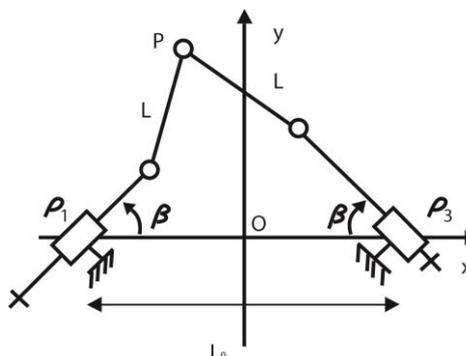
ซึ่งรูปสมการเป็นดังสมการ (2.1)

$$\begin{aligned}
 &0.001585231T^{16} - 0.0100704T^{15} + 0.0256391T^{14} - 0.0399905T^{13} + \\
 &0.0467265T^{12} - 0.0423545T^{11} + 0.0298868T^{10} - 0.016526T^9 + 0.00707312T^8 - \\
 &0.00226626T^7 + 0.000522724T^6 - 0.0000837566T^5 + 9.03024 \cdot 10^{-6}T^4 - 6.34148 \cdot 10^{-7}T^3 + \\
 &2.76046 \cdot 10^{-8}T^2 - 6.73202 \cdot 10^{-10}T + 7.00585 \cdot 10^{-12} = 0
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

การเลือกรูปแบบของหุ่นยนต์แบบขนาน นอกจากพิจารณารูปสมการแล้ว จำเป็นต้องวิเคราะห์คุณลักษณะอย่างอื่นด้วย โดย Shibo Sun [5] ได้กล่าวถึงคุณลักษณะที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือก Model ของหุ่นยนต์แบบขนานในหัวข้อรายงานชื่อ “A Study on Five-Bar Manipulators for Semiconductor Packaging Applications” อาทิเช่น ค่า Workspace Volume index(WVI), Ratio of workspace volume ฯลฯ และการพิจารณาภาวะ Singularity รวมถึงขอบเขตบริเวณของ Dexterity ด้วย ซึ่งในงาน Semiconductor นี้ต้องการหุ่นยนต์ที่สามารถเชื่อมวงจรรวดด้วยความเร็วและความแม่นยำที่สูง ซึ่งหุ่นยนต์ Parallel แบบ 5Bar Linkage 2-DOF เป็นตัวเลือกที่ดี ซึ่งในงานนี้ Shibo Sun ได้เปรียบเทียบรูปแบบของโครงสร้าง คือ 5-R และ PRRRP ดังรูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 โครงสร้าง จลนศาสตร์ ของรูปแบบ โครงสร้างแบบ 5R [5]



รูปที่ 2.5 โครงสร้าง จลนศาสตร์ ของรูปแบบ PRRRP [5]

ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้กล่าวถึงรูปสมการจลนศาสตร์ผกผัน ของ 5R และ PRRRP ดังสมการ(2.2)

และ

$$\begin{aligned}\theta_1 &= -\beta_1 + \arcsin F_1 \\ \theta_2 &= -\beta_2 + \pi - \arcsin F_2\end{aligned}\quad (2.2)$$

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \left(x + \frac{L_0}{2}\right) \cos \beta + y \sin \beta - \sqrt{H_1} \\ \rho_2 &= -\left(x - \frac{L_0}{2}\right) \cos \beta + y \sin \beta - \sqrt{H_2}\end{aligned}\quad (2.3)$$

มีการวิเคราะห์รูปแบบของโครงสร้าง 5R ในค่า Workspace Volume index(WVI) ดังสมการ(2.5) ซึ่งเป็นอัตราระหว่าง Working Space ต่อ ขนาดของโครงสร้างหุ่นยนต์ (Envelope Size) ดังสมการ(2.4)

$$V = 2a\sqrt{(b+c)^2 - a^2} \quad (2.4)$$

$$W_{vi} = \frac{W_v}{V} = \frac{l^2}{2a\sqrt{(b+c)^2 - a^2}} \quad (2.5)$$

และในส่วนของ PRRRP เป็นดังสมการ(2.6) และ (2.7)

$$V = 2 \max[c, (a+b)]\sqrt{(b+c)^2 - a^2} \quad (2.6)$$

$$W_{vi} = \frac{W_v}{V} = \frac{l^2}{2 \max[c, (a+b)]\sqrt{(b+c)^2 - a^2}} \quad (2.7)$$

ซึ่งสรุปผลได้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะต่างๆ ระหว่าง 5-R, PRRRP

| Index | 5-R | PRRRP |
|--------------------|---------------|---------------|
| Workspace area | 0.5000 m^2 | 0.5000 m^2 |
| Dexterity | 0.4064~0.998 | 0.4416~0.998 |
| WVI | 0.4846 | 0.1114 |
| Min Singular Value | 0.0818~0.4616 | 0.7248~0.9710 |
| Max Singular Value | 0.1361~0.6282 | 0.9730~1.735 |
| Singular Value | 0.0818~0.6282 | 0.7248~1.735 |

ซึ่งจากตารางที่ 2.1 Shibo Sun สรุปว่า 5R มีค่า WVI ใหญ่กว่าซึ่งถือว่าดีกว่า PRRRP และสรุปว่า 5R มีความแม่นยำ มีค่า Stiffness ดีกว่า เนื่องจาก 5R มีค่า Singular value น้อยกว่า PRRRP เป็นอย่างมาก นั่นเอง ซึ่งทำให้ลดขนาดของมอเตอร์ได้เป็นอย่างมาก

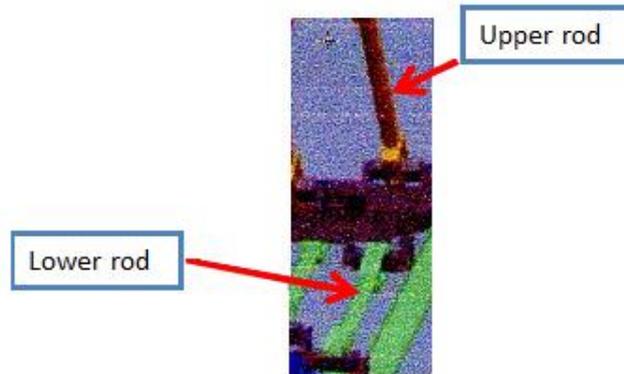
อย่างไรเสียความพยายามในการปรับปรุง จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบขนานยังมีต่อไป ซึ่งนักวิจัยบางท่านได้ใช้ความสามารถของคอมพิวเตอร์โปรแกรมในการ จำลองสถานการณ์ เพื่อพิสูจน์สมการจลนศาสตร์ต่างๆที่ตนคิดค้นขึ้น โดยในปี 2009 ศาสตราจารย์ Cai guangqi จากมหาวิทยาลัย Northeastern University ในประเทศจีนได้ทำงานวิจัยเพื่อสำรวจหาการออกแบบที่ดีที่สุดในส่วนของ Restriction limb ของหุ่นยนต์แบบขนานโดยอาศัยการวิเคราะห์ผลจากการทำด้วยแบบจำลอง ในโปรแกรม ADAMS โดยวิเคราะห์ทั้งส่วนจลนศาสตร์ และ พลวัต (Dynamic) ซึ่งสุดท้ายผู้วิจัยได้กราฟ Kinetic และพลวัตของโครงสร้างส่วน Restrict Limbs นั้นเอง และ ศาสตราจารย์ได้พบจุดที่ดีที่สุดในการออกแบบแขนกลหุ่นยนต์แบบขนานแบบ 3-TPT ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 3-TPT Parallel Robot [6]

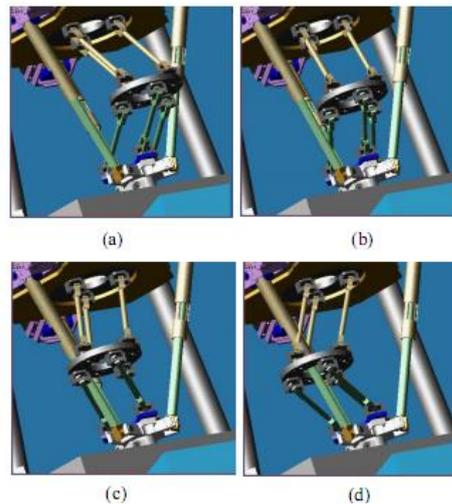
ซึ่งรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดด้วยภาพเคลื่อนไหว ผลปรากฏว่ารูปแบบนี้ทำให้เกิดสถานการณ์การชนกันลดลงและมีประสิทธิภาพนั้นต้อง

1. ความยาวของ Upper side connecting rod ต้องยาวกว่า Lower side connecting rod ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงส่วน Restrict Limbs ที่ประกอบด้วย Upper Rod และ Lower Rod [6]

2. ต้องมีการทำ Optimization ก่อนถึงกำหนดความยาวของ Upper side connecting rod และ Lower side connecting rod ได้



รูปที่ 2.8 การจำลองสถานการณ์ของ PMT เพื่อใช้หาขนาดความยาวที่เหมาะสมของแท่ง rod [6]

โดย

รูปที่ 2.8(a) คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของการเคลื่อนที่

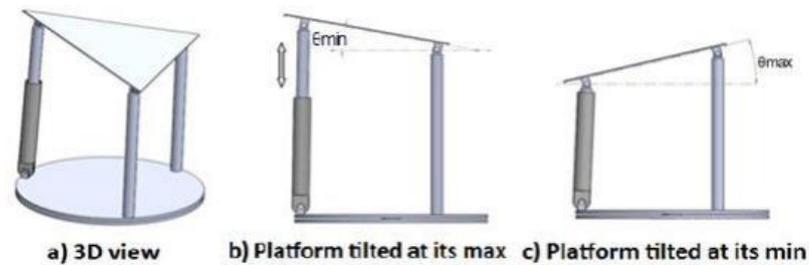
รูปที่ 2.8(b) คือ สถานะการชนกันระหว่าง Underside connecting rod และ drives limb

รูปที่ 2.8(c) คือ สถานะการชนกันระหว่าง Central disc และ driver limb

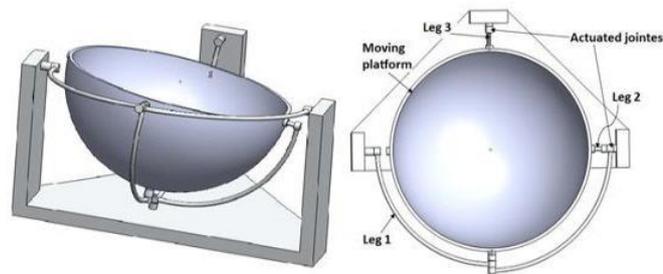
รูปที่ 2.8(d) คือ สถานะการชนกันระหว่าง Upside connecting rod และ drives some limb

แนวทางในการ จำลองสถานะ (Simulation) สำหรับการออกแบบหุ่นยนต์แบบขนาน ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่ง Domingos M.M. [6] ได้วิเคราะห์ ออกแบบ และ จำลองสถานะของหุ่นยนต์แบบขนาน สำหรับอุปกรณ์หันเหตามทิศทางของพระอาทิตย์ โดยใช้แนวคิด ของ Programming-Simulation in the loop ผ่าน โปรแกรม Labview-Solidworks โดยใช้โปรแกรมเชื่อมต่อกกลางที่ชื่อว่า

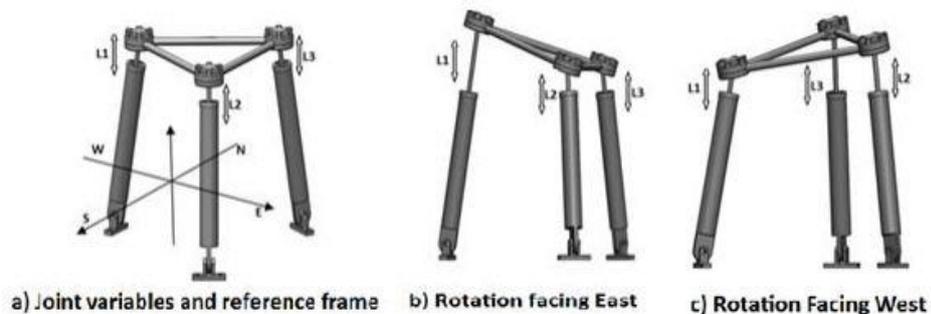
Softmotion ทำให้สามารถทดสอบจลนศาสตร์, การควบคุม ซึ่งเขียนโปรแกรมและควบคุมผ่าน Labview ไปยังรูปแบบที่ออกแบบไว้ใน Solidworks เพื่อพิสูจน์และค้นหา การออกแบบที่ดีที่สุดจากหลายรูปแบบ ดังรูปที่ 2.9 ถึง รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.9 1 DOF Planar Parallel Mechanism [7]



รูปที่ 2.10 2 DOF Spherical Parallel Mechanism (UPS) [7]



รูปที่ 2.11 3 DOF Spatial Parallel Mechanism [7]

ผลลัพธ์ที่ได้คือ สามารถค้นหาสถานะ Singularities ของหุ่นยนต์ ประเมินระยะการเคลื่อนที่และปรับ Parameter ของการออกแบบจนได้หุ่นยนต์ที่ใช้พลังงานน้อยได้ ซึ่งหลังจากการทดลองปรากฏว่า รูปแบบ ดังรูปที่ 2.10 เหมาะสมที่สุดเนื่องจากสามารถรักษา Center of Mass ของตนให้คงที่ในขณะที่ โครงสร้างหมุนหาพระอาทิตย์ได้ มีจำนวน DOF เหมาะสม และใช้ Rotary Motor ทั้งหมดซึ่งมีราคา ถูกกว่า Linear motors

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

แต่เดิมเครื่องจักรกลอัตโนมัติมักถูกผลิตเพื่อการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งในแบบของชิ้นงานจำเพาะแบบหนึ่งซึ่งไม่ยืดหยุ่นต่อการผลิตจำนวนน้อยที่ต้องการมีการเปลี่ยนแปลงการทำงานบ่อยๆ ต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องจักรชนิดใหม่ขึ้น(หุ่นยนต์) ซึ่งโดยอาศัยระบบกลไกหรือก้านโยงต่อกัน โดยเคลื่อนที่ไปตามได้ตามต้องการ โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเขียนเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของก้านโยงกับฐานที่อยู่หนึ่ง ทำให้ได้มาซึ่งการเคลื่อนที่มากที่สุดถึง 6 องศาอิสระ ได้แก่การเคลื่อนที่ในแนวแกน X,Y,Z และการหมุนรอบแกน X,Y,Z ซึ่งจากสมการความสัมพันธ์นี้ทำให้ผู้วิจัยสามารถกำหนดตำแหน่งและการหมุนของส่วนปลายของหุ่นยนต์โดยผ่านทางอุปกรณ์ต้นกำลัง อุปกรณ์ทางกล ทางอิเล็กทรอนิกส์ ผ่านการโปรแกรมด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้องตามความต้องการซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงการทำงานของมนุษย์ได้หุ่นยนต์จัดเป็นเครื่องจักรที่มีความยืดหยุ่น มีความฉลาด และสามารถปฏิบัติงานในบางงานแทนมนุษย์ได้เป็นอย่างดี และนับวันหุ่นยนต์ถูกพัฒนาความสามารถและประสิทธิภาพให้สูงมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งงานที่เหมาะสมกับการนำหุ่นยนต์มาใช้งานนั้นมีลักษณะงานกล่าวคือ เป็นงานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น งานประกอบ งานตัด เจาะ งานที่มีอันตรายจึงใช้หุ่นยนต์ทำงานแทนมนุษย์ เช่น งานขนย้ายสารพิษที่มีอันตราย งานที่ต้องทำงานซ้ำๆ เป็นเวลานาน เช่น งานประกอบชิ้นงาน งานที่ลำบากซึ่งมนุษย์ไม่สามารถทำงานอย่างมีความสุขได้นานนัก เช่น งานที่ต้องทำงานใกล้แหล่งความร้อน งานที่ต้องอยู่ใกล้กับสารเคมีและ งานต้องใช้แรงกายอยู่ตลอดเวลา และงานที่ต้องการสมาธิในการทำงานเป็นระยะเวลายาวนานไม่หยุดพักและต้องทำงานเป็นกะได้ เช่น งานประกอบ งานขัดผิว เป็นต้น

ที่ผ่านมาได้มีการนำหุ่นยนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมอยู่แล้วจำนวนมาก แต่ยังไม่ครอบคลุมอุตสาหกรรมทั้งหมด เนื่องจากข้อจำกัดหลายๆอย่าง อาทิเช่น เงินลงทุนที่ต้องใช้จำนวนมาก ความสามารถของหุ่นยนต์ที่ยังจำกัดอยู่ในบางด้าน ขาดผู้ใช้ที่สามารถแก้ไขการทำงานของหุ่นยนต์ได้อย่างง่ายๆและรวดเร็ว และ การสั่งงานให้หุ่นยนต์ทำงานบางอย่างอาจต้องใช้ความพยายาม การเรียนรู้ และ ระยะเวลา มากกว่าการทำงานด้วยฝีมือมนุษย์

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้ถูกแบ่งเป็นประเภทใหญ่ตามรูปแบบการเคลื่อนที่ทางกลศาสตร์ได้ 2 แบบ กลศาสตร์ คือ แขนกลแบบกลไกอนุกรม (Serial Robot) และ แขนกลแบบกลไกขนาน (Parallel Robot) ซึ่งทั้ง 2 ประเภทนี้ มีข้อดีและข้อเสียต่างกัน การนำไปใช้งานจึงต้องพิจารณาความเหมาะสมในด้านต่างๆด้วย กล่าวคือ หุ่นยนต์ประเภท แขนกลแบบกลไกอนุกรม (Serial Robot) นั้น มีข้อดีและเหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลาย เพราะ มีลักษณะเด่นที่การสั่งงานควบคุมได้ง่าย เพราะ ก้านโยงของหุ่นยนต์นั้นเลียนแบบแขนของมนุษย์ทำให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดจุดปลายของแขน (Pose) ให้ไปตำแหน่งที่ต้องการได้โดยคาดการณ์องศาการหมุนของข้อต่อต่างๆ ในลักษณะเดียวกับที่มนุษย์เอื้อมมือไปหยิบสิ่งของนั่นเอง ข้อดีอีกส่วนคือ มีการใช้ง่ายกันในหลายๆ อุตสาหกรรมทำให้ชิ้นงานต่างๆ ของหุ่นยนต์ถูกผลิตขึ้นมาจำนวนมาก จึงค่อนข้างมีมาตรฐาน ทำให้ต้นทุนของ Part ต่างๆ มีแนวโน้มที่ลดลงเรื่อยๆ แต่ข้อเสียของหุ่นยนต์ประเภทนี้ก็คือ เนื่องจากโครงสร้างของหุ่นยนต์ประเภทนี้เป็นแบบวงรอบเปิด ทำให้ผู้วิจัยต้องติดตั้งต้นกำลังไว้ที่ข้อต่อทุกข้อ หรือไม่ก็ต้องมีกลไกการส่งกำลังไปยังข้อต่อต่างๆ ซึ่งเพิ่มความยุ่งยากและความคลาดเคลื่อนให้กับหุ่นยนต์ ทำให้โครงสร้างมีขนาดใหญ่เพื่อจะจะสามารถรับน้ำหนักจากตัวต้นกำลังและชิ้นงานได้ และการคำนวณต้องมีหลายขั้นตอนมากขึ้น ข้อเสียที่สืบเนื่องต่อมาก็คือ ต้นทุนการผลิตในส่วน โครงสร้างที่สูงขึ้น และ ผู้วิจัยจำเป็นต้องใช้ต้นกำลังในส่วนข้อต่อต่างๆ ที่ใหญ่ขึ้นเพื่อให้ได้กำลังมากเพียงพอที่สามารถขับเคลื่อน โครงสร้างทั้งหมดได้นามาซึ่งต้นทุนที่สูงขึ้น ยิ่งโครงสร้างมีน้ำหนักมากก็จะยิ่งทำให้ความแม่นยำและความเร็วของหุ่นยนต์โดยรวมลดน้อยลงไปด้วย

ข้อเสียอีกจุดหนึ่งของ หุ่นยนต์ประเภท แขนกลแบบกลไกอนุกรม (Serial Robot) หรือ แบบวงรอบเปิดนั้นคือ เกิดการสะสมความคลาดเคลื่อนของแต่ละข้อต่อสะสมไปเรื่อยๆจนถึงจุดปลายทำให้การคลาดเคลื่อนโดยรวมสูงขึ้น และ ความคลาดเคลื่อนก็ยิ่งรุนแรงมากขึ้นถ้าความแข็งแรงของโครงสร้างของหุ่นยนต์ไม่สามารถรับแรงที่กระทำเข้ามาจากภายนอกได้จะทำให้โครงสร้างเกิดการโก่งงอ ซึ่งถึงแม้จะเกิดการโก่งงอแค่เพียงเล็กน้อยก็พอที่จะทำให้ตำแหน่งปลายแขน (Pose) คลาดเคลื่อนไปมากได้ ซึ่งการคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการโก่งงอซึ่งสิ่งเหล่านี้จะไม่สามารถคำนวณหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์และ Sensor ที่ถูกใช้ในหุ่นยนต์ปรกติทั่วไป หุ่นยนต์แบบกลไกอนุกรมจะมีลักษณะตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แขนกลแบบกลไกอนุกรม (Serial Robot)

หุ่นยนต์อีกประเภทหนึ่ง คือ แขนกลแบบกลไกขนาน (Parallel Robot) หรือ แบบวงรอบปิด ซึ่งมีลักษณะการส่งผ่านกำลังจากต้นกำลังที่อยู่พื้นฐานผ่าน อุปกรณ์ส่งกำลังทั้งแบบเลื่อนหรือแบบหมุนผ่าน ก้าน โยงอย่างน้อย 2 ก้าน โยง ขึ้นไป (กลไกแบบขนานจะเรียกก้าน โยงเหล่านี้ว่า Limb) ซึ่งแต่ละ Limb จะมีรูปร่างเหมือนกันแต่จะจัดวางไว้ในตำแหน่งที่ต่างกัน เพื่อไปควบคุมตำแหน่งปลายของหุ่นยนต์ ซึ่ง Limb แต่ละก้านต่างก็เป็นอิสระต่อกันและถูกขับเคลื่อนโดยต้นกำลังเพียง 1 ตัว หุ่นยนต์ประเภทนี้มีข้อดีและเหมาะกับการใช้งานหลายด้าน เพราะ มีลักษณะเด่นที่โครงสร้างของหุ่นยนต์ประเภทนี้นั้นผลิตง่าย มีขนาดเล็ก เบา เนื่องจากผู้วิจัยยึดติดต้นกำลังของหุ่นยนต์ไว้ที่ส่วนฐานทั้งหมด หรือ เกือบทั้งหมด ทำให้ผู้วิจัยไม่จำเป็นต้องใช้โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ และไม่จำเป็นต้องใช้ต้นกำลังที่มีขนาดใหญ่ไปด้วย ส่งผลให้หุ่นยนต์ประเภทนี้สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วที่สูงกว่าหุ่นยนต์แบบกลไกอนุกรมเป็นอย่างมาก อีกทั้งทำให้ต้นทุนในการสร้างส่วน โครงสร้างถูกลงเป็นอย่างมาก SebastienBriot [7] ได้กล่าวถึงข้อดีอีกข้อของหุ่นยนต์ประเภทนี้คือ หุ่นยนต์ประเภทนี้คือ Limb แต่ละก้านจะช่วยกันชดเชยความคลาดเคลื่อนของแต่ละ Limb ทำให้ความแม่นยำโดยรวมดีกว่า หุ่นยนต์แบบกลไกอนุกรม และ โครงสร้างแบบขนานนั้นทำให้การรับแรงจากภายนอกทำได้ดีกว่า เนื่องจากแรงจากภายนอกจะถูกถ่ายโอนแบบเฉลี่ยไปยังแต่ละ Limb ทำให้โครงสร้างไม่โก่งงอและมีค่าอัตราส่วนความสามารถรับแรงต่อน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์มากกว่าหุ่นยนต์แบบกลไกอนุกรมอีกด้วย ข้อเสียของหุ่นยนต์ประเภทนี้คือ มีพื้นที่ทำงาน (Working Area) ที่ต่ำกว่าหุ่นยนต์แบบกลไกอนุกรม อันสืบเนื่องมาจากการผูกรวมปลาย Limb หลายๆ Limb เข้าหากันทำให้องศาการเคลื่อนของต้นกำลังของหุ่นยนต์แบบขนานนี้ถูกจำกัดลดลงเพื่อป้องกันการขัดกันของ Limb เมื่อพื้นที่การทำงาน

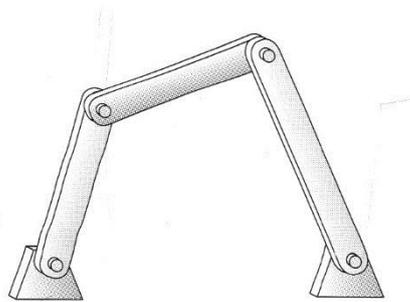
ลดลงจึงทำให้ลักษณะงานที่จะเลือกใช้หุ่นยนต์ประเภทนี้ถูกจำกัดที่งานที่ต้องการความแม่นยำแต่ทำงานในพื้นที่ที่จำกัด เช่น งานขัดผิว งานประกอบชิ้นงานเล็ก งานเจียรระโน และงานที่ต้องการความเร็วเป็นสำคัญ เช่น งาน Pack สินค้า เป็นต้น ข้อเสียถัดไปคือ ความยากในการคำนวณอันเนื่องมาจากลักษณะการเชื่อมโยงกันของก้านโยงซึ่งมีลักษณะขึ้นอยู่กับกันอย่างสูง (Highly Dependence) ทำให้รูปสามารถความสัมพันธ์มีความซับซ้อนเป็นอย่างมากจึงอาศัยความพยายามในการแก้สมการมาก และยังมีจำนวน Degree of Freedom และทำให้ต้องอาศัยอุปกรณ์ในการคำนวณที่มีประสิทธิภาพสูงมีความเร็วในการคำนวณสูงตามไปด้วย รูปแบบของหุ่นยนต์แบบนี้จะมีลักษณะดัง รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แขนกลแบบกลไกขนาน (Parallel Robot)

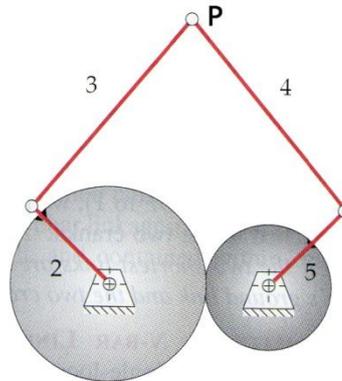
3.2 กลไกก้านโยงแบบ FiveBar Linkages

กลไกก้านโยงแบบ FiveBar Linkages พัฒนาเพิ่มเติมจากก้านโยงแบบ FourBar Linkages ดังรูปที่ 3.3 ซึ่ง FourBar Linkages สามารถสร้าง DOF ได้เพียง 1 DOF แต่กลไกแบบ FiveBar Linkages ดังรูปที่ 3.4 มี DOF ได้มากกว่า



รูปที่ 3.3 FourBar Linkage Mechanism

ซึ่งกลไกแบบ 5 Bar จะเป็นลักษณะ Close Loop คือ ก้านโยงแรกด้านซ้าย (Cracker) และ ก้านโยงสุดท้ายด้านขวา (Rocker) จะเชื่อมติดกับ พื้นแต่ละ ก้านโยง จะมีชื่อเรียกดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของ Fivebar Linkage

ส่วนประกอบของก้านโยงแบบ Fivebar Linkage จะประกอบไปด้วย

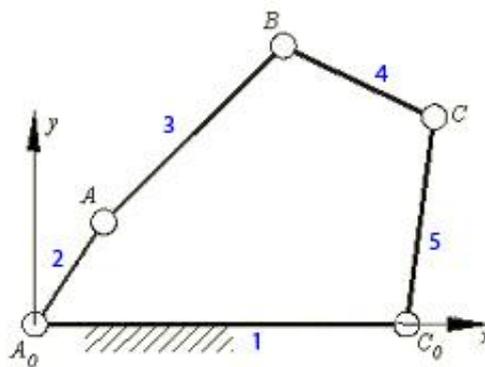
1. ก้านต้นกำลัง(Cracker)(Rocker) ได้แก่ ก้านโยง 2 และ ก้านโยง 5
2. ก้านใช้งาน ได้แก่ ก้านโยง 3 และ ก้านโยง 4
3. จุดนำไปใช้งาน Coupler Point ได้แก่ จุด P

3.2.1 ประเภทของก้านโยงแบบขนาน (Parallel Linkages)

แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. NonSymmetricalFivebar Linkage

กลไกแบบ Fivebar Linkage ที่มีความยาวของ ก้านโยง 2 ไม่เท่ากับ ก้านโยง 5 และ ความยาวของ ก้านโยง 3 ไม่เท่า ก้านโยง 4 ดังรูปที่ 3.5



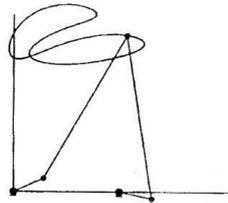
รูปที่ 3.5 Non Symmetrical Fivebar Linkage

2. Symmetrical Fivebar Linkage

Linkage ที่มีความสมมาตร (symmetrical) คือ กลไกแบบ Fivebar Linkage ที่ความยาวของ ก้าน โยง 2 = ก้าน โยง 5 และ ความยาวของ ก้าน โยง 3 = ก้าน โยง 4 ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ก้าน โยงแบบสมมาตร Fivebar Linkage เนื่องจากออกแบบได้ง่าย และสร้างเส้น Coupler Curve ได้สมมาตร และรูปสมการซ้ำขวานั้นเหมือนกัน

3.2.2 Coupler Curves

Coupler Curves คือ เส้น โค้งที่ถูกวาดขึ้น โดยข้อต่อ P หรือ Coupler Point จากรูปที่ 3.4 ซึ่งเมื่อ วาดกราฟ ตำแหน่งของข้อต่อ P บนระนาบ 2 มิติตามช่วงเวลาที่เท่าๆกัน เมื่อขยับต้นกำลังจนต้นกำลังทั้ง 2 จุด หมุนครบรอบด้วยความเร็วคงที่ทำให้ได้ Coupler Curves และสามารถนำหลักการนี้มาใช้ในสร้าง เส้นทางการเคลื่อนที่ (Moving Path) ประมาณการรูปทรงและขนาดของพื้นที่ทำงานของปลายแขนหุ่นยนต์ได้ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 Coupler Curve ที่สร้างจากตำแหน่ง Coupler Point

จากรูปที่ 3.4 ผู้วิจัยสามารถหา Parameter ดังนี้

$$\text{Alpha} = \text{Coupler Link 3} / \text{Link 2}$$

$$\text{Beta} = \text{Ground Link 1} / \text{Link 2}$$

$$\text{Lambda} = \text{Gear Ratio} = \text{Gear 5} / \text{Gear 2}$$

ซึ่งสามารถกำหนด Parameter เหล่านี้เพื่อออกแบบขนาดของก้าน โยงเพื่อให้ได้ Coupler Curve ตามที่ต้องการ Zhang, Norton, Hammond(ZNH) [8] ได้ศึกษารูปแบบของ Coupler Curve เมื่อปรับเปลี่ยน Parameter

3.2.3 Degree of freedom (Mobility) In Planar Mechanisms

Degree of freedom คือระดับของอิสระของกลไก ซึ่งกลไกแบบขนานนั้นมีจัดเป็นประเภท Closed Mechanism Chain โดยมีข้อต่อเริ่มและข้อต่อสุดท้ายเชื่อมต่อกันกับ Ground ดังรูปที่ 3.5

โดยมีสมการหา DOF ของกลไกแบบปิดดัง(3.1)

$$F = 3(L-1) - 2J_1 - J_2 \quad (3.1)$$

เมื่อ

F = DOF ของกลไก

L = จำนวนของก้าน โยง รวมส่วน Ground ซึ่งกลไกแบบ RRR/RR จะมีค่า $L = 5$

J_1 คือ จำนวนข้อต่อที่มี 1 DOF ซึ่งกลไกแบบ RRR/RR จะมีค่า $J_1 = 5$

J_2 คือ จำนวนข้อต่อที่มี 2 DOF ซึ่งกลไกแบบ RRR/RR จะมีค่า $J_2 = 0$

เมื่อแทนค่าลงในสมการ(3.1) จะได้

$$F = 2$$

เพราะฉะนั้น Degree Of Freedom ของกลไกแบบขนาน = 2 ซึ่งนั่นก็คือระบบสามารถเคลื่อนที่ได้ในระนาบ 2 ระนาบพร้อมกัน เช่น ระนาบ x และ ระนาบ y

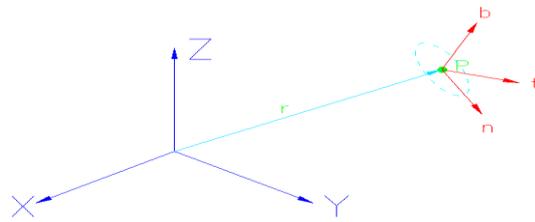
3.3 จลนศาสตร์หุ่นยนต์ (Robot Kinematics)

ในการศึกษาทางด้านหุ่นยนต์จำเป็นต้องมีการศึกษาในด้านต่างๆที่เกี่ยวข้องกับระบบพิกัด การระบุพิกัดเป้าหมาย การอ้างอิงแกนพิกัด การหมุนแกนพิกัด รวมถึงการแปลงแกนพิกัดของเป้าหมายให้เป็นพิกัดเดียวกันกับหุ่นยนต์เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานนำไปสู่การทำจลนศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics) และ การหาจลนศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematics) ซึ่งจะนำไปสู่การได้ค่าตัวแปรต่างๆที่จะมาควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้เคลื่อนไปยังตำแหน่งต่างๆที่ต้องการได้อย่างถูกต้องทั้งแนวตรงและแนวหมุนและจลนศาสตร์นั้นเป็นการศึกษาถึงตำแหน่ง (Position) ความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration) ของจุด รวมถึงความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) และความเร่งเชิงมุมของวัตถุ (Angular acceleration) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะใช้อธิบายถึงลักษณะของวัตถุ โดยตำแหน่งของวัตถุจะบอกได้จากตำแหน่งของจุดบนวัตถุ ประกอบกับตำแหน่งเชิงมุมของวัตถุ นั้น

3.3.1 ตำแหน่งจุดหมุนและเมตริกซ์การหมุน (Position, Orientation matrix)

การทำงานของหุ่นยนต์ หรือแขนกลให้เคลื่อนที่ไปตำแหน่งที่ต้องการจำเป็นต้องมีการกำหนดจุดพิกัด (Coordinates) เพื่อที่แขนกลนั้นจะรู้ถึงตำแหน่งของวัตถุนั้น โดยต้องมีการกำหนดแกนอ้างอิงขึ้นด้วย

ในที่นี้จะใช้การบอกพิกัดแบบคาร์ลทีเซียน หรือ แกน x, y, z โดยทิศทางของแกน z มีนิยามมาจาก กฎมือขวา เช่นกรณีหนังสือที่วางอยู่โต๊ะ ถ้าผู้วิจัยแต้มสี ณ จุดหนึ่งบนหนังสือเพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิง แล้วเรียกว่า จุด P ผู้วิจัยสามารถบอกได้ว่าหนังสือเล่มนี้อยู่ที่ตำแหน่งสัมพันธ์กับแกนอ้างอิง ซึ่งอาจจะวางจุดศูนย์กลางของแกนอ้างอิงไว้ที่มุมหนึ่งของโต๊ะ ผู้วิจัยสามารถแสดงพิกัดของจุด P ได้ว่า $P = (x, y, z)$ หรือเขียนเป็นคอลัมน์เวกเตอร์ (Column vector) มีขนาด 3×1 ได้ดังสมการที่(3.2) โดยจุด P แสดงถึงจุดบนวัตถุ (Body-fixed point) ดังรูปที่ 3.7 และ r คือ เวกเตอร์ตำแหน่ง จากจุด O ถึง P



รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งของจุด P

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

การบอกสถานะของวัตถุแข็งเกร็งนั้นใช้การบอกตำแหน่งอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอ ต้องมีตัวแปรเพิ่ม เพื่อบ่งบอกถึงสถานะของวัตถุนั้น เช่น กรณีของหนังสือต้องบอกได้ว่าหนังสือนั้น วางอยู่ลักษณะใด เช่น วางตั้งหรือวางนอน ซึ่งตัวแปรนี้ก็คือ การหมุน (Orientation)

เมตริกซ์การหมุน (Rotation matrix) สัญลักษณ์ R เป็นตัวแปรที่ใช้ระบุว่าวัตถุนั้นมีการหมุน เปลี่ยนไปจากแกนอ้างอิงเท่าใด แสดงได้ด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย 3 ทิศทางคือ เวกเตอร์ตามแบบ Frenet-Serret (n, t, b) ดังแสดงบนจุด P ในรูปที่ 3.7 โดยที่ n, t, b , เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย ดังแสดงใน สมการ(3.3)

$$R = \begin{bmatrix} n_x & t_x & b_x \\ n_y & t_y & b_y \\ n_z & t_z & b_z \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

เมตริกซ์การหมุน R แสดงถึงการหมุนของวัตถุแข็งเกร็ง สัมพันธ์กับแกนอ้างอิงที่ติดอยู่กับที่ สังเกตว่า ในเมตริกซ์การหมุน R ประกอบด้วยเวกเตอร์ n, t, b ซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกันและมีขนาดหนึ่งหน่วย ผู้วิจัยสามารถเขียนได้ว่า

$$nt = tb = bn = 0 \tag{3.4}$$

หรือเขียนในลักษณะของผลคูณของเมตริกซ์ได้ว่า

$$n^T t = t^T b = b^T n = 0 \quad (3.5)$$

และขนาดของเวกเตอร์แสดงได้ดังนี้

$$|n| = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} = 1 \quad (3.6)$$

$$|t| = \sqrt{t_x^2 + t_y^2 + t_z^2} = 1 \quad (3.7)$$

$$|b| = \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2} = 1 \quad (3.8)$$

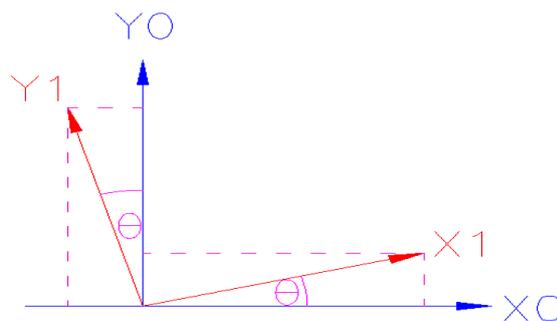
จากคุณสมบัติออร์โธนอร์มัล สามารถพิสูจน์หาอินเวอร์สของเมตริกซ์การหมุน

$$R^T R = \begin{bmatrix} n^T n & n^T t & n^T b \\ t^T n & t^T t & t^T b \\ b^T n & b^T t & b^T b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = I \quad (3.9)$$

การที่นำทรานส์โพสของเมตริกซ์การหมุนคูณกับตัวเองได้เมตริกซ์ I หรือ Identity matrix ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของการคูณเมตริกซ์หรือสามารถสรุปได้ว่า การทรานส์โพสของเมตริกซ์การหมุนนั้นก็คือการหาอินเวอร์สการคูณของเมตริกซ์การหมุนนั่นเอง

$$R^{-1} = R^T \quad (3.10)$$

คุณสมบัติที่สำคัญอีกข้อหนึ่งของเมตริกซ์การหมุนก็คือ ค่า Determinant จะต้องมามีค่าเท่ากับหนึ่งเสมอ ในกรณีนี้ที่ผู้วิจัยใช้กฎมือขวา ลำดับต่อไปจะหาเมตริกซ์การหมุนตามรอบแกน Z สังเกตจากรูปที่ 3.8 แกนอ้างอิงที่ 0 รอบแกนอ้างอิงที่ 1 หมุนไปจากแกนอ้างอิงที่ 0 รอบแกน Z ที่มุม θ



รูปที่ 3.8 axis rotation about Z axis

จากรูปที่ 3.8 สามารถแสดงเวกเตอร์ในแกนอ้างอิงที่ 1 นำเสนอในแกนอ้างอิงที่ 0 ได้ดังสมการที่ (3.11)

$$\begin{aligned}x_0 &= \cos \theta x_1 - \sin \theta y_1 \\y_0 &= \sin \theta x_1 + \cos \theta y_1 \\z_0 &= z_1\end{aligned}\tag{3.11}$$

$z_0 = z_1 \mathbf{Z}_0 = \mathbf{Z}_1$ สมการข้างบนเขียนอยู่ในรูปเวกเตอร์ ได้ดังสมการ (3.12)

$$X_0 = R_Z(\theta) X_1\tag{3.12}$$

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = R_z(\theta) \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}\tag{3.13}$$

จากสมการ(3.13) สามารถแยกเมตริกซ์การหมุนแกน Z ได้ตามสมการที่ (3.14)

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\tag{3.14}$$

ในทำนองเดียวกันผู้วิจัยสามารถหาเมตริกซ์การหมุนรอบแกน X และ Y ได้เช่นเดียวกัน ดังสมการ (3.15) และ (3.16)

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}\tag{3.15}$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}\tag{3.16}$$

ผู้วิจัยสามารถนำเมตริกซ์การหมุนมาคูณกัน ซึ่งเมื่อมีการหมุนรอบหลายแกน เช่น มีการหมุนครั้งแรกเป็น R_0 จากนั้นหมุนรอบแกน X ด้วยมุม α จะได้การหมุนใหม่

$$R = R_x(\alpha) R_0\tag{3.17}$$

สังเกตว่าขนาดของเมตริกซ์จะมีขนาด 3×3 เสมอ จากนั้นมีการหมุนอีกรอบแกน Y เป็นมุม β อาจจะมีการสับสนว่า จะหมุนรอบแกนใด เพราะแกน Y มีสองแกน คือ แกนที่ติดตัว และแกนอ้างอิง ในการวิเคราะห์นี้ผู้วิจัยจะใช้แกนที่ติดตัวเป็นแกนหมุน สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$R'' = R_y(\beta)R_x(\alpha)R_0 \quad (3.18)$$

และการหมุนลำดับที่ 3 รอบแกน Z แสดงได้ดังสมการ

$$R''' = R_z(\theta)R_y(\beta)[R_x(\alpha)R_0] \quad (3.19)$$

เนื่องจากเมตริกซ์มีคุณสมบัติ Associability จัดรูปใหม่ได้คือ $A(BC) = (AB)C$ เรียกว่า R_{zyx}

$$R_{zyx} = R_z(\theta)R_y(\beta)R_x(\alpha) \quad (3.20)$$

3.3.2 การหมุนแบบ YPR (yaw, pitch, roll)

ลักษณะการหมุนแบบ YPR นี้ใช้มากในการบินและอวกาศ การหมุนนี้เป็นการหมุน 3 แบบ คือ หมุนรอบแกน a, o, n, ตามลำดับโดยมีข้อจำกัดว่า แกนปัจจุบันจะขนานไปกับแกนอ้างอิง ดังนั้นการหมุนจึงเหมือนกับการหมุนแกนอ้างอิง การหมุน RPY ถ้ากรณีแกนปัจจุบันไม่ขนานกับแกนอ้างอิง การหมุนขั้นสุดท้ายจะเป็นการรวมกันกับการหมุนก่อนหน้า และ post multiply ด้วย RPY ลำดับของการหมุนประกอบไปด้วย

ยอว์ เป็นการหมุนรอบแกน z ที่เคลื่อนที่ หรือแกน a (Approach)

พิตช์ เป็นการหมุนรอบแกน y ที่เคลื่อนที่ หรือแกน o (Orientation)

โรลล์ เป็นการหมุนรอบแกน x ที่เคลื่อนที่ หรือแกน n (Normal)

เมตริกซ์การหมุนแบบ ยอว์พิตช์โรลล์ สามารถพิจารณาจากสมการ(3.21)

$$YPR(\theta, \beta, \alpha) = R_z(\theta)R_y(\beta)R_x(\alpha) \quad (3.21)$$

แสดงวิธีการคำนวณทางเมตริกซ์

$$YPR(\theta, \beta, \alpha) = R_z(\theta) \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\beta)\sin(\alpha) & \sin(\beta)\cos(\alpha) \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ -\sin(\beta) & \cos(\beta)\sin(\alpha) & \cos(\beta)\cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\beta)\cos(\theta) & \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\theta) - \cos(\alpha)\sin(\theta) & \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\theta) + \sin(\alpha)\sin(\theta) \\ \cos(\beta)\sin(\theta) & \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\theta) - \cos(\alpha)\cos(\theta) & \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\theta) + \sin(\alpha)\cos(\theta) \\ -\sin(\beta) & \sin(\alpha)\cos(\beta) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้เมตริกซ์การหมุนเดียวแบบด้านบน ซึ่งมาจากการคูณเป็นลำดับ และบ่งบอกถึงการหมุนใด ๆ ก็ตามในรูปแบบของ โรลล์พิทช์ และยอร์

คำตอบของการหมุนของเวกเตอร์ n, o, a สามารถหาได้จากสมการ(3.24)

$$\begin{bmatrix} n_x & O_x & a_x \\ n_y & O_y & a_y \\ n_z & O_z & a_z \end{bmatrix} = YPR(\theta, \beta, \alpha) \quad (3.24)$$

คุณสมบัติที่ควรระวังของเมตริกซ์คือการสลับที่ของการคูณ คือ

$$AB \neq BA \quad (3.25)$$

คุณสมบัตินี้เป็นจริงกับเมตริกซ์การหมุนเช่นเดียวกัน คือ

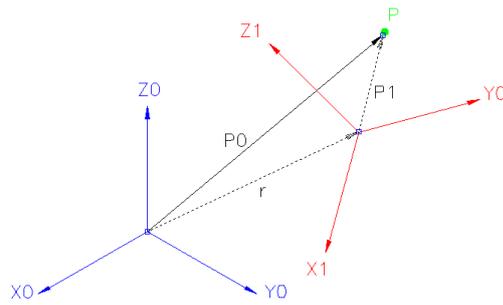
$$R_x R_y \neq R_y R_x \quad (3.26)$$

3.3.3 การเปลี่ยนระบบพิกัด

การบอกตำแหน่งของวัตถุที่ผู้วิจัยจำเป็นต้องบอกถึงว่าจุดนั้นอ้างอิงกับแกนใด ดังตัวอย่างก่อนหน้า จุด P_0 หมายถึงว่า จุดนี้อ้างอิงแกน 0 ทำนองเดียวกันกับจุด P_1 อ้างอิงกับแกนที่ 1 ดังนั้นเมื่อมีการกำหนดตำแหน่งและเมตริกซ์การหมุนของแกน 1 สัมพันธ์กับแกน 2 (Frame 1 with respect 2) คือ R_{12} และพิกัดในแกนที่ 2 คือ P_2 ผู้วิจัยสามารถเขียนเวกเตอร์ตำแหน่งได้ดังสมการ(3.27)

$$\begin{aligned} P_1 &= r + R_{12}P_2 \\ P_0 &= r + R_{01}P_1 \end{aligned} \quad (3.27)$$

โดย r คือ ตำแหน่งที่ห่างจากแกนอ้างอิงที่ 1 ไปถึง 2 สามารถดูได้จากภาพที่ รูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนระบบพิกัด

วิธีทำ

$$R_z(90) = \begin{bmatrix} \cos(90) & -\sin(90) & 0 \\ \sin(90) & \cos(90) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \tag{3.28}$$

$$P_0 = R_z(90)P_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.29}$$

คำตอบจากสมการ แสดงถึงเมื่อมีการหมุนเวกเตอร์ P_0 ไป 90 องศาทิศทวนเข็มนาฬิกา จะได้เวกเตอร์ P_1 โดยอ้างอิงกับแกนอ้างอิงเริ่มต้น

3.3.4 Transformation operators

ในเรื่องหุ่นยนต์นั้น จุดสนใจจุดหนึ่งโดยทั่วไป คือ ตำแหน่งของวัตถุในระนาบสามมิติ จากหัวข้อ 3.3.1 ตำแหน่งจุดหมุนและเมตริกซ์การหมุน (Position, Orientation matrix) ซึ่งบอกถึงการหมุนของวัตถุในสามมิติ และเพิ่มการบอกตำแหน่งพิกัดเข้าไป 1 คอลัมน์ จะได้เมตริกซ์ใหม่นี้เรียกว่า transformation operator's โดยเป็นเมตริกซ์ 4 x 4 มีลักษณะดังสมการ (3.30)

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \text{Rotation}_{(3 \times 3)} & \text{Translation}_{(3 \times 1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.30}$$

โดย $i-1$ คือ แกนอ้างอิงเริ่มต้น และ i คือ แกนอ้างอิงสุดท้าย เช่น วัตถุมีการหมุนรอบแกนอ้างอิง x_0 เป็นมุม θ และเลื่อนไปยังตำแหน่ง $(1, 1, 0)$ ที่ตำแหน่งของแกนอ้างอิงที่ 1 สามารถเขียนแสดงดังนี้

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.31}$$

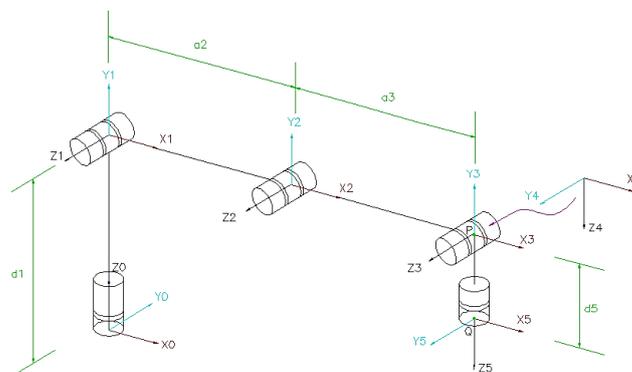
ในทำนองเดียวกัน Transformation operators' นี้มีคุณสมบัติคล้ายกับเมตริกซ์การหมุน คือ สามารถนำมาต่อกัน สำหรับในกรณีที่มีการเคลื่อนย้ายวัตถุในหลาย ๆ แกนอ้างอิงสามารถเขียนเป็นดังสมการ (3.32)

$${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n \tag{3.32}$$

$$T_{03} = T_{01} T_{12} T_{23} \tag{3.33}$$

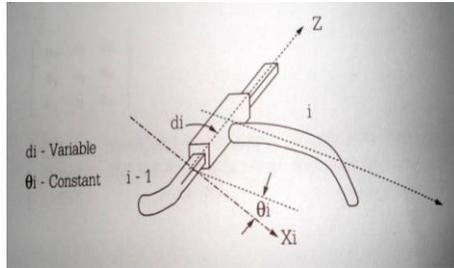
3.3.5 Denavit - Hardenberg parameters

การสร้างแขนกลทั่วไปนั้นมักประกอบไปด้วยก้าน โยงที่ต่อกับแบบอนุกรมด้วยข้อต่อ จากนั้นจะกำหนดแกนอ้างอิงที่ติดกับวัตถุ (Body fixed coordinate) ในแต่ละก้าน โยง เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแกนอ้างอิงจากแต่ละก้าน โยงไปยังปลายสุดท้าย หรือจุดปลายของแขนกล โดยทั่วไปว่าตำแหน่งของมือจับชิ้นงาน จากการคำนวณนี้สามารถบอกได้ว่าตำแหน่งของมือจับชิ้นงานนั้นอยู่ตำแหน่งใดในระนาบสามมิติในการคำนวณผู้วิจัยสามารถคำนวณหาพิกัดต่าง ๆ ลำดับต่อไปคือ ทำอย่างไรเพื่อใช้ตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมาใช้กับหุ่นยนต์วิธีเป็นที่ยอมรับวิธีหนึ่ง ได้แก่ Denavit – Hardenberg [9] หรือใช้ตัวย่อเรียกสั้น ๆ ว่า D-H parameters รูปที่ 3.10 บอกถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใน D-H parameters ในกรณีของข้อต่อแบบหมุน (R: revolute joint) ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง (variable) คือ มุม θ โดยระยะ d คงที่



รูปที่ 3.10 D-H notation

ในกรณีของข้อต่อแบบหมุน (R: revolute joint) ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง (Variable) คือ มุม θ โดยระยะ d คงที่



รูปที่ 3.11 D-H notation for revolute joints

นิยามของตัวแปรดังนี้

d_i = ระยะจาก X_{i-1} ถึงแกน X_i วัดตามแนวแกน Z_{i-1} เขียนในรูปเมตริกซ์คือ

$$T_i(z, d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

θ_i = มุมระหว่างแกน X_{i-1} ถึงแกน X_i หมุนรอบแกน Z_{i-1} เขียนในรูปเมตริกซ์คือ

$$T_i(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

a_i = ระยะจากแกน Z_{i-1} ถึงแกน Z_i วัดตามแนวแกน X_i เขียนในรูปเมตริกซ์คือ

$$T_i(x, a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

α_i = มุมบิด (twist angle) ระหว่าง Z_{i-1} กับ Z_i รอบแกน X_i เขียนในรูปเมตริกซ์คือ

$$T_i(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

3.3.6 Homogeneous Transform

เป็นการนำเอาเมตริกซ์ของ Denavit-Hardenberg parameter มาทำการผสมผสานรวมกันเป็นเมตริกซ์ผลลัพธ์ที่แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างข้อต่อที่ $i-1$ ถึง i โดยเขียนอยู่ในรูปสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ(3.38)

$${}^{i-1}A_i = T_i(z, d_i)T_i(z, \theta_i)T_i(x, a_i)T_i(x, \alpha_i) \quad (3.38)$$

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i)\sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i)\sin(\theta_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i)\cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i)\cos(\theta_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อตั้งแต่ 0 ถึง n ได้ดังสมการ(3.40)

$${}^0A_n = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 \dots {}^{n-1}A_n \quad (3.40)$$

3.3.7 จลนศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics)

หุ่นยนต์หรือแขนกลในทางจลนศาสตร์นั้นประกอบขึ้นมาจากการประกอบหรือต่อกันของก้านโยง ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือก้านโยง และข้อต่อ โดยที่ประมาณว่าก้านโยงนั้นมีคุณสมบัติเป็นวัตถุแข็งเกร็ง คือไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีแรงมากระทำ จลนศาสตร์ไปข้างหน้า เป็นวิธีการหาค่าตำแหน่งพิกัดและองศาการวางตัวของปลายแขนของหุ่นยนต์เมื่อทราบค่ามุม θ_0 ถึง θ_n โดยนำเมตริกซ์ของ $POSE_q$ (Position and orientation) มาเท่ากับ เมตริกซ์ 0A_n ซึ่งเป็นเมตริกซ์ที่บ่งบอกถึงตำแหน่งและองศาการวางตัวของปลายแขนหุ่นยนต์ ดังสมการ(3.41)

$$POSE_q = {}^nA_0 \quad (3.41)$$

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & q_x \\ n_y & o_y & a_y & q_x \\ n_z & o_z & a_z & q_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & q_x \\ u_y & v_y & w_y & q_x \\ u_z & v_z & w_z & q_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

3.3.8 จลนศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematics)

เป็นวิธีการดำเนินย้อนกลับจาก จลนศาสตร์ไปข้างหน้า โดย นำเมตริกซ์ ${}^n A_0$ มาเท่ากับเมตริกซ์ $POSE_q$ (Position and orientation) แล้วใช้วิธีทางคณิตศาสตร์และคุณสมบัติของเมตริกซ์เข้ามาช่วยแก้สมการหาค่า θ_0 ถึง θ_n ซึ่งเป็นค่ามุมที่แกนต่างๆของหุ่นยนต์จะหมุนไปเพื่อให้ปลายแขนหุ่นยนต์เข้าหาเป้าหมายได้อย่างถูกต้องทั้งพิกัดและองศาการวางตัว โดยแสดงดังสมการ(3.43)

$${}^n A_0 = POSE_q \quad (3.43)$$

$$T_{03} = T_{01} T_{12} T_{23} \quad (3.44)$$

$$\begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & q_x \\ u_y & v_y & w_y & q_x \\ u_z & v_z & w_z & q_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & q_x \\ n_y & o_y & a_y & q_x \\ n_z & o_z & a_z & q_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

3.3.9 จาโคเบียนของแขนกลหุ่นยนต์ (Robot Manipulator Jacobian)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นและเชิงมุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ในระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate or World Coordinate) กับ ความเร็วของต้นก้านในระบบพิกัดต้นก้าน (Joint Coordinate) ได้ถูกเสนอในรูปของ Jacobian Matrix ซึ่งกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้
ตัวแปรระบุพิกัดในระบบพิกัดฉาก (World Coordinate x_i)

$$x_i = [x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z]^T \quad (3.46)$$

ตัวแปรระบุพิกัดต้นก้าน (Joint Coordinate q_i)

$$q_i = \begin{cases} \theta_i \\ d_i \end{cases} \text{ เมื่อ } i = 1, 2, 3, \dots, m, 0 < m \leq 6 \quad (3.47)$$

หากสามารถกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรระบุพิกัดในระบบพิกัดฉากกับตัวแปรระบุพิกัดต้นก้านได้ตามสมการ(3.48) และดำเนินการหาอนุพันธ์ย่อย (Partial Differentiation) กับสมการ (3.48) เทียบกับตัวแปรระบุพิกัดต้นก้านทุกตัวตามสมการ (3.49) โดยจาโคเบียนที่ได้เป็นดังสมการ(3.51)

$$x_i = f_i(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) \quad (3.48)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial q_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \frac{\partial f_m}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (3.50)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial q_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \frac{\partial f_m}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

โดยที่ $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ และ $\dot{q}_i = \left\{ \frac{\dot{\theta}_i}{d_i} \right\}$

ด้วยคุณสมบัติของกฎลูกโซ่ (Chain Rule) นำ $\left(\frac{dt}{dt}\right)$ คูณกับสมการ(3.51) มีผลให้สมการดังกล่าวเปลี่ยนแปลงภายในแต่ไม่เปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ได้ดังสมการ(3.52)

$$\begin{aligned} J \cdot \left(\frac{dt}{dt}\right) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial q_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \frac{\partial f_m}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{bmatrix} \cdot \left(\frac{dt}{dt}\right) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} \frac{dt}{dt} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} \frac{dt}{dt} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \frac{dt}{dt} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} \frac{dt}{dt} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} \frac{dt}{dt} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial q_n} \frac{dt}{dt} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} \frac{dt}{dt} & \frac{\partial f_m}{\partial q_2} \frac{dt}{dt} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \frac{dt}{dt} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1 / dt}{\partial q_1 / dt} & \frac{\partial f_1 / dt}{\partial q_2 / dt} & \dots & \frac{\partial f_1 / dt}{\partial q_n / dt} \\ \frac{\partial f_2 / dt}{\partial q_1 / dt} & \frac{\partial f_2 / dt}{\partial q_2 / dt} & \dots & \frac{\partial f_2 / dt}{\partial q_n / dt} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_m / dt}{\partial q_1 / dt} & \frac{\partial f_m / dt}{\partial q_2 / dt} & \dots & \frac{\partial f_m / dt}{\partial q_n / dt} \end{bmatrix} \cdot \\
J &= \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{f}_1}{\partial \dot{q}_1} & \frac{\partial \dot{f}_1}{\partial \dot{q}_2} & \dots & \frac{\partial \dot{f}_1}{\partial \dot{q}_n} \\ \frac{\partial \dot{f}_2}{\partial \dot{q}_1} & \frac{\partial \dot{f}_2}{\partial \dot{q}_2} & \dots & \frac{\partial \dot{f}_2}{\partial \dot{q}_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \dot{f}_m}{\partial \dot{q}_1} & \frac{\partial \dot{f}_m}{\partial \dot{q}_2} & \dots & \frac{\partial \dot{f}_m}{\partial \dot{q}_n} \end{bmatrix} \quad (3.52)
\end{aligned}$$

ฟังก์ชัน f_1, f_2 ถึง f_m จึงเป็นฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในระบบพิกัดฉาก ($v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$) กับความเร็วในระบบพิกัดแกน ($q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$) โดยแต่ละฟังก์ชันสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.53) ถึง (3.58)

$$\dot{f}_1 = v_{Px}(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n) \quad (3.53)$$

$$\dot{f}_2 = v_{Py}(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n) \quad (3.54)$$

$$\dot{f}_3 = v_{Pz}(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n) \quad (3.55)$$

$$\dot{f}_4 = \omega_x(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n) \quad (3.56)$$

$$\dot{f}_5 = \omega_y(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n) \quad (3.57)$$

$$\dot{f}_6 = \omega_z(\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n) \quad (3.58)$$

ซึ่งฟังก์ชันข้างต้นได้จาก ผลคำนวณของ ${}^0\dot{A}_n$ และ ${}^0\dot{A}_n {}^0A_n^{-1}$ ดังรายละเอียดด้านล่าง (สมการ (3.59) และ (3.60))

$${}^0\dot{A}_n = \begin{bmatrix} \dot{u}_x & \dot{v}_x & \dot{w}_x & v_{Px} \\ \dot{u}_y & \dot{v}_y & \dot{w}_y & v_{Py} \\ \dot{u}_z & \dot{v}_z & \dot{w}_z & v_{Pz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

โดยกำหนดให้ $v_{Px} = \dot{f}_1, v_{Py} = \dot{f}_2, v_{Pz} = \dot{f}_3$

$${}^0\dot{A}_n {}^0A_n^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y & v_{0x} \\ \omega_z & 0 & -\omega_x & v_{0y} \\ -\omega_y & \omega_x & 0 & v_{0z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

โดยกำหนดให้ $\omega_x = \dot{f}_4, \omega_y = \dot{f}_5, \omega_z = \dot{f}_6$

หากแขนกลหุ่นยนต์มีต้นก้ำลังหกแกน สามารถคำนวณหาจาโคเบียนได้ดังสมการ (3.61)

$$\begin{bmatrix} v_{Px} \\ v_{Py} \\ v_{Pz} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{f}_1}{\partial \dot{\theta}_1} & \frac{\partial \dot{f}_1}{\partial \dot{\theta}_2} & \frac{\partial \dot{f}_1}{\partial \dot{\theta}_3} & \frac{\partial \dot{f}_1}{\partial \dot{\theta}_4} & \frac{\partial \dot{f}_1}{\partial \dot{\theta}_5} & \frac{\partial \dot{f}_1}{\partial \dot{\theta}_6} \\ \frac{\partial \dot{f}_2}{\partial \dot{\theta}_1} & \frac{\partial \dot{f}_2}{\partial \dot{\theta}_2} & \frac{\partial \dot{f}_2}{\partial \dot{\theta}_3} & \frac{\partial \dot{f}_2}{\partial \dot{\theta}_4} & \frac{\partial \dot{f}_2}{\partial \dot{\theta}_5} & \frac{\partial \dot{f}_2}{\partial \dot{\theta}_6} \\ \frac{\partial \dot{f}_3}{\partial \dot{\theta}_1} & \frac{\partial \dot{f}_3}{\partial \dot{\theta}_2} & \frac{\partial \dot{f}_3}{\partial \dot{\theta}_3} & \frac{\partial \dot{f}_3}{\partial \dot{\theta}_4} & \frac{\partial \dot{f}_3}{\partial \dot{\theta}_5} & \frac{\partial \dot{f}_3}{\partial \dot{\theta}_6} \\ \frac{\partial \dot{f}_4}{\partial \dot{\theta}_1} & \frac{\partial \dot{f}_4}{\partial \dot{\theta}_2} & \frac{\partial \dot{f}_4}{\partial \dot{\theta}_3} & \frac{\partial \dot{f}_4}{\partial \dot{\theta}_4} & \frac{\partial \dot{f}_4}{\partial \dot{\theta}_5} & \frac{\partial \dot{f}_4}{\partial \dot{\theta}_6} \\ \frac{\partial \dot{f}_5}{\partial \dot{\theta}_1} & \frac{\partial \dot{f}_5}{\partial \dot{\theta}_2} & \frac{\partial \dot{f}_5}{\partial \dot{\theta}_3} & \frac{\partial \dot{f}_5}{\partial \dot{\theta}_4} & \frac{\partial \dot{f}_5}{\partial \dot{\theta}_5} & \frac{\partial \dot{f}_5}{\partial \dot{\theta}_6} \\ \frac{\partial \dot{f}_6}{\partial \dot{\theta}_1} & \frac{\partial \dot{f}_6}{\partial \dot{\theta}_2} & \frac{\partial \dot{f}_6}{\partial \dot{\theta}_3} & \frac{\partial \dot{f}_6}{\partial \dot{\theta}_4} & \frac{\partial \dot{f}_6}{\partial \dot{\theta}_5} & \frac{\partial \dot{f}_6}{\partial \dot{\theta}_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

ซึ่งถ้าต้องการหา อัตราการเปลี่ยนแปลงของต้นก้ำลังเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของปลายแขนกล จะทำการหา Inverse ของ Jacobian (J^{-1}) เพื่อนำไป dot กับ เมทริกซ์การเปลี่ยนแปลงของปลายแขน (\dot{x}) ซึ่งจะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงของต้นก้ำลัง (\dot{q}) ดังสมการ (3.62)

$$\dot{q} = \dot{x}J^{-1} \quad (3.62)$$

3.3.10 Frenet-Serret Formula and Frame

ในอนุพันธ์เรขาคณิตนั้น Frenet-Serret Formula [10] กล่าวถึงคุณสมบัติทางจลนศาสตร์ของอนุภาคใดๆที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง ในสมการกล่าวถึงการหาอนุพันธ์ของสิ่งที่เรียกว่า Tangent, Normal และ Binormal unit vectors โดย Vectors ทั้ง 3 ถูกเรียกย่อๆ ว่า T, N และ B และเมื่อนำทั้ง 3 Vectors มาประกอบแบบตั้งฉากซึ่งกันและกันจนได้ระยะในปริภูมิ 3 มิติ จะถูกเรียกว่า Frenet-Serret frame โดยมีนิยามดังนี้

T คือ Unit Vector ที่สัมผัสส่วนโค้งของเส้นโค้ง และมีทิศชี้ไปทางทิศทางการเคลื่อนที่

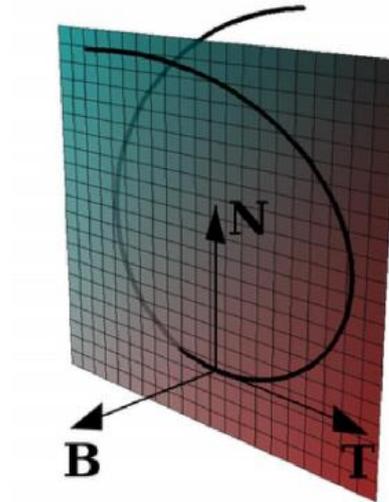
N คือ Unit Vector ที่เป็นอนุพันธ์ของ T เทียบความยาวส่วนโค้ง ของเส้นโค้งนั้นๆ หาด้วยความยาวส่วนโค้ง

B คือ Binormal Unit Vector ซึ่งเกิดจากการ Cross Product ของ T และ N

Frenet-Serret Formula ได้แก่

$$\begin{aligned}\frac{dT}{ds} &= \kappa N \\ \frac{dN}{ds} &= -\kappa T + \tau B \\ \frac{dB}{ds} &= -\tau B\end{aligned}\tag{3.63}$$

เมื่อ $\frac{d}{ds}$ คือการหาอนุพันธ์ เทียบความยาวส่วนโค้งของเส้นโค้งนั้นๆ, κ คือค่าความโค้ง (curvature) และ τ คือ ค่าความชัน (torsion) ทั้ง T, N, B, κ และ τ จะประกอบกันซึ่งถูกเรียกว่า Frenet-Serret apparatus ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เส้น Unit Vector T,N,B ที่กระทำต่อเส้นโค้ง

เมื่อเส้นโค้งดังรูปที่ 3.12 ถูกสร้างด้วย Vector r ที่เคลื่อนที่ตามเวลา ซึ่งสามารถเขียนเส้นโค้งดังกล่าวด้วย $r(t)$ ซึ่งมีสมมุติฐานว่าเส้นโค้งดังกล่าวจะไม่ค่าความโค้ง $= 0$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ค่า Vector ความเร็ว $r'(t)$ และ Vector ความเร่ง $r''(t)$ จะไม่มีสัดส่วนเดียวกัน

โดย $s(t)$ จะเป็นความยาวส่วนโค้งซึ่งแปรผันตามเวลา ซึ่งอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านตามเส้นโค้ง โดย

$$s(t) = \int_0^t \|r'(\theta)\| d\theta \quad (3.64)$$

โดยสมมุติฐานค่า $r' \neq 0$ ซึ่งจะทำให้เส้น $s(t)$ เป็นเส้นโค้งอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงสามารถกำหนดได้ว่า $t = \text{function}(s)$ และสามารถกล่าวได้ว่า $r(s) = r(t(s))$ ซึ่งกล่าวได้ว่า Vector r ถูกกำหนดด้วยความยาวเส้นโค้ง s ได้

จากที่กล่าวไปแล้วว่า ค่า Vector ความเร็ว $r'(t)$ และ Vector ความเร่ง $r''(t)$ จะไม่มีสัดส่วนเดียวกัน และ Vector r ถูกกำหนดด้วยความยาวเส้นโค้ง s ดังนั้นสามารถกำหนด Frenet-Serret frame ตามความยาวเส้นโค้งได้เป็น

Tangent Unit Vector T คือ

$$T = \frac{dr}{ds} \quad (3.65)$$

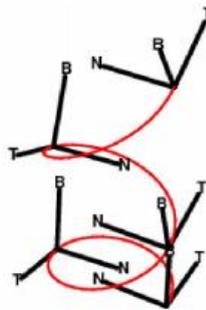
Normal Unit Vector N คือ

$$N = \frac{\frac{dT}{ds}}{\left\| \frac{dT}{ds} \right\|} \tag{3.66}$$

Binormal Unit Vector B คือ

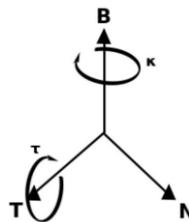
$$B = T \times N \tag{3.67}$$

สามารถนำ Frenet-Serret Frame ไปกำหนด Frame ของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในปริภูมิ 3 มิติ โดยนำ Frenet-Serret Frame ไปกำหนดเป็น จุดพิกัด ณ.จุดนั้นบนเส้นโค้ง ดัง รูปที่ 3.13 ทำให้ได้ Working Point Coordinate เพื่อให้ปลายแขนหุ่นยนต์ ไปกระทำได้



รูปที่ 3.13 การนำ Frenet-Serret ไปติดบนจุดต่างๆบนเส้น โค้ง เพื่อสร้างจุดพิกัด

จากรูปที่ 3.14 ในขณะที่ Frenet-Serret Frame เคลื่อนที่ Parameter κ ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้หมุนแกน B ซึ่งทำให้ Vector T เคลื่อนที่สัมผัสเส้นอยู่ตลอดเวลา ส่วน Parameter τ จะปรับค่าเพื่อให้ Coordinate Frame ของจุดให้ตั้งแกนไปตลอดการเคลื่อนที่



รูปที่ 3.14 แสดงทิศทางการหมุนของ Parameter κ, τ ขณะ Frenet-Serret Frame เคลื่อนที่

3.3.11 Helix Smooth Space Curve

การกำหนด Path Trajectory โดยใช้รูปสมการจะทำให้การเคลื่อนที่ที่ได้มีความ Smooth สอดคล้องกัน ตลอดการเคลื่อนที่ซึ่งสมการ Helix เป็นสมการกำหนด Moving Path บนปริภูมิ 3 มิติสมการหนึ่งซึ่ง

ประกอบด้วย Parameter แกนหมุน(axis) รัศมี(radian) และค่าความสูงของแต่ละรอบ (high) ซึ่งเป็น การเคลื่อนที่ตามเวลาดังสมการ(3.68)

$$\begin{aligned} x(t) &= l \cos(t) \\ y(t) &= l \sin(t) \\ z(t) &= ht \end{aligned} \tag{3.68}$$

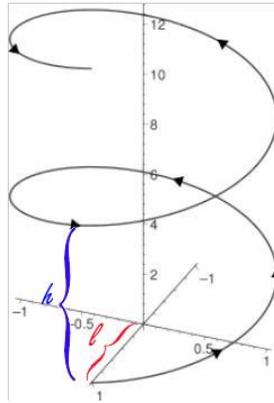
โดย

l = ความยาวรัศมี

t = ตัวแปรต้น

h = ความสูง

ซึ่งแสดงส่วนประกอบ Parameter ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงส่วนประกอบของ Parameter ใน helix formula

จาก (3.65) ให้แทน Vector r ด้วยสมการ(3.68) บวกด้วย Vector ${}^B r_O = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix}$ ซึ่งเป็น Vector บวก

ตำแหน่ง Object Frame เทียบกับ Robot Frame ซึ่งสุดท้ายก็จะได้

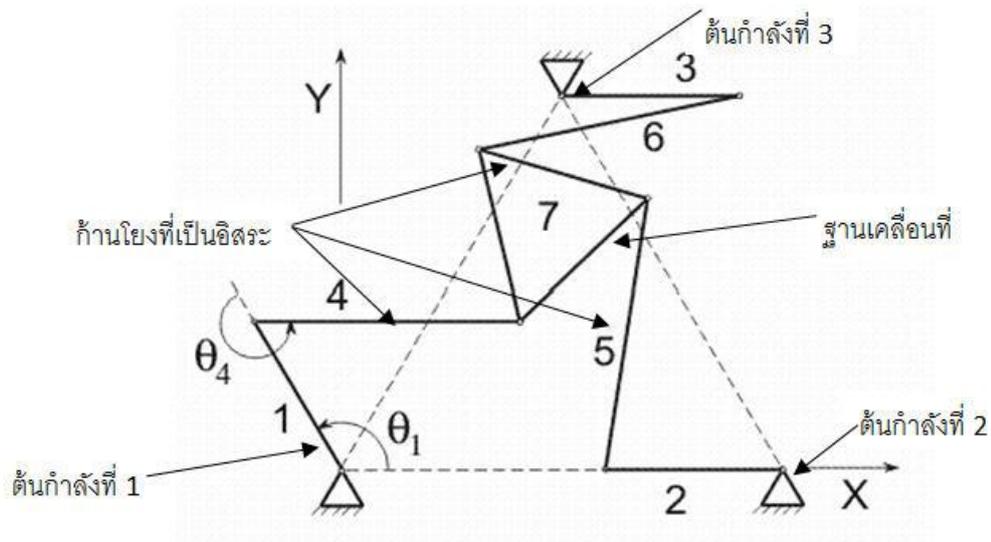
$$\begin{bmatrix} {}^B r_{Ox} \\ {}^B r_{Oy} \\ {}^B r_{Oz} \end{bmatrix} \tag{3.69}$$

ซึ่งนำไปกำหนดให้ปลายแขนหุ่นยนต์ ต่อไปดัง(3.70)

$$\begin{bmatrix} {}^B r_{Ox} \\ {}^B r_{Oy} \\ {}^B r_{Oz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \tag{3.70}$$

3.4 จลนศาสตร์ของแขนกลแบบกลไกขนาน

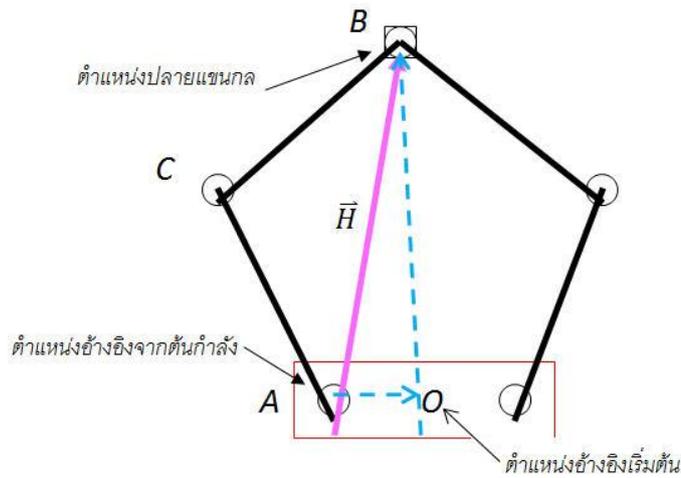
หลักการของหุ่นยนต์แบบขนานนั้นอธิบายได้จากกลไกการขับเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์อย่างสัมพันธ์กันโดยผ่านแหล่งต้นกำลังและก้านโยกที่เป็นอิสระต่อกันมากกว่า 1 ก้าน ซึ่งจะมีจำนวนเท่ากับจำนวนองศาอิสระของหุ่นยนต์ (Degree of freedom) โดยต้นกำลังทั้งหมดจะถูกยึดอยู่กับฐาน



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างกลไกของแขนกลแบบขนาน

3.4.1 การวิเคราะห์จลนศาสตร์ผกผันของแขนกลแบบกลไกขนาน

การวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ผู้วิจัยจะสนใจหาปริมาณของ ตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง ของส่วนปลายแขนกล และ ส่วนองศาการควบคุมของต้นกำลัง เป็นหลัก ซึ่งการพิจารณาหาค่าต่างๆดังที่กล่าวมานี้ผู้วิจัยจำเป็นต้องมีการกำหนดกำหนด Parameter ต่างๆของหุ่นยนต์ขึ้นมาก่อน ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ลักษณะการวิเคราะห์แขนกลแบบกลไกขนาน

โดยกำหนดให้ A เป็นตำแหน่งติดตรงที่ติดต่อกับแกนโยก ที่ส่งผ่านการหมุนมาจากต้นก้าน และ B เป็นปลายแขนกลที่ผู้วิจัยต้องการควบคุม และ C เป็น Free Revolute Joint เป็นข้อต่อหมุนที่เชื่อมโยกกับแกนโยก บน และ ล่างเข้าด้วยกัน ซึ่งผู้วิจัยสามารถเขียน Parameter แสดงการเชื่อมโยงตำแหน่งของแขนได้เป็น ACB ซึ่งโครงสร้างด้าน แกนโยก นี้ผู้วิจัยจะเรียกว่า Limb ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ ด้านขวาของ Limb นี้ ผู้วิจัยจะแสดงเวกเตอร์ที่แสดงตำแหน่งของปลายแขน B จาก ฐาน A ด้วย เวกเตอร์ H เพราะฉะนั้นผู้วิจัยจะได้สมการเปรียบเทียบตำแหน่งดังนี้

$$AC + CB = \vec{H} \tag{3.71}$$

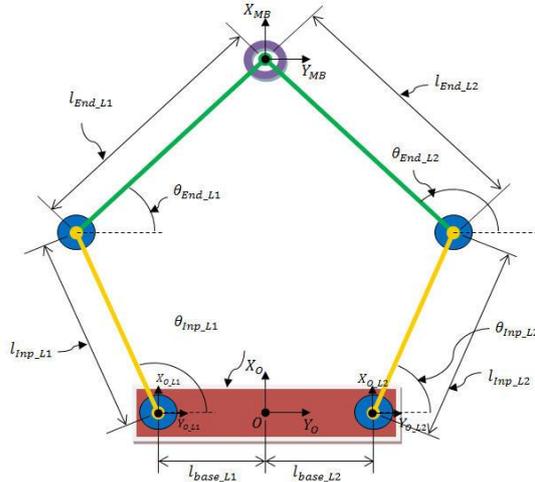
จากสมการจะเห็นได้ว่าผู้วิจัยแบ่งสมการเป็น 2 พจน์ ซึ่งผู้วิจัยเรียกพจน์ ซ้าย (ฝั่งแกนโยก) ว่า สมการ LIMB ส่วนสมการที่อยู่อีกด้านหนึ่ง (ฝั่งเวกเตอร์) ว่า สมการ POSE หรือสมการ Vector ซึ่งจากรูปแบบสมการนี้ทำให้ผู้วิจัยสามารถคำนวณหาสมการจลนศาสตร์ผกผันได้

สมการจลนศาสตร์ผกผันสำหรับแขนกล 4 แกนแบบกลไกขนาน

การเคลื่อนที่ของแขนกลเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามความต้องการ จะต้องอาศัยการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กันของต้นก้านทุกตัว ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการควบคุมที่อ้างอิงถึงสมการการเคลื่อนที่ ที่จะสามารถคำนวณหาการเคลื่อนที่ของต้นก้านที่สัมพันธ์กับจุดทำงานได้

ในแขนกล 4 แกนแบบกลไกขนานตัวนี้ สมการที่ใช้ควบคุมจะเป็นสมการจลนศาสตร์ผกผันที่มีค่าป้อนเข้าเป็นค่าตำแหน่งที่ต้องการให้แขนกลเข้าถึง และได้ผลลัพธ์เป็นมุมในการเคลื่อนที่ของต้นก้านแต่ละตัว ซึ่งสมการจลนศาสตร์ผกผันนี้จะสร้างขึ้นโดยใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์หลายๆ อย่างมา

คำนวณร่วมกัน โดยจะเน้นไปที่การใช้เมตริกซ์เพื่อหาคำตอบ โดยจะมีวิธีการวิเคราะห์ที่สร้างสมการดังนี้

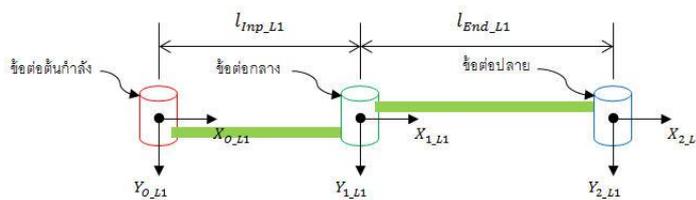


รูปที่ 3.18 โครงสร้างและตัวแปรต่างๆ ที่นำมาใช้ในการคำนวณ D-H

ในการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการจลนศาสตร์ผกผันของแขนกลแบบกลไกขนาน [11] จะทำการตั้งแกนอ้างอิงเสมือน ไว้ที่จุดศูนย์กลางทั้ง 2 ด้าน ซึ่งแกนอ้างอิงเสมือนนี้จะอ้างอิงกับตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกล

การวิเคราะห์หาสมการโครงสร้างของแขนกลโดยใช้ทฤษฎี Danavit-Hartenberg

- แขนด้านซ้าย



รูปที่ 3.19 การวิเคราะห์ D-H parameter แขนด้านซ้าย

จากรูปจะสามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆ ของแขนด้านซ้ายได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ

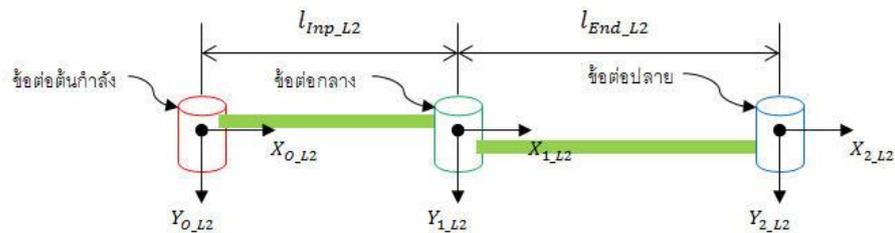
| i | α_i | a_i | d_i | θ_i |
|-----|------------|---------------|-------|--------------------|
| 1 | 0 | l_{Inv_L1} | 0 | θ_{Inv_L1} |
| 2 | 0 | l_{End_L1} | 0 | θ_{End_L1} |

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาเขียนเป็นสมการรวมความสัมพันธ์ของแขนได้ คือ

$$A_{LMB_1} = \begin{bmatrix} \cos[\theta_{Inp_L1}] & -\sin[\theta_{Inp_L1}] & 0 & l_{Inp_L1} \cos[\theta_{Inp_L1}] \\ \sin[\theta_{Inp_L1}] & \cos[\theta_{Inp_L1}] & 0 & l_{Inp_L1} \sin[\theta_{Inp_L1}] \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos[\theta_{End_L1}] & -\sin[\theta_{End_L1}] & 0 & l_{End_L1} \cos[\theta_{End_L1}] \\ \sin[\theta_{End_L1}] & \cos[\theta_{End_L1}] & 0 & l_{End_L1} \sin[\theta_{End_L1}] \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos[\theta_{End_L1} + \theta_{Inp_L1}] & -\sin[\theta_{End_L1} + \theta_{Inp_L1}] & 0 & \cos[\theta_{End_L1} + \theta_{Inp_L1}]l_{End_L1} + \cos[\theta_{Inp_L1}]l_{Inp_L1} \\ \sin[\theta_{End_L1} + \theta_{Inp_L1}] & \cos[\theta_{End_L1} + \theta_{Inp_L1}] & 0 & \sin[\theta_{End_L1} + \theta_{Inp_L1}]l_{End_L1} + \sin[\theta_{Inp_L1}]l_{Inp_L1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

● แขนด้านขวา



รูปที่ 3.20 การวิเคราะห์ D-H parameter แขนด้านขวา

จากรูปจะสามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆ ของแขนด้านขวาได้ดังนี้

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ต่างๆ

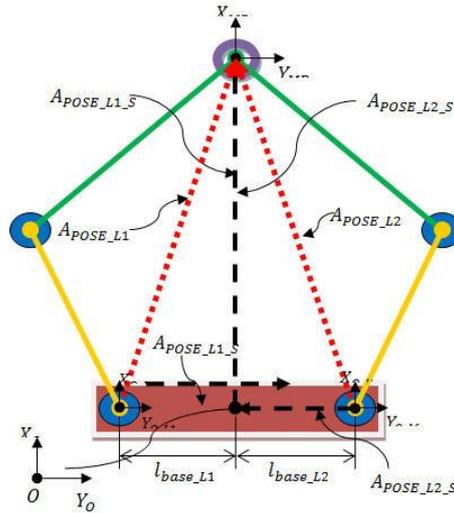
| i | α_i | a_i | d_i | θ_i |
|-----|------------|---------------|-------|--------------------|
| 1 | 0 | l_{Inp_L2} | 0 | θ_{Inp_L2} |
| 2 | 0 | l_{End_L2} | 0 | θ_{End_L2} |

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาเขียนเป็นสมการรวมความสัมพันธ์ของแขนได้ คือ

$$A_{LMB_2} = \begin{bmatrix} \cos[\theta_{Inp_L2}] & -\sin[\theta_{Inp_L2}] & 0 & l_{Inp_L2} \cos[\theta_{Inp_L2}] \\ \sin[\theta_{Inp_L2}] & \cos[\theta_{Inp_L2}] & 0 & l_{Inp_L2} \sin[\theta_{Inp_L2}] \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos[\theta_{End_L2}] & -\sin[\theta_{End_L2}] & 0 & l_{End_L2} \cos[\theta_{End_L2}] \\ \sin[\theta_{End_L2}] & \cos[\theta_{End_L2}] & 0 & l_{End_L2} \sin[\theta_{End_L2}] \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos[\theta_{End_L2} + \theta_{Imp_L2}] & -\sin[\theta_{End_L2} + \theta_{Imp_L2}] & 0 & \cos[\theta_{End_L2} + \theta_{Imp_L2}]l_{End_L2} + \cos[\theta_{Imp_L2}]l_{Imp_L2} \\ \sin[\theta_{End_L2} + \theta_{Imp_L2}] & \cos[\theta_{End_L2} + \theta_{Imp_L2}] & 0 & \sin[\theta_{End_L2} + \theta_{Imp_L2}]l_{End_L2} + \sin[\theta_{Imp_L2}]l_{Imp_L2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

การวิเคราะห์หาสมการเวกเตอร์อ้างอิงตำแหน่งปลายแขนกล



รูปที่ 3.21 โครงสร้างและตัวแปรต่างๆ ที่นำมาใช้ในการคำนวณเวกเตอร์

จากลักษณะโครงสร้างจะเห็นว่าเวกเตอร์ A_{POSE} ทั้งสองด้านเป็นเวกเตอร์ที่อ้างอิงตำแหน่งของต้นก้านกับปลายแขนของแขนกลทั้ง 2 ด้าน ซึ่งจะสามารถคิดได้จากเวกเตอร์ประกอบ 2 เวกเตอร์ คือเวกเตอร์จากต้นก้านไปยังตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้นและจากตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้นไปยังตำแหน่งปลายแขน ดังนี้

- สมการเวกเตอร์อ้างอิงปลายแขนกลกับต้นก้านด้านซ้าย

$$A_{POSE_L1_S1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_{base_L1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

$$A_{POSE_L1_S2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{mb} \\ 0 & 1 & 0 & y_{mb} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

$$A_{POSE_L1} = A_{POSE_L1_S1}A_{POSE_L1_S2} \quad (3.78)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{mb} \\ 0 & 1 & 0 & l_{base_L1} + y_{mb} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

- สมการเวกเตอร์อ้างอิงปลายแขนกลกับต้นกำลังด้านขวา

$$A_{POSE_L2_S1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -l_{base_L2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

$$A_{POSE_L2_S2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{mb} \\ 0 & 1 & 0 & y_{mb} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

$$A_{POSE_L2} = A_{POSE_L2_S1} A_{POSE_L2_S2} \quad (3.82)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{mb} \\ 0 & 1 & 0 & -l_{base_L2} + y_{mb} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

การวิเคราะห์เปรียบเทียบสมการ D-H และสมการเวกเตอร์

จากการที่สมการ D-H และสมการเวกเตอร์ มีการอ้างอิงที่ตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งอ้างอิงสุดท้ายเป็นตำแหน่งเดียวกัน สมการทั้งสองจึงมีความสัมพันธ์กันซึ่งสามารถนำไปหาสมการจลนศาสตร์ผลผันได้

- สมการเปรียบเทียบแขนด้านซ้าย

$$A_{LIMB_1} = A_{POSE_L1} \quad (3.84)$$

$$\begin{bmatrix} \cos[\theta_{EndL1} + \theta_{InpL1}] & -\sin[\theta_{EndL1} + \theta_{InpL1}] & -\theta & -\cos[\theta_{EndL1} + \theta_{InpL1}]l_{EndL1} + \cos[\theta_{InpL1}]l_{InpL1} \\ \sin[\theta_{EndL1} + \theta_{InpL1}] & \cos[\theta_{EndL1} + \theta_{InpL1}] & -\theta & -\sin[\theta_{EndL1} + \theta_{InpL1}]l_{EndL1} + \sin[\theta_{InpL1}]l_{InpL1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{mb} \\ 0 & 1 & 0 & l_{base_L1} + y_{mb} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

จะเห็นว่าสมการที่มีตัวแปรของตำแหน่งปลายแขนกล คือ x_{mb} และ y_{mb} นั้นจะมีค่าเท่ากับสมการอีกด้านหนึ่ง ซึ่งสามารถแยกออกมาเพื่อคำนวณได้ ดังนี้

$$x_{mb} = \text{Cos}[\theta_{\text{End_L1}} + \theta_{\text{Inp_L1}}]l_{\text{End_L1}} + \text{Cos}[\theta_{\text{Inp_L1}}]l_{\text{Inp_L1}} \quad (3.86)$$

$$l_{\text{base_L1}} + y_{mb} = \text{Sin}[\theta_{\text{End_L1}} + \theta_{\text{Inp_L1}}]l_{\text{End_L1}} + \text{Sin}[\theta_{\text{Inp_L1}}]l_{\text{Inp_L1}} \quad (3.87)$$

- สมการเปรียบเทียบแขนด้านขวา

$$A_{\text{LIMB_2}} = A_{\text{POSE_L2}} \quad (3.88)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Cos}[\theta_{\text{End_L2}} + \theta_{\text{Inp_L2}}] & -\text{Sin}[\theta_{\text{End_L2}} + \theta_{\text{Inp_L2}}] & 0 & -\text{Cos}[\theta_{\text{End_L2}} + \theta_{\text{Inp_L2}}]l_{\text{End_L2}} + \text{Cos}[\theta_{\text{Inp_L2}}]l_{\text{Inp_L2}} \\ \text{Sin}[\theta_{\text{End_L2}} + \theta_{\text{Inp_L2}}] & \text{Cos}[\theta_{\text{End_L2}} + \theta_{\text{Inp_L2}}] & 0 & \text{Sin}[\theta_{\text{End_L2}} + \theta_{\text{Inp_L2}}]l_{\text{End_L2}} + \text{Sin}[\theta_{\text{Inp_L2}}]l_{\text{Inp_L2}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{mb} \\ -l_{\text{base_L2}} + y_{mb} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

จะเห็นว่าสมการที่มีตัวแปรของตำแหน่งปลายแขนกล คือ x_{mb} และ y_{mb} นั้นจะมีค่าเท่ากับสมการอีกด้านหนึ่ง ซึ่งสามารถแยกออกมาเพื่อคำนวณได้ ดังนี้

$$x_{mb} = \text{Cos}[\theta_{\text{End_L2}} + \theta_{\text{Inp_L2}}]l_{\text{End_L2}} + \text{Cos}[\theta_{\text{Inp_L2}}]l_{\text{Inp_L2}} \quad (3.90)$$

$$-l_{\text{base_L2}} + y_{mb} = \text{Sin}[\theta_{\text{End_L2}} + \theta_{\text{Inp_L2}}]l_{\text{End_L2}} + \text{Sin}[\theta_{\text{Inp_L2}}]l_{\text{Inp_L2}} \quad (3.91)$$

การวิเคราะห์สมการจลนศาสตร์ผกผันจากสมการเปรียบเทียบ

จากสมการเปรียบเทียบที่ได้จากการความสัมพันธ์ของสมการ D-H และสมการเวกเตอร์ผู้วิจัยจะสามารถหาสมการจลนศาสตร์ผกผันได้ดังนี้

- การคำนวณหาสมการจลนศาสตร์ผกผันในข้อต่อ $\theta_{\text{End_L1}}$, $\theta_{\text{End_L2}}$

ในสมการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า สมการทั้งด้านแขนซ้ายและแขนขวามีความคล้ายคลึงกัน ในที่นี้จะทำการหา $\theta_{\text{End_L1}}$ ที่อยู่บนแขนซ้ายก่อน โดยการนำสมการเปรียบเทียบทั้งสอง (x_{mb} , y_{mb}) สมการมาแยกกำลังสองและรวมเข้าด้วยกันดังนี้

$$(x_{mb})^2 + (l_{base_L1} + y_{mb})^2 =$$

$$(\text{Cos}[\theta_{End_L1} + \theta_{Imp_L1}]l_{End_L1} + \text{Cos}[\theta_{Imp_L1}]l_{Imp_L1})^2 + (\text{Sin}[\theta_{End_L1} + \theta_{Imp_L1}]l_{End_L1} + \text{Sin}[\theta_{Imp_L1}]l_{Imp_L1})^2$$

(3.92)

ทำการจัดรูปสมการนี้ใหม่จะได้

$$x_{mb}^2 + (l_{base_L1} + y_{mb})^2 = l_{End_L1}^2 + 2\text{Cos}[\theta_{End_L1}]l_{End_L1}l_{Imp_L1} + l_{Imp_L1}^2$$

(3.93)

จะเห็นว่าเหลือเพียงมุม θ_{End_L1} เพียงมุมเดียวในสมการ ทำการจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\text{Cos}[\theta_{End_L1}] = \frac{x_{mb}^2 + (l_{base_L1} + y_{mb})^2 - l_{End_L1}^2 - l_{Imp_L1}^2}{2l_{End_L1}l_{Imp_L1}}$$

(3.94)

สมการออกมาอยู่ในรูปของ $\cos[\theta]$ ทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูป $\tan[\theta]$ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การหมุนได้ง่ายขึ้น

จากสูตรการแปลง $\text{Cos}[\theta] = \frac{1 - (\text{Tan}[\frac{\theta}{2}])^2}{1 + (\text{Tan}[\frac{\theta}{2}])^2}$ จะสามารถจัดรูปเป็นสมการใหม่ได้คือ

$$\text{Tan}\left[\frac{\theta_{End_L1}}{2}\right] = \sqrt{\frac{1 - \frac{x_{mb}^2 + (l_{base_L1} + y_{mb})^2 - l_{End_L1}^2 - l_{Imp_L1}^2}{2l_{End_L1}l_{Imp_L1}}}{1 + \frac{x_{mb}^2 + (l_{base_L1} + y_{mb})^2 - l_{End_L1}^2 - l_{Imp_L1}^2}{2l_{End_L1}l_{Imp_L1}}}}$$

(3.95)

$$= \sqrt{\frac{4l_{End_L1}l_{Imp_L1}}{x_{mb}^2 + (l_{base_L1} + y_{mb})^2 - (l_{End_L1} - l_{Imp_L1})^2}}$$

(3.96)

$$\therefore \theta_{End_L1} = 2 \tan^{-1} \sqrt{\frac{4l_{End_L1}l_{Imp_L1}}{x_{mb}^2 + (l_{base_L1} + y_{mb})^2 - (l_{End_L1} - l_{Imp_L1})^2}} \quad (3.97)$$

ซึ่งสมการ θ_{End_L2} ก็ใช้วิธีคิดแบบเดียวกัน ซึ่งให้สมการผลลัพธ์ออกมาคล้ายกัน คือ

$$\therefore \theta_{End_L2} = 2 \tan^{-1} \sqrt{\frac{4l_{End_L2}l_{Imp_L2}}{x_{mb}^2 + (l_{base_L2} - y_{mb})^2 - (l_{End_L2} - l_{Imp_L2})^2}} \quad (3.98)$$

จะมีส่วนที่แตกต่างกันคือ ส่วนของ $(l_{base_L2} - y_{mb})^2$ ที่เครื่องหมายต่างจากของ θ_{End_L1} เนื่องจากอยู่คนละด้านของจุดอ้างอิง

- การคำนวณหาสมการจลนศาสตร์ผกผันในข้อต่อ $\theta_{imp_L1}, \theta_{imp_L2}$

ในส่วนข้อต่อ $\theta_{imp_L1}, \theta_{imp_L2}$ นี้ จะมีความสำคัญมากในการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกล เนื่องจากเป็นส่วนที่บอกถึงตำแหน่งมุมของข้อต่อต้นก้านที่ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นส่วนที่บอกถึงตำแหน่งมุมที่ต้นก้านควรจะหมุนไป เพื่อให้ปลายแขนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง

ในการคำนวณส่วนนี้ จะใช้สมการตั้งต้นเหมือนกับการหามุม $\theta_{End_L1}, \theta_{End_L2}$ นั่นคือ

$$x_{mb} = \cos[\theta_{End_L1} + \theta_{Imp_L1}]l_{End_L1} + \cos[\theta_{Imp_L1}]l_{Imp_L1} \quad (3.99)$$

$$l_{base_L1} + y_{mb} = \sin[\theta_{End_L1} + \theta_{Imp_L1}]l_{End_L1} + \sin[\theta_{Imp_L1}]l_{Imp_L1} \quad (3.100)$$

และ

$$x_{mb} = \cos[\theta_{End_L2} + \theta_{Imp_L2}]l_{End_L2} + \cos[\theta_{Imp_L2}]l_{Imp_L2} \quad (3.101)$$

$$-l_{base_L2} + y_{mb} = \sin[\theta_{End_L2} + \theta_{Imp_L2}]l_{End_L2} + \sin[\theta_{Imp_L2}]l_{Imp_L2} \quad (3.102)$$

- การคำนวณหา θ_{imp_L1} บนข้อต่อต้นก้านแขนซ้าย

ทำการคำนวณแขนด้านซ้ายเพื่อหาสมการของ θ_{imp_L1} โดยการจัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$x_{mb} = \text{Cos}[\theta_{\text{End_L1}} + \theta_{\text{Imp_L1}}]l_{\text{End_L1}} + \text{Cos}[\theta_{\text{Imp_L1}}]l_{\text{Imp_L1}} \quad (3.103)$$

$$x_{mb} = (\text{Cos}[\theta_{\text{End_L1}}]l_{\text{End_L1}} + l_{\text{Imp_L1}})\text{Cos}[\theta_{\text{Imp_L1}}] - (\text{Sin}[\theta_{\text{End_L1}}]l_{\text{End_L1}})\text{Sin}[\theta_{\text{Imp_L1}}] \quad *1 \quad (3.104)$$

$$l_{\text{base_L1}} + y_{mb} = \text{Sin}[\theta_{\text{End_L1}} + \theta_{\text{Imp_L1}}]l_{\text{End_L1}} + \text{Sin}[\theta_{\text{Imp_L1}}]l_{\text{Imp_L1}} \quad (3.105)$$

$$l_{\text{base_L1}} + y_{mb} = (\text{Cos}[\theta_{\text{End_L1}}]l_{\text{End_L1}} + l_{\text{Imp_L1}})\text{Sin}[\theta_{\text{Imp_L1}}] + (\text{Sin}[\theta_{\text{End_L1}}]l_{\text{End_L1}})\text{Cos}[\theta_{\text{Imp_L1}}] \quad *2 \quad (3.106)$$

จะได้สมการที่จัดรูปแล้วเป็นสมการ *1 และ *2 นำมาคำนวณในสูตรการคำนวณดังนี้

$$a\text{Cos}(\alpha) - b\text{Sin}(\alpha) = c \quad (3.107)$$

$$a\text{Sin}(\alpha) + b\text{Cos}(\alpha) = d \quad (3.108)$$

$$\alpha = \text{Tan}^{-1} \left[\frac{ad - bc}{ac + bd} \right] \quad (3.109)$$

โดยกำหนดให้

$$a = (\text{Cos}[\theta_{\text{End_L1}}]l_{\text{End_L1}} + l_{\text{Imp_L1}})$$

$$b = (\text{Sin}[\theta_{\text{End_L1}}]l_{\text{End_L1}})$$

$$c = x_{mb}$$

$$d = l_{base_L1} + y_{mb}$$

$$\alpha = \theta_{Inp_L1}$$

แทนค่าในสูตรข้างต้น จะสามารถหาค่าของ θ_{Inp_L1} ได้คือ

$$\therefore \theta_{Inp_L1} = \text{Tan}^{-1} \left[\frac{(\text{Cos}[\theta_{End_L1}]l_{End_L1} + l_{Inp_L1})(l_{base_L1} + y_{mb}) - (\text{Sin}[\theta_{End_L1}]l_{End_L1})x_{mb}}{(\text{Cos}[\theta_{End_L1}]l_{End_L1} + l_{Inp_L1})x_{mb} + (\text{Sin}[\theta_{End_L1}]l_{End_L1})(l_{base_L1} + y_{mb})} \right] \quad (3.110)$$

- การคำนวณหา θ_{Inp_L2} บนข้อต่อต้นกำลังแขนซ้าย

ทำการคำนวณแขนด้านซ้าย เพื่อหาสมการของ θ_{Inp_L2} โดยการจัดรูปสมการใหม่ดังนี้

$$x_{mb} = \text{Cos}[\theta_{End_L2} + \theta_{Inp_L2}]l_{End_L2} + \text{Cos}[\theta_{Inp_L2}]l_{Inp_L2} \quad (3.111)$$

$$x_{mb} = (\text{Cos}[\theta_{End_L2}]l_{End_L2} + l_{Inp_L2})\text{Cos}[\theta_{Inp_L2}] - (\text{Sin}[\theta_{End_L2}]l_{End_L2})\text{Sin}[\theta_{Inp_L2}] \quad *3(3.112)$$

$$-l_{base_L2} + y_{mb} = \text{Sin}[\theta_{End_L2} + \theta_{Inp_L2}]l_{End_L2} + \text{Sin}[\theta_{Inp_L2}]l_{Inp_L2} \quad (3.113)$$

$$-l_{base_L2} + y_{mb} = (\text{Cos}[\theta_{End_L2}]l_{End_L2} + l_{Inp_L2})\text{Sin}[\theta_{Inp_L2}] + (\text{Sin}[\theta_{End_L2}]l_{End_L2})\text{Cos}[\theta_{Inp_L2}] \quad *4(3.114)$$

จะได้สมการที่จัดรูปแล้วเป็นสมการ *3 และ *4 นำมาคำนวณในสูตรการคำนวณดังนี้

$$a\text{Cos}(\alpha) - b\text{Sin}(\alpha) = c \quad (3.115)$$

$$a\sin(\alpha) + b\cos(\alpha) = d \quad (3.116)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{ad - bc}{ac + bd} \right] \quad (3.117)$$

โดยกำหนดให้

$$a = \left(\cos[\theta_{End_L2}] l_{End_L2} + l_{Imp_L2} \right)$$

$$b = \left(\sin[\theta_{End_L2}] l_{End_L2} \right)$$

$$c = x_{mb}$$

$$d = -l_{base_L2} + y_{mb}$$

$$\alpha = \theta_{Imp_L2}$$

แทนค่าในสูตรข้างต้น จะสามารถหาค่าของ θ_{Imp_L2} ได้คือ

$$\therefore \theta_{Imp_L2} = \tan^{-1} \left[\frac{\left(\cos[\theta_{End_L2}] l_{End_L2} + l_{Imp_L2} \right) (-l_{base_L2} + y_{mb}) - \left(\sin[\theta_{End_L2}] l_{End_L2} \right) x_{mb}}{\left(\cos[\theta_{End_L2}] l_{End_L2} + l_{Imp_L2} \right) x_{mb} + \left(\sin[\theta_{End_L2}] l_{End_L2} \right) (-l_{base_L2} + y_{mb})} \right] \quad (3.118)$$

3.4.2 การวิเคราะห์จลนศาสตร์ความเร็วพิกัด

จากสมการหลัก (3.88) ให้ทำอนุพันธ์ทั้งสองข้างของสมการ โดยกำหนดให้ $L1L1, LEL1$ เป็นค่าคงที่

$SetAttributes[L1L1, Constant];$

$SetAttributes[LEL1, Constant];$

$$Ldot = Dt \left(\begin{bmatrix} \cos[\theta EL1 + \theta IL1] & -\sin[\theta EL1 + \theta IL1] & 0 & \cos[\theta EL1 + \theta IL1] LEL1 + \cos[\theta IL1] L1L1 \\ \sin[\theta EL1 + \theta IL1] & \cos[\theta EL1 + \theta IL1] & 0 & \sin[\theta EL1 + \theta IL1] LEL1 + \sin[\theta IL1] L1L1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right); \quad (3.119)$$

$SetAttributes[lBaseL1, Constant];$

$$Ldot = Dt \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & lBaseL1 + Y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right); \quad (3.120)$$

ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$\begin{bmatrix} -(Dt[\theta EL1] + Dt[\theta IL1])\sin[\theta EL1 + \theta IL1] & -\cos[\theta EL1 + \theta IL1](Dt[\theta EL1] + Dt[\theta IL1]) & 0 & -L1L1Dt[\theta IL1]\sin[\theta IL1] - LEL1(Dt[\theta EL1] + Dt[\theta IL1])\sin[\theta EL1 + \theta IL1] \\ \cos[\theta EL1 + \theta IL1](Dt[\theta EL1] + Dt[\theta IL1]) & -(Dt[\theta EL1] + Dt[\theta IL1])\sin[\theta EL1 + \theta IL1] & 0 & L1L1\cos[\theta IL1]Dt[\theta IL1] + LEL1\cos[\theta EL1 + \theta IL1](Dt[\theta EL1] + Dt[\theta IL1]) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(3.121)

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & Dt[X] \\ 0 & 0 & 0 & Dt[Y] \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(3.122)

จากนั้นจึงเฉพาะพจน์ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วเชิงเส้น ซึ่งได้แก่

$$\begin{bmatrix} Dt[X] \\ Dt[Y] \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L1L1Dt[\theta IL1]\sin[\theta IL1] - LEL1(Dt[\theta EL1] + Dt[\theta IL1])\sin[\theta EL1 + \theta IL1] \\ L1L1\cos[\theta IL1]Dt[\theta IL1] + LEL1\cos[\theta EL1 + \theta IL1](Dt[\theta EL1] + Dt[\theta IL1]) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(3.123)

จากนั้นทำการหาค่าของ $Dt[\theta IL1]$ ซึ่งเป็น function ของ $\theta IL1, \theta EL1, Dt[Y], Dt[X]$ ซึ่งผู้วิจัยทราบค่าหรือสามารถคำนวณได้โดยใช้โปรแกรม Mathematica ดังภาคผนวก 3.1

ซึ่งจะได้ค่าตามสมการ Inverse Velocity ดังสมการ (3.124)

$$Dt[\theta IL1] = -\frac{\cos[\theta EL1 + \theta IL1]Dt[X] + Dt[Y]\sin[\theta EL1 + \theta IL1]}{L1L1(\cos[\theta EL1 + \theta IL1]\sin[\theta IL1] - \cos[\theta IL1]\sin[\theta EL1 + \theta IL1])}$$

(3.124)

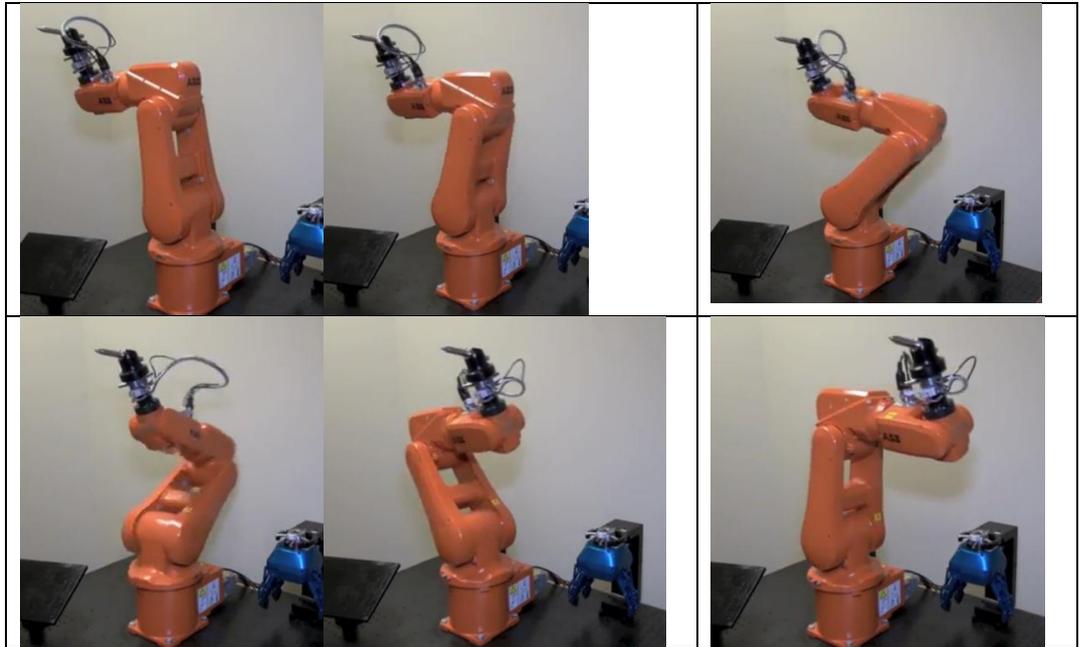
ในกรณีแขนด้านขวามีกระทำเหมือนกัน จนได้ $Dt[\theta IR1]$ เพื่อใช้กำหนดในการเขียนโปรแกรม

3.4.3 การวิเคราะห์ Singularity ของแขนกลแบบ 5R

Singularity เป็นสิ่งที่ต้องหลีกเลี่ยง ซึ่งในแขนกลมีเกิดขึ้นได้ในหลายกรณี เช่น

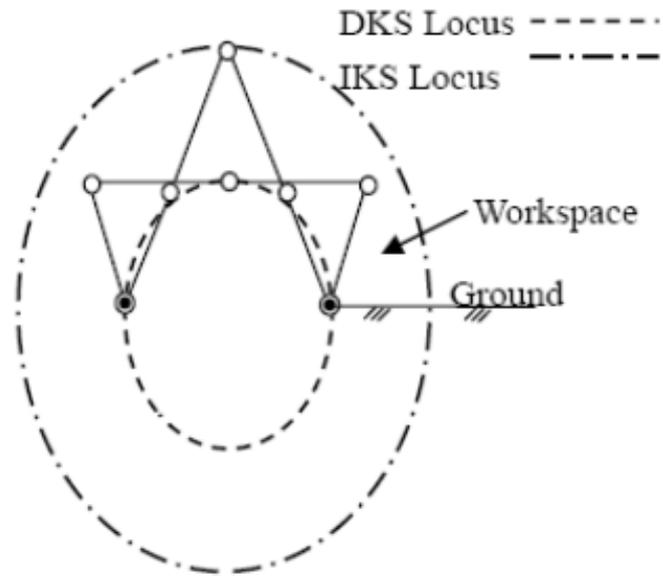
1. เมื่อปลายแขนกลเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงซึ่งแกนต่างๆจะต้องเคลื่อนที่ตอบสนองในอัตราเร็วที่ต่างกัน ซึ่งแต่ละแกนก็จะมีข้อจำกัดในการหมุนรอบแกนตนเอง ซึ่งเมื่อถึงจุดที่ถึงข้อจำกัดขอบเขตการหมุนแต่ในขณะเดียวกันก็ต้องรักษาตำแหน่งปลายแขนกลจึงทำให้ แกนหลายๆแกนก่อนถึงปลายแขนกล Swing ตัวอย่างเร็วมาก ความเร่งสูงมาก ในเวลาสั้นมาเพื่อขยับแกนของตนให้อยู่ในตำแหน่งที่ไม่ขัดกับขอบเขตของตนและยังรักษาตำแหน่งปลายแขนกลไว้ได้

ด้วยผลลัพธ์ที่เกิดคือ เกิดการ Swing อย่างแรงซึ่งอันตราย และสร้างความเสียหายให้กับชิ้นส่วน
ได้ ดังรูปที่ 3.22

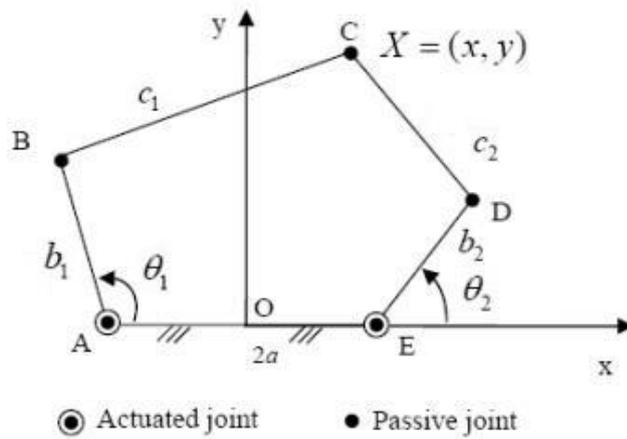


รูปที่ 3.22 แสดงการเกิด ขณะปลายแขนหุ่นยนต์ เคลื่อนเป็นเส้นตรงจากซ้ายไปขวา

2. ภาวะที่ข้อต่อต้นกำลังไม่สามารถขยับได้อันเนื่องมาจากลักษณะการวางตัวของ ก้านโยง ต่างๆ ผิดพลาด เช่น วางตัววางตัวเป็นเส้นเดียวกัน ดังรูปที่ 3.25 ก้านโยงที่ 3 และ 4 (ก้านโยงสีแดง) เกิดการวางตัวเป็นเส้นเดียวกัน จะสังเกตได้ว่าในจุดนี้ ต้นกำลังไม่สามารถขยับได้เพราะจะทำให้เกิดการจัดกันของก้านโยง 3 และ 4 ซึ่ง Cheung, J.W.F. [5] เรียก Singularity ลักษณะนี้ว่า Direct Kinematic Singularity (DSK) ดังรูปที่ 3.23 และ รูปที่ 3.24 ซึ่งจะเกิดขึ้น เมื่อ $\det(J_x)$ แล้วได้ค่าเท่ากับ 0 ดังสมการ(3.129)



รูปที่ 3.23 แสดงเส้นทาง Pose และประเภทของ Singularity



รูปที่ 3.24 แสดง Notation ต่างๆของก้านโยง

$$J_x = \begin{bmatrix} x - a - b_2 \cos[\theta_2] & y - b_2 \sin[\theta_2] \\ x + a - b_1 \cos[\theta_1] & y - b_1 \sin[\theta_1] \end{bmatrix} \tag{3.125}$$

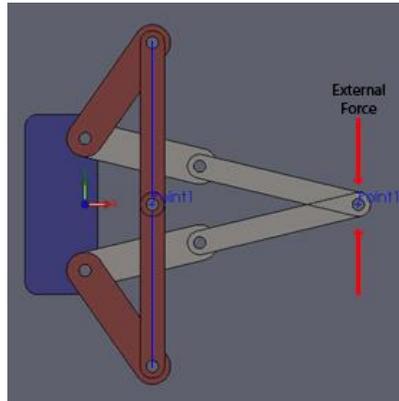
$$J_\theta = \begin{bmatrix} d_2 & 0 \\ 0 & d_1 \end{bmatrix} \tag{3.126}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} d_2 &= b_2 y \cos[\theta_2] - (x - a) b_2 \sin[\theta_2] \\ d_1 &= b_1 y \cos[\theta_1] - (x - a) b_1 \sin[\theta_1] \end{aligned} \tag{3.127}$$

$$\det(J_\theta) = 0 \quad (3.128)$$

$$\det(J_x) = 0 \quad (3.129)$$



รูปที่ 3.25 การวางตัวที่ทำให้เกิด Singularity

3. ภาวะที่ข้อต่อต้นกำลังทั้งสองข้างเยียดตรงดังรูปที่ 3.25 (ก้าน โยงสี่เทา) ซึ่งในตำแหน่งลักษณะนี้ ก้านโยงที่ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์จะไม่สามารถรับแรง ตามแนวแรง (ลูกศรสีแดง) ได้ และโดยธรรมชาติของภาวะ Singularity จะทำให้ DOF ของระบบลดลง ซึ่ง Cheung, J.W.F. [5] เรียก Singularity ลักษณะนี้ว่า Indirect Kinematic Singularity (IKS) ซึ่งจะเกิดขึ้น เมื่อ $\det(J_\theta)$ แล้วได้ค่าเท่ากับ 0 ดังสมการ (3.128)

3.4.4 การวิเคราะห์ อินเวอร์ส จาโคเบียน

หลักการ อินเวอร์ส จาโคเบียน (Dong-Hyeok Kim [12]) โดยนำค่า Error แนวแกนจากตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ที่วัดได้ \dot{x} มา dot ด้วย อินเวอร์ส จาโคเบียน (J^{-1}) ของระบบ ดังสมการที่ (3.62) ทำให้ผู้วิจัยได้อัตราการเคลื่อนที่ต้นกำลัง (\dot{q}) ยังผลให้ปลายแขนหุ่นยนต์เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งผู้วิจัยสมการแปลงสมการ (3.62) ไปเป็นดังสมการ

$$Error(q) = J^{-1}Error(x) \quad (3.130)$$

ส่วนการนำไปใช้จะแสดงอยู่ในบทที่ 4, 5 และ 6

บทที่ 4 การออกแบบกลไกและหุ่นยนต์

4.1 บทนำ

การประดิษฐ์หุ่นยนต์ช่วยในการประกอบอัญมณีเทียมอย่างง่ายนั้น ยังไม่เคยมีการประดิษฐ์คิดค้นมาก่อน งานวิทยานิพนธ์นี้จึงเน้นไปที่การศึกษา ออกแบบ ต้นแบบของหุ่นยนต์ช่วยในการประกอบ ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ซึ่งในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะทำการศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของแขนของช่างประกอบอัญมณี รูปแบบของหุ่นยนต์แบบขนานที่เหมาะสม และตัวอย่างการนำหุ่นยนต์โครงสร้างแบบขนาดไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมประกอบเครื่องประดับเทียม โดยทั่วไปการประกอบเครื่องประดับเทียมนั้นจะใช้แรงงานมนุษย์เป็นหลัก เนื่องจากลักษณะงานต้องการความประณีต แม่นยำ ค่อนข้างมาก จำนวนผลิตต่อแบบไม่มากนักประมาณหลัก ร้อยถึงหลักพันชิ้น รูปแบบของงานเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยตามสมัยนิยมและจินตนาการของนักออกแบบ ซึ่งมนุษย์มีความยืดหยุ่นต่อการเรียนรู้งานและทำงานที่ต้องการการเข้างาน 5 ถึง 6 DOF ได้แต่มนุษย์ก็มีข้อจำกัด กล่าวคือ มนุษย์มีความเหนื่อยล้าเมื่อต้องทำงานต่อเนื่องกันเป็นเวลานานซึ่งจะทำให้คุณภาพของสินค้าที่ผลิตมีคุณภาพต่ำลง ประกอบกับความเร็วในการผลิตจะลดลงทำให้ได้ปริมาณการผลิตที่ได้ลดลงเป็นอย่างมาก และมีรายงานจาก สำนักงานพัฒนาระบบสาธารณสุข[14] ว่าการทำงานเคลื่อนไหวซ้ำๆกันขณะทำงานจะมีผลเสียต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน อันนำมาซึ่งโรคระบบกล้ามเนื้อและโครงสร้างกระดูกที่เกิดขึ้นจากการทำงาน

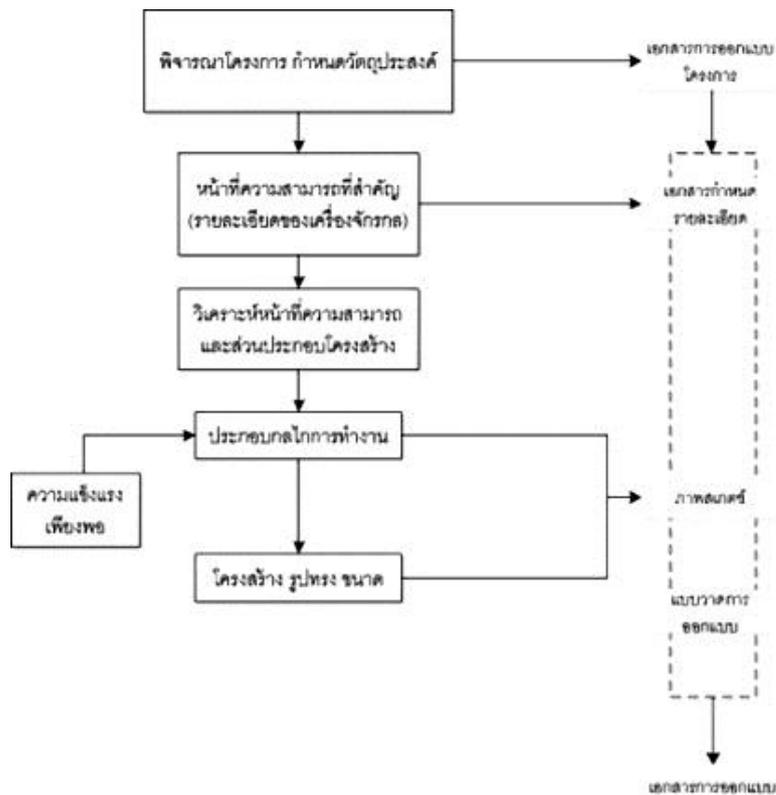
แต่เนื่องจากหุ่นยนต์ที่มีกลไกเข้างานแบบ 5 ถึง 6 DOF ได้ในท้องตลาดนั้นจะมีอยู่หลายแบบ ทางผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องศึกษาเพื่อสืบค้นรูปแบบหุ่นยนต์ที่มีอยู่ในงานวิจัยและในท้องตลาด เพื่อค้นหาแนวทางการคิดค้นหุ่นยนต์ที่เหมาะสมต่ออุตสาหกรรมการประกอบอัญมณีเทียม โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบคุณสมบัติของหุ่นยนต์กับความต้องการของอุตสาหกรรมประกอบอัญมณี ซึ่งโดยปรกติหุ่นยนต์ที่อยู่ในงานวิจัยจะไม่ได้ออกแบบเพื่อประยุกต์เข้ากับอุตสาหกรรมใดอุตสาหกรรมหนึ่ง และหุ่นยนต์ที่อยู่ในท้องตลาดปัจจุบันจะออกแบบเพื่ออุตสาหกรรมที่ใช้หุ่นยนต์เป็นหลัก เช่น การประกอบรถยนต์ หรือ ประกอบแผงวงจร วิธีแก้ปัญหาในงานวิจัยที่นี้คือ ทำตารางเปรียบเทียบความเหมาะสมของหุ่นยนต์แต่ละแบบที่มีอยู่ในท้องตลาดตามข้อคุณลักษณะของการประกอบอัญมณีเทียม แล้วสรุปเลือกคุณลักษณะของหุ่นยนต์ที่เหมาะสมเพื่อเป็นข้อกำหนดในการออกแบบต่อไป ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะที่ต้องการของหุ่นยนต์เมื่อ เปรียบเทียบกับ รูปแบบต่างๆ ของหุ่นยนต์

| | สิ่งที่การประกอบอัญมณี ต้องการ | หุ่นยนต์แบบ ขนานแบบ Double Layer 5 Dof | Smallest Delta Robot 4 Dof [14] | Smallest Articulate Robot 6 Dof[15] |
|--|---|--|--|--|
| 1. Working Area (พื้นที่ที่กวาด) | 300 ตร.มม. | 376.99 ตร.มม. | 2,513 ตร.มม. | 1,822 ตร.มม |
| 2. Cost of Ownership * Leadtime * Cost of System * Training [16] | * ไม่เกิน 1 เดือน * ไม่เกิน 1,000,000 บาท * ง่ายต่อการเรียนรู้ | * ไม่เกิน 1 เดือน * 3 ถึง 400,000 บาท * ง่ายต่อการ เรียนรู้ | ไม่เกิน 1 เดือน > 700,000 บาท ง่ายต่อการ เรียนรู้ | ไม่เกิน 1 เดือน > 1,000,000 บาท ง่ายต่อการ เรียนรู้ |
| 3. PayLoad [17] | ไม่เกิน 10 g. | ไม่เกิน 100 g. | ไม่เกิน 100 g. | ไม่เกิน 3 Kg. |
| 4. Position Repeatability [17] | ไม่เกิน +-0.2 mm. (Temper ที่ตัวเครื่อง ระยะ 0.3 mm – 0.5mm.) | +/-0.1 mm | +/- 1 mm. | +/-0.01 mm. |
| 5. Cycle Time 0 to 60 mm to 0 [17] | ไม่เกิน 5 Sec | 0.2 Sec | 0.1 Sec | 0.16 Sec |

จากตารางด้านบน ทำให้ทราบว่าหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบันไม่เหมาะสมต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมประกอบอัญมณีเทียมเนื่องจาก มีประสิทธิภาพสูงเกินความต้องการและมีราคาแพง เกินกว่าที่จะตอบสนองต่อกระบวนการประกอบอัญมณีที่จะต้องใช้หุ่นยนต์จำนวนมากต่อโรงงานได้ ซึ่งผู้ประกอบการไทยซึ่งส่วนใหญ่เป็น ผู้ประกอบการขนาดย่อมซึ่งขาดเงินทุนและขาดความรู้ทางเทคโนโลยีหุ่นยนต์ ไม่สามารถจัดหาหุ่นยนต์มาใช้ในกระบวนการผลิตของตนได้ จากประสิทธิภาพของหุ่นยนต์แบบขนาน และ ปัญหาหรือข้อจำกัดที่มีในการประกอบเครื่องประดับเทียม เป็นเหตุให้ทางผู้วิจัยเล็งเห็นความสอดคล้องของความต้องการของอุตสาหกรรมการประกอบ

เครื่องประดับเทียบกับความสามารถของหุ่นยนต์แบบขนาน จึงได้ออกแบบหุ่นยนต์เพื่องานประกอบเครื่องประดับเทียมทดแทนแรงงานมนุษย์นั่นเอง สำหรับประเทศไทยและการนำเข้าเครื่องจักรประเภทนี้จากต่างประเทศนั้นมีราคาที่สูง จึงได้คิดที่จะทดลองสร้างแขนกล 5 แขน แบบกลไกขนานที่ใช้สำหรับงานหยิบจับและวางชิ้นงานในตำแหน่งและมุมที่ต้องการ โดยออกแบบให้ทำงานได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ จากวัสดุที่มีอยู่ในประเทศ และเนื่องจากการสร้างต้นแบบหุ่นยนต์ซึ่งทำให้อุปกรณ์บางส่วนเป็นลักษณะ Customer Grade ซึ่งไม่สามารถทำงานได้หลายๆ สิบชั่วโมงตามที่ควรจะได้ในอุตสาหกรรม โดยจะทำการจำลองการทำงานของแขนกลเหมือนการใช้งานจริง ซึ่งจะมีชิ้นงานฐานตัวเรือน (Parts) ตัวอย่างถูกกล่าเสียงเข้ามาวางอยู่ในบริเวณที่ติดตั้งแขนกล และให้แขนกลทำการหยิบวัตถุคิบบัวอัญมณีเทียมมาวางเรียงกันในตัวเรือนตามแบบที่กำหนดอย่างถูกต้องตามแบบที่ได้กำหนดไว้ ทั้งนี้เพื่อให้เป็นต้นแบบในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ หรือเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป การออกแบบหุ่นยนต์มีขั้นตอนดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ (ทาเคชิ [18])

4.2 แนวคิดและวิธีการออกแบบ

สิ่งที่ขาดไม่ได้ในการสร้างเครื่องจักรกลคือ การออกแบบ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผสมกันระหว่างแนวคิด ทฤษฎี การปฏิบัติ(ร่างแบบ วาดแบบ ผลิต สร้าง) อย่างมีแบบแผน มีรายละเอียด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง การออกแบบคือ กระบวนการต่างๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างเครื่องจักร เพื่อทำนำมาสร้างเครื่องจักรให้สามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ในการสร้างได้ จากรูปขั้นตอนการออกแบบ รูปที่ 4.1 ทางผู้วิจัยได้มีการออกแบบดังนี้

4.2.1 แรงบันดาลใจ

หลังจากทางผู้วิจัยได้ทำการเข้ารับการอบรม “Jewelry Making Course” จากสถาบัน Gemopolis Training School จึงได้เห็นและเข้าใจว่ากระบวนการในการคิดพลอยด้วยมือ โดยใช้เครื่องมืออย่างง่าย เช่น แท่งติดพลอย (Bees Wax) ดัง รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แท่งติดพลอย (Bees Wax)

โดยช่างผู้ชำนาญงานจะต้องใช้ทักษะในการจับเม็ดพลอย หมุนเอียงข้อมือเพื่อจับวางเม็ดพลอยดัง รูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 การวางพลอยลงบนตัวเรือน



รูปที่ 4.4 การเคลื่อนไหวของช่างตีคพลอยบนตัวเรือน

ซึ่งมีความยากลำบาก และต้องใช้ช่างฝีมือชำนาญงานในการผลิตชิ้นงาน ถึงจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ชิ้นงานสำเร็จที่ติดด้วยแท่งตีคพลอย

ถึงแม้ลักษณะของอัญมณีเทียมจะไม่ปราณีตและต้องการความแม่นยำสูงมากนักก็ตาม แต่ในขณะที่ช่างทำงานผู้วิจัยสังเกตการเคลื่อนไหวแล้วพบว่าช่างตีคพลอยเกิดการเมื่อยล้า คุณภาพงานไม่คงที่และไม่สามารถทำงานได้นานนัก

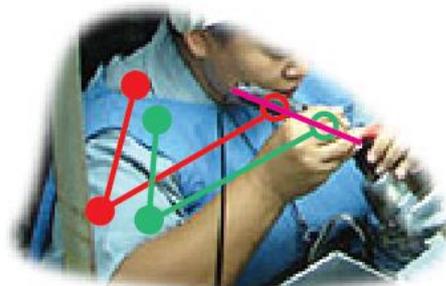
แนวคิดหุ่นยนต์แบบขนานแบบ Double Layer

จากการอบรมในหลักสูตร Jewelry Making ผู้วิจัยได้เฝ้าสังเกตการเคลื่อนที่ของช่างและศึกษาการเคลื่อนไหวของข้อแขน ท่อนแขน จึงนำมาวาดภาพ เพื่อแตกกลไกการเคลื่อนที่จนสุดท้ายจึงได้ กลไกที่ออกแบบไว้ โดยมีลำดับการพัฒนาแนวคิด ดังรูปที่ 4.6 จนถึงรูปที่ 4.9



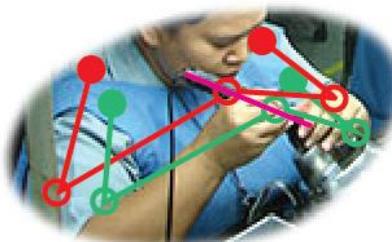
- ● = Actuator Joint
- ○ = Passive Joint
- = Link
- = Controlled Link

รูปที่ 4.6 แนวคิดแบบ Serial – Link Robot



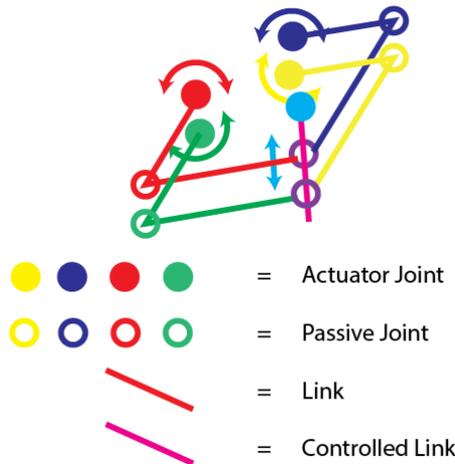
- ● = Actuator Joint
- ○ = Passive Joint
- = Link
- = Controlled Link

รูปที่ 4.7 แนวคิดแบบ Parallel – Link Robot แบบต้นกำลังอยู่ที่ต้น Link



- ● = Actuator Joint
- ○ = Passive Joint
- = Link
- = Controlled Link

รูปที่ 4.8 ทดแทนการพาดต้นกำลังไปด้วย ด้วยการแยกแขนและนำต้นกำลังไว้ที่ต้นแขน



รูปที่ 4.9 เพิ่มแกนที่ 5 แนวตั้งจนได้ ภาพ IDEA ของ หุ่นยนต์แบบขนาน แบบ Double Layer

4.2.2 วัตถุประสงค์

คือการกำหนดวัตถุประสงค์ในการสร้างเครื่องจักรกลว่าเป็นการกำหนดหน้าที่โดยรวมที่ต้องการให้เครื่องจักรนั้นทำอะไร เช่น การกำหนดว่าเครื่องจักรนั้นจะต้องขนส่งเจ้าหน้าที่ได้ สามารถยกสินค้าจาก Pallet ได้ สามารถเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามระยะที่กำหนดได้ เป็นต้น ซึ่งการให้รายละเอียดจะไม่เน้นเชิงตัวเลขและจะให้รายละเอียดในลักษณะคุณสมบัติประโยชน์ที่มีต่องานเป็นหลัก

ในกระบวนการการประกอบอัญมณีเทียมของผู้ประกอบการไทยนั้น [17] ต้องการเครื่องจักรที่มีความเร็วในการประกอบไม่สูงนัก ประกอบชิ้นงานที่น้ำหนักต่ำมาก มีความปลอดภัยสูงเนื่องจากเครื่องจักรต้องทำงานใกล้เคียงกับมนุษย์ ใช้งานง่ายช่วงเวลารอคอยต่ำ ยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงแบบในสายพานการประกอบ และ ต้นทุนระบบต่ำด้วย จากความต้องการดังกล่าว หุ่นยนต์ซึ่งได้รับการยอมรับว่าเป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการประกอบชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการผลิตที่มียอดการผลิตต่อแบบที่ไม่สูงนักและมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะงานบ่อย การใช้หุ่นยนต์ช่วยการประกอบจึงเป็นหนึ่งในวิธีที่ช่วยแก้ปัญหาข้างต้นได้เป็นอย่างดี

วัตถุประสงค์ของหุ่นยนต์แบบขนาน จะดังปรากฏในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดวัตถุประสงค์

| No. | วัตถุประสงค์ | รายละเอียด |
|-----|--|--|
| 1. | เครื่องจักรต้องมีกลไกการเคลื่อนที่แบบเข้างานได้หลายมุม | การเข้ามุมต้องเข้าทางด้านบน โดยสามารถเข้าชิ้นงานได้แบบเชิงมุมและเชิงระยะ |

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดวัตถุประสงค์ (ต่อ)

| No. | วัตถุประสงค์ | รายละเอียด |
|-----|--|---|
| 2. | มีขนาดที่สามารถเข้ากันได้กับระบบผลิตเดิม | มีขนาดประมาณระยะเอี่ยมแขนของมนุษย์ |
| 3. | ลักษณะการทำงานคล้ายมนุษย์ | การเคลื่อนที่ที่เร่งติดพลอย ต้องคล้ายกับการทำงานด้วยมือของช่างมาก่อนเพื่อให้สะดวกต่อการถ่ายทอดความรู้ของช่างเข้าสู่ผู้ควบคุมเครื่องจักร (Skill Transfer) |
| 4. | สามารถตรวจสอบชิ้นงานด้วยตาได้สะดวกขณะทำการประกอบ | หุ่นยนต์จะต้องมีที่ว่างเพื่อให้ช่างที่ชำนาญงานในการตรวจสอบสามารถมองเข้าไปขณะหุ่นยนต์ติดพลอยลงบนตัวเรือนได้สะดวก |
| 5. | รูปทรง | เล็ก น้ำหนักเบา ทรงเป็นทรงกระบอกหรือทรงลูกบาศก์ |
| 6. | ขนาดชิ้นงานที่ทำได้ | Working Area เพียงพอต่อการติดพลอยบนตัวเรือนขนาดเล็กซึ่งเป็นประเภทงานส่วนใหญ่ของการผลิต |
| 6. | ประมาณการต้นทุนผลิตไม่สูง | ราคาไม่เกิน 3-400,000 บาท |
| 7. | ตำแหน่งการยึดติดเพชร | ก่อนช่างแม่นยำ สามารถหยิบจับเพชรเทียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มม. ลงบนหลุมบนตัวเรือนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. และเมื่อรวม Tepper แล้วจะเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.8 มม. |

4.2.3 รายละเอียดของเครื่องจักร

คือการกำหนดรายละเอียดเชิงปริมาณของเครื่องจักรกลให้เป็นที่ไปตามรายละเอียดวัตถุประสงค์ให้ชัดเจน รวมถึงแสดงถึงคุณสมบัติเชิงปริมาณอื่นๆ กล่าวคือ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนของการตั้งข้อกำหนดพื้นฐานของปัญหาเชิงปริมาณ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนของการแปลงรายละเอียดของวัตถุประสงค์ให้เป็นรายละเอียดสำหรับการสร้างเครื่องจักร ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เนื่องจากถ้าผู้วิจัยไม่สามารถกำหนดข้อกำหนดได้อย่างชัดเจนเชิงปริมาณผู้วิจัยก็จะไม่สามารถสร้างเครื่องจักรได้ หรือทำการสร้างเครื่องจักรที่ยังไม่เคยมีมาก่อน การกำหนดเป้าหมายต่างๆ จะกระทำได้อย่างชัดเจนและมีโอกาสที่จะต้องปรับแก้ข้อกำหนด รวมถึงปรับแก้แนวคิดการสร้างและ หลักการที่นำมาใช้ในการออกแบบเครื่องจักรด้วย

ตารางที่ 4.4 รายละเอียดวัตถุประสงค์

| No. | รายละเอียดวัตถุประสงค์ | รายละเอียดเครื่องจักร |
|-----|--|--|
| 1. | การเข้ามุดต้องเข้าทางด้านบน โดยสามารถเข้าชิ้นงานได้แบบเชิงมุมและเชิงระยะ | 1.1 Working Space เป็นทรงกรวยโดยมีฐานกรวย เส้นผ่าศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 80 มม. สูงไม่น้อยกว่า 16 มม. 1.2 Dexter Angle 20 องศารอบแกน Z ในทุกจุด ในปริมาตร Working Space |
| 2. | มีขนาดหุ่นยนต์(โครงสร้าง) ประมาณระยะเอื้อมแขนของมนุษย์ | ขนาดหุ่นยนต์ไม่เกิน 40 cm. * 60 cm. * 80 cm. (กว้าง ยาว สูง) |
| 3. | การเคลื่อนที่ที่เร่งดีดพลอย ต้องคล้ายกับการทำงานด้วยมือของช่างดีดพลอย มาก่อน เพื่อให้สะดวกต่อการถ่ายทอดความรู้ของช่างผู้ชำนาญเข้าสู่ผู้ควบคุมเครื่องจักร | กลไกเลียนแบบแขนของมนุษย์ ทั้งระยะเอื้อมหมุนข้อมือ ข้อแขน |
| 4. | หุ่นยนต์จะต้องมีที่ว่างเพื่อให้ช่างที่ชำนาญงานในการตรวจสอบสามารถมองเข้าไปขณะหุ่นยนต์ดีดพลอยลงบนตัวเรือนได้สะดวก | โครงสร้างจะต้องไม่บังทิศทางการมองของผู้ตรวจสอบงานในด้านหน้า โครงสร้างต้องมีต้นกำลังอยู่ในฝั่งเดียวกัน |
| 5. | โครงสร้าง เล็ก น้ำหนักเบา ทรงเป็นทรงกระบอกหรือทรงลูกบาศก์ | ใช้โครงสร้างอลูมิเนียมเป็นหลัก |
| 6. | ราคาไม่เกิน 3-400,000 บาท | ใช้โครงสร้างประหยัด เช่น อลูมิเนียม และ Part มาตรฐาน |
| 7. | ค่อนข้างแม่นยำ | ค่า Error แนวแกนไม่เกิน ± 0.5 mm. |

4.2.4 หน้าที่และส่วนประกอบของโครงสร้าง

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนของการวิเคราะห์ถึงหน้าที่และส่วนประกอบโครงสร้าง

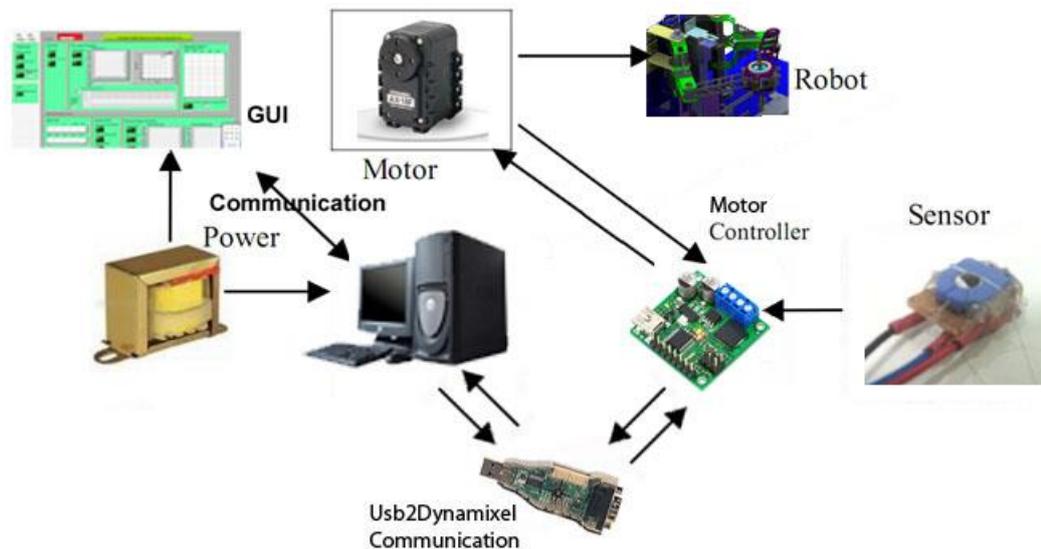
ตารางที่ 4.5 แบ่งแยกส่วนประกอบที่จำเป็นตามหน้าที่

| No. | หน้าที่ | ส่วนประกอบ |
|-----|--|--------------------|
| 1. | กลไกเคลื่อนแขนในระนาบ X,Y และ สร้างการหมุนรอบแกน X และ แกน Y | ชุด Limb แขน 4 ชุด |

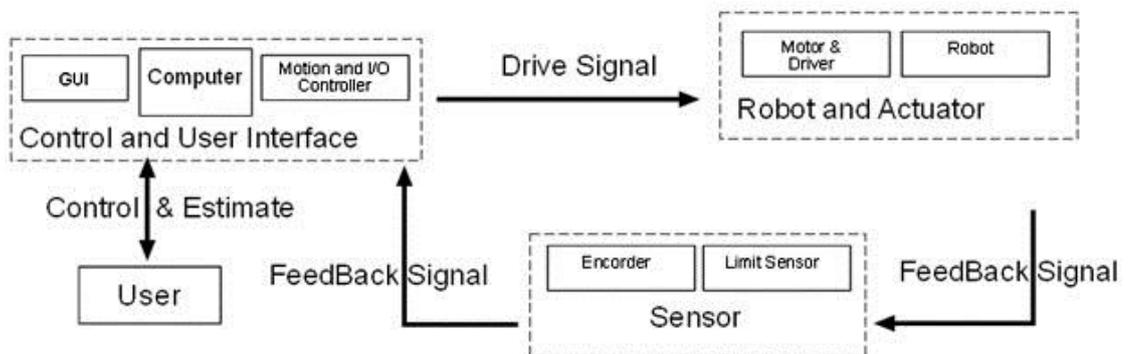
ตารางที่ 4.6 แบ่งแยกส่วนประกอบที่จำเป็นตามหน้าที่ (ต่อ)

| No. | หน้าที่ | ส่วนประกอบ |
|-----|-------------------------|---|
| 2. | เคลื่อนปลายแขนในระนาบ Z | ชุด Sling และกดไก Spring ที่ End Effector |
| 3. | อุปกรณ์ลำเลียง | Conveyor และ อุปกรณ์แยกพลอยเทียม |
| 4. | อุปกรณ์คำนวณและสื่อสาร | Computer + Serial Port Converter |
| 5. | อุปกรณ์ควบคุมการทำงาน | Motor Controller + Sensor |
| 6. | อุปกรณ์ตรวจสอบ | กล้อง WebCam |

ซึ่งจาก ตารางที่ 4.5 ได้ทำการสร้างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์และอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ระบบการทำงานของหุ่นยนต์



รูปที่ 4.11 แผนภาพระบบการทำงานของหุ่นยนต์

4.2.5 กลไกการทำงาน

หลังจากได้น้ำที่และส่วนประกอบแล้ว ส่วนหน้าที่ กลไกเคลื่อนแขนในระนาบ X,Y และ สร้างการหมุนรอบแกน X และ แกน Y จาก ตารางที่ 4.5 ถือเป็นหัวใจของการทำงานของหุ่นยนต์ ในขั้นตอนกลไกนี้จะอธิบายถึงหลักการที่ใช้ในการเคลื่อนไหวทั้งเชิงระยะ เชิงมุม และความเร็ว ซึ่งในขั้นตอนการออกแบบกลไกการทำงานนั้นจะประกอบไปด้วย

การเลือกรูปแบบ กลไก

กลไกแบบหุ่นยนต์แบบขนาน จะมีหลายแบบ ทางผู้วิจัยได้ลองเปรียบเทียบแต่ละแบบ ซึ่งการเลือกจะต้องสอดคล้องกับความต้องการของอุตสาหกรรมดังตารางที่ 4.2

ทางผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์เพิ่มเติมดังตารางที่ 4.7

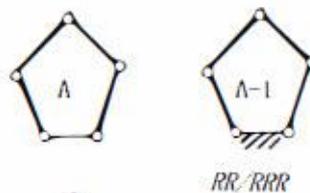
ตารางที่ 4.7 แสดงข้อได้เปรียบของหุ่นยนต์แบบขนาน ในงานประกอบเครื่องประดับเทียม

| No. | รายการ | แบบ Double Layer Twin Arm | หุ่นยนต์แบบขนาน แบบ H4 [4] |
|-----|--|--|---|
| 1. | DOF | 5 | 4 |
| 2. | ความเหมาะสมกับการประกอบเครื่องประดับเทียม | เหมาะสมมากกว่า ต้นกำลังทั้งหมดอยู่ที่ระนาบไกลจากผู้ตรวจสอบทำให้ไม่มีโครงสร้างใดบังสายตาและ คำนวณตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ง่ายกว่า | เหมาะสมน้อยกว่า โครงสร้างเป็นแบบโดม ซึ่งจะบังสายตาคนตรวจสอบและ คำนวณตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ ยาก |
| 3. | ความง่ายของการจดศาสตร์ ผกผัน | ง่ายกว่า | ยากกว่า |
| 4. | ต้นทุนและความง่ายในการสร้างโครงสร้างหุ่นยนต์ | ต้นทุนต่ำกว่า ,ใช้ มอเตอร์ Size เล็กกว่า เนื่องจากแรกที่กระทำในแกน Z สามารถใช้ Thrust-Bearing รับแรงแทนได้ | ต้นทุนสูงกว่า ,ใช้ มอเตอร์ Size ใหญ่กว่า เนื่องจากทิศทางแกนจะชี้ลงแกน Z จึงต้องใช้แรงยกแขนหุ่นยนต์มาก |
| 5. | ความต้องการของการคำนวณ | ต่ำกว่า | สูงกว่า |

ตารางที่ 4.8 แสดงจุดพึงระวังของ หุ่นยนต์รูปแบบ แบบ Double Layer Twin Arm

| No. | รายการ | Doubler Layer Twin Arm | หุ่นยนต์แบบขนาน แบบ H4 |
|-----|--------------|---|---------------------------|
| 1. | Error แนวแกน | จะมีการตกของแกนถ้าแขนยืดยาว ออกไปจากตัวหุ่นยนต์มาก | มีน้อยกว่า |
| 2. | Payload | ต่ำกว่ามาก เพราะการยึดข้อต่อ แบบ Ball Joint จะรับแรงใน แนวแกน Z ได้น้อยกว่า | Payload สูงกว่ามาก |

ซึ่งจากตารางที่ 4.7 ผู้วิจัยตัดสินใจเลือกรูปแบบกลไก Parallel แบบ Doubler Layer Twin Arm แต่แบบ Double Layer นั้นมี กลไกย่อยอีกหลายแบบ จึงต้องพิจารณาเพิ่มเติม โดยการประกอบอัญมณีเทียมนั้นมีความจำเป็นที่ ปลายแขนกลจะต้องเข้าชิ้นงาน ได้ในมุมเอียงเนื่องจากผิวที่ติดอัญมณีเทียมจะโค้งไปตามการออกแบบของนักออกแบบ จึงจำเป็นต้องออกแบบ หุ่นยนต์แบบ 5 แกน (X,Y,Z, รอบแกน x ,Pitchและรอบแกน y,Yaw) ซึ่งหลังจากศึกษางานวิจัยแล้วพบว่า PKM แบบ 5 หรือ 6 แกนนั้นจะมีสมการจลนศาสตร์ที่ยากเช่น ของ Hong-Rui [19] , Liu [20] และต้องใช้ Processing Performance ของระบบควบคุมสูงทำให้ต้นทุนในการวิจัยสร้างและพัฒนาสูงตามไป ทางผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ PKM แบบ 2-DOF translations ที่หาสมการจลนศาสตร์ ได้ง่าย มาปรับปรุงเป็นแบบ 5-DOF PKM ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงศึกษา ประเภทของ Five-Bar Mechanism [21] เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสม ซึ่งแบบ RR/RRR ดัง รูปที่ 4.12 มีความเหมาะสมเนื่องจากการสร้างหุ่นยนต์และการคำนวณทางคณิตศาสตร์นั้นมีความง่าย และ ใช้งานทรัพยากรของระบบควบคุมต่ำกว่าแบบอื่น

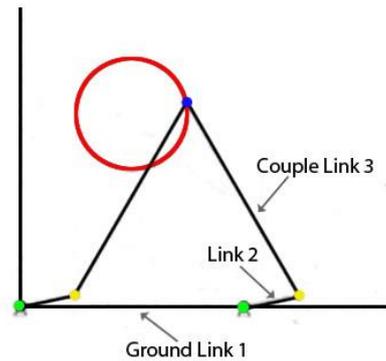


รูปที่ 4.12 ลักษณะของ โครงสร้างของ Five-Bar Mechanism แบบ RR/RRR

ที่มีความเหมาะสมต่อการออกแบบหุ่นยนต์

- การเลือก **Parameter** และ ขนาดของก้านโยง

Parameter ของกลไก RR/RRR ที่จะต้องตัดสินใจจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของ Coupler Curves ที่ต้องการ โดยจากรูปที่ 4.13



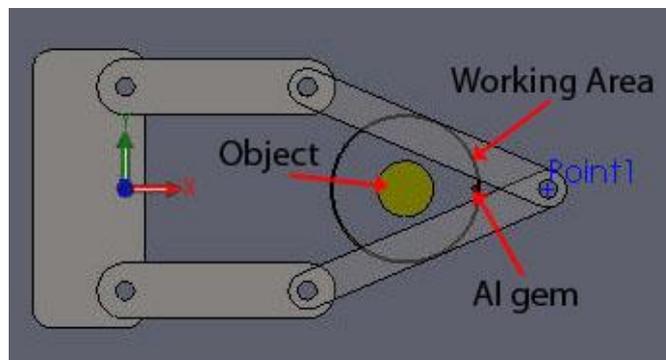
รูปที่ 4.13 Parameter ที่ใช้ออกแบบ รูปแบบโครงสร้าง RR/RRR

โดย

ค่า ALPHA = อัตราส่วนระหว่าง Coupler Link3 / Link2

BETA = อัตราส่วนระหว่าง Ground Link 1/Link 2

จาก ผู้วิจัยต้องการ Working Area ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 80 มม. และหุ่นยนต์มีความกว้างไม่เกิน 40 cm. ยาวไม่เกิน 60 cm. แล้วปลายแขนหุ่นยนต์จะต้องเคลื่อนที่ไปหยิบจับเม็ดพลอยเทียมได้ ทำให้พอจะประมาณขนาดของแขนก้านโยงได้เบื้องต้นดังรูปที่ 4.14

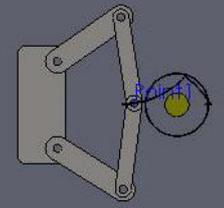
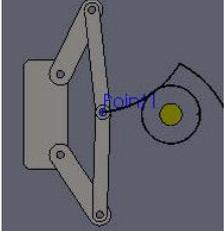
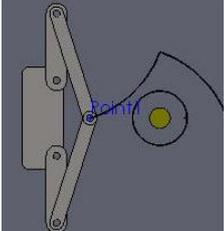


รูปที่ 4.14 ส่วนต่างๆที่ก้านโยงต้องเคลื่อนที่ไปให้ถึงให้ครอบคลุม

รูปที่ 4.14 แสดงส่วนประกอบอันได้แก่ส่วน Working Area ซึ่งจะต้องมีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 80 Cm. ซึ่งจะครอบคลุมตำแหน่งของวัตถุคิที่เป็นเม็ดพลอยเทียม (AI gem) และ ตัวเรือน (Object) จากลักษณะที่ใกล้เคียงกับเป้าหมาย จากนั้นทำการหาค่า Parameter เพิ่มเติมคือขนาดของแต่ละก้านโยง โดยให้ Fix ตัวแปลทุกตัวคงเหลือเอาไว้หนึ่งตัวแปรที่จะทำการทดสอบ เช่น Fix ระยะ Ground และ ระยะ ก้าน โยง 2,5 โดยปล่อยความยาวระยะ ก้าน โยง3,4 เพื่อใช้ทำการหาค่า Parameter ที่เหมาะสม จาก Robert L.Norton [8] และ 3.2.2 Coupler Curves การหาขนาดก้านโยงจะพิจารณาจาก Couple Curve ที่เหมาะสม

จากการทดลองกำหนดค่า Ground และ ก้านโยง 2,5 ให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดพื้นที่ทำงานและสุ่มค่า ก้านโยง 3,4 แล้วทดลองสร้าง Couple Curve ด้วยโปรแกรม SolidWork Simulation โดยมีเป้าหมายเพื่อหาความยาวของ ก้านโยง 3,4 ที่ทำให้เกิด Couple Curve ที่ครอบคลุม Working Area ในลักษณะพอดีกับ Working Area ให้มากที่สุด โดยกำหนดขนาดของ Ground = 110 mm. และขนาดของ ก้านโยง 2,5 = 97.5 mm. ซึ่งผลดังนี้

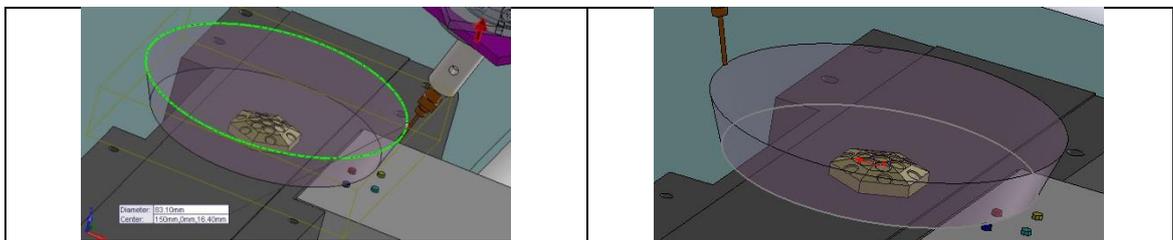
ตารางที่ 4.9 การทดลองเพื่อหา ความยาว ก้าน โยง 3,4 ที่เหมาะสม

| No. | ขนาด ก้านโยง 3,4 | รูป | ผลลัพธ์ |
|-----|------------------|--|--|
| 1 | 110 mm. |  | เส้น Coupler Curve วิ่งเข้าไปใน ส่วน Working Area ซึ่งแปลว่า ความยาว ก้าน โยง 3,4 สั้นไป |
| 2 | 135 mm. |  | เส้น Coupler Curve วิ่งเข้าพอดี ส่วน Working Area ซึ่งแปลว่า ความยาว ก้าน โยง 3,4 พอดี |
| 3 | 160 mm. |  | เส้น Coupler Curve วิ่งออกห่าง ส่วน Working Area ครอบคลุม มากเกินไป ซึ่งแปลว่าความยาว ก้าน โยง 3,4 ยาวเกินไป |

ซึ่งทางผู้วิจัยเลือก ตัวเลือกที่ 2 ที่มีแขน ก้าน โยง 3,4 ความยาว 135 mm. โดยมีค่า ALPHA = 135/97.5 = 1.384 และ BETA = 0.563

- การหาพื้นที่ทำงาน (Working Space)

การหาพื้นที่ทำงานกระทำได้โดยการ จำลองสถานการณ์ของปลายแขนหุ่นยนต์ไปรอบๆ วงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 83 มม.ซึ่งได้มาจากขั้นตอน การเลือก Parameter และ ขนาดของก้าน โยง โดยให้ทำ มุม Max (20 องศา) และมีความสูง 10 mm. ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงปริมาตร รูปทรง ของ Working Area

ปริมาตรที่ปรากฏเป็นรูปทรงทรงกระบอกซึ่งการคำนวณทำได้จากสมการ(4.1)

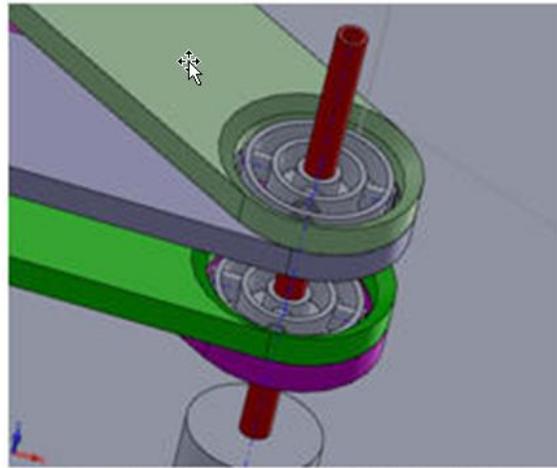
$$\pi * r^2 * high \tag{4.1}$$

ซึ่งจะได้

$$\begin{aligned} & \pi * 41.5^2 * 10 \\ & = 54,106.1 \text{ ลูกบาศก์มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

- กลไกส่วนผูกโยงแขนบนล่าง

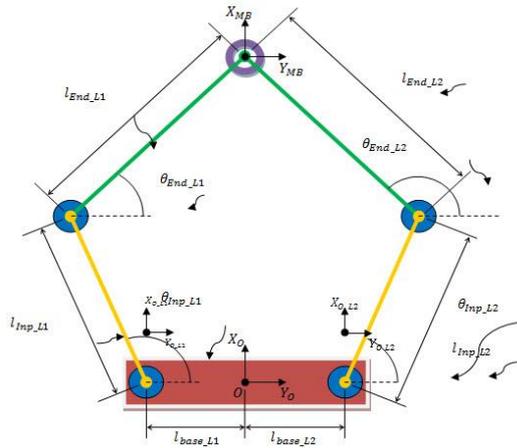
อาศัยกลไกของ Universal Joint ในการผูกโยงกลไกแขน Parallel Link บนล่างเข้าด้วยกัน เมื่อแขนบนและล่างเคลื่อนที่ต่างตำแหน่งกันจะทำให้แท่งสีแดงเกิดการเอียงตัว และการผูกโยงนี้ได้ช่วยเพิ่มมิติของ DOF จากที่แต่ละแขนทำได้ 2 DOF แบบเลื่อนแนวแกน เมื่อผูกโยงกันด้วย Universal Joint จะได้ $DOF = 4$ กล่าวคือ ได้ DOF ส่วนการหมุนรอบแกน x และ y เพิ่ม และถ้าผู้วิจัยติดตั้ง Sling ในแกนต่อ จะทำให้ผู้วิจัยสามารถ ยึดระยะในทิศทางแกน Z ได้อีกด้วยจึงเป็น 5 DOF ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ใช้กลไก Universal Joint หรือ Ball Joint

- การคำนวณหาสมการ

สำหรับการวิเคราะห์สมการ จลนศาสตร์ ที่เกี่ยวข้อง ตามลักษณะของหุ่นยนต์ตามรูปที่ 4.17 และสมการ (3.107) ซึ่งมาแบ่งพจน์ให้ได้สมการที่ (4.2)–(4.9) โดยสมการที่ (4.4) เป็นสมการหลักเพื่อหาความสัมพันธ์ขององศาต้นกำลังกับตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์



รูปที่ 4.17 การกำหนด notation ของแต่ละส่วนของหุ่นยนต์

$$a \cos(\alpha) - b \sin(\alpha) = c \tag{4.2}$$

$$a \sin(\alpha) + b \cos(\alpha) = d \tag{4.3}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{ad - bc}{ac + bd} \right] \tag{4.4}$$

โดยกำหนดให้

$$a = \left(\cos[\theta_{End_L2}] l_{End_L2} + l_{Inv_L2} \right) \tag{4.5}$$

$$b = \left(\sin[\theta_{End_L2}] l_{End_L2} \right) \tag{4.6}$$

$$c = x_{mb} \tag{4.7}$$

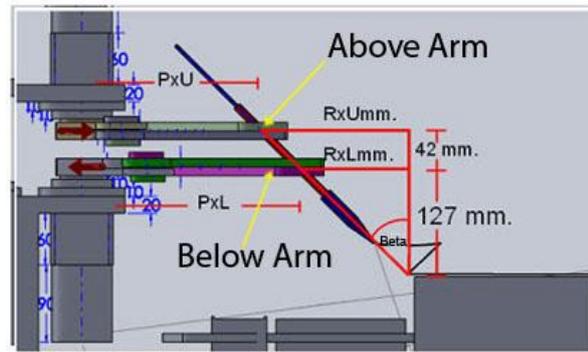
$$d = -l_{base_L2} + y_{mb} \tag{4.8}$$

$$\alpha = \theta_{Inv_L2} \tag{4.9}$$

คำนวณสมการในแบบเดียวกันกับแกนด้านขวาของหุ่นยนต์ จากนั้นจะได้สมการจลนศาสตร์ผกผันของแขนคู่ล่าง ส่วนสำหรับแขนคู่บนนั้นก็ทำในลักษณะเดียวกัน

การสร้างสมการความสัมพันธ์ของปลายแขนหุ่นยนต์ กับต้นก้านทั้งหมด

ต่อไปคือการคำนวณหาความสัมพันธ์ของแขนคู่บนและคู่ล่างเพื่อหาวิธีสร้างมุมเอียงของปลายแขนหุ่นยนต์ เพื่อให้ปลายแขนหุ่นยนต์สามารถเข้าชิ้นงานตามต้องการได้ ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ลักษณะของความสัมพันธ์ของแขนคู่บนและแขนคู่ล่างในลักษณะสามเหลี่ยมคล้าย

โดยมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$PxU = OffsetPx + RU * \cos(\alpha); \quad (4.10)$$

$$PyU = OffsetPy + RU * \sin(\alpha); \quad (4.11)$$

$$PxL = OffsetPx + RL * \cos(\alpha); \quad (4.12)$$

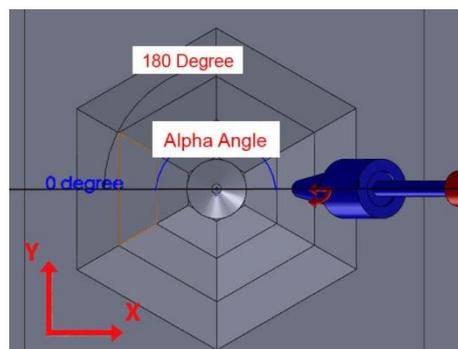
$$PyL = OffsetPy + RL * \sin(\alpha); \quad (4.13)$$

เมื่อค่า

OffsetPy, OffsetPx = ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ ที่ทราบค่าในแนว x,y

Alpha = มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ทำกับตำแหน่งชิ้นงาน โดยหมุนรอบแกน z (ตั้งฉากกับโต๊ะ) ดังรูปที่

4.19



รูปที่ 4.19 การระบุค่ามุม Alpha angle

เมื่อ

$$RU = \tan(\text{Rad}) * UH \quad (4.14)$$

$$RL = \tan(\text{Rad}) * LH \quad (4.15)$$

$$\therefore Rad = Delta * \pi / 180 \tag{4.16}$$

เมื่อค่า

RU, RL = ระยะห่างจากจุดปลายแขนหุ่นยนต์ตามแนวนอน

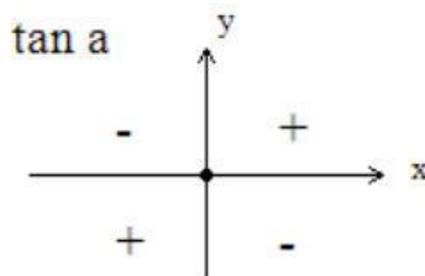
$Delta$ = องศาที่ปลายแขนหุ่นยนต์ กระทบกับชิ้นงาน (รูปที่ 4.18)

ซึ่งค่า $Beta, OffsetPx, OffsetPy, Alpha$ จะได้มาจากกระบวนการ ขบวนการประมวลผลภาพและจากการ กำหนดค่าไว้ล่วงหน้าซึ่งเก็บไว้ใน Database ของแต่ละแบบชิ้นงาน

การหาจลนศาสตร์ไปข้างหน้าของแขนกล

อาศัยการเท่ากันของค่าแห่ง x,y ของ มอเตอร์ ไปปลายแขนของด้านซ้ายของแขนซ้าย กับด้านขวาของแขนซ้ายซึ่งสามารถแก้สมการหาค่าของ $THETA_{IL}$ ได้ด้วยโปรแกรม Mathematica ดังภาคผนวก 4.1 ซึ่งจะได้คำตอบ 4 ลักษณะ ซึ่งจะทำในลักษณะเดียวกันกับแขนขวา เพราะฉะนั้นผู้วิจัยจะได้สมการจลนศาสตร์ผกผันดังนั้นเวลานำไปใช้สามารถหามุมต้นกำลัง $THETA_{IL}$ เพียงใส่ Px,Py ที่ต้องการลงไปนในสมการ เท่านั้น

จากนั้นทำการเลือกสมการจากค่าตาม Quadrant ตามภาพ รูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดง Quadrant จากสมการหาค่า tan

ซึ่งผู้วิจัยเลือกสมการที่ 3 จากภาคผนวก 4.1 เนื่องจากให้ค่า บวก ที่ Quadrant $x+, y+$ ส่วนแขนขวาผู้วิจัยทำในลักษณะเดียวกันซึ่งก็จะได้สมการจลนศาสตร์ผกผัน สำหรับ $THETA_{IR}$ ออกมาเพื่อนำไปใช้เขียนโปรแกรม

การหาสมการความเร็วของปลายแขนหุ่นยนต์ (Differential Kinematics)

ในการออกแบบหุ่นยนต์แบบขนาน สำหรับประกอบอัญมณีเทียม ส่วนความจะเน้นความเร็วรวมของหุ่นยนต์ กล่าวคือ ตัวหุ่นยนต์สามารถกำหนดความเร็วปลายแขนหุ่นยนต์ได้ ด้วยการกำหนดค่าความเร็วรวมเพียงตัวแปรเดียว แล้วจะส่งผลกับความเร็วในทุกๆส่วน จากสมการจลนศาสตร์ผกผัน

ของแขนซ้าย ดังภาคผนวก 4.1 ผู้วิจัยสามารถหาสมการ Differential Kinematics จากการหาอนุพันธ์ตามเวลาทั้งสองข้างของสมการซึ่งจะได้ ภาคผนวก 4.2

ซึ่งจะได้รูปสมการผลลัพธ์ดังสมการ (4.17)

$$D_t[\theta IL1] \rightarrow - \frac{Cos[\theta EL1 + \theta IL1]D_t[X] + D_t[Y]Sin[\theta EL1 + \theta IL1]}{L1L1(Cos[\theta EL1 + \theta IL1]Sin[\theta IL1] - Cos[\theta IL1]Sin[\theta EL1 + \theta IL1])} \quad (4.17)$$

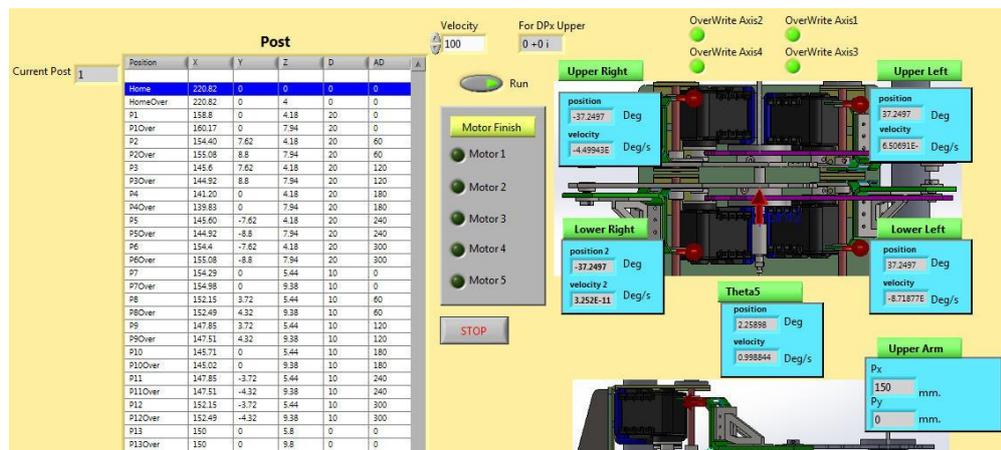
กระทำลักษณะเดียวกันกับแขนด้านขวามือ แต่เมื่อพิจารณา สมการ (4.17) จะเห็นว่า ตัวแปรอิสระประกอบไปด้วย $\theta EL1, D_t[X], D_t[Y], \theta IL1$ ซึ่ง $D_t[X], D_t[Y]$ เป็นความเร็วปลายแขนหุ่นยนต์ที่ผู้วิจัยต้องการ ส่วน $\theta IL1$ เป็นค่าองศาต้นกำลัง ณ.ขณะนั้น และ $\theta EL1$ เป็นค่าองศาจากปลายแขนกระทำกับ Base ณ.ขณะนั้นๆ ซึ่งต้องคำนวณจากสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้า อีกชั้นหนึ่ง จากนั้นนำสมการไปเขียนโปรแกรมดังรูปที่ 4.21

```

1  qEL1Rad=(-0.1EL1)*acos(0.925926E-7*Px.^(-1)*(0.469464E9+0.4E5*Px.^2+(-0.43948E7)*Py+0.;
2  qEL1=qEL1Rad*180/pi;
3  qL1Deg=qEL1Deg/pi/180;
4  qL1=qL1Deg*pi/180;
5  OmegaLeft=(-1)*L1L1.^(-1)*(cos(qEL1+qL1)*sin(qL1)+(-1)*cos(qL1)*sin(qEL1+qL1)).^(-1)*(cos(qEL1+qL1)*DPx+DPy.*sin(qEL1+qL1);
6  OmegaLeftDeg=OmegaLeft*180/pi;
    
```

รูปที่ 4.21 การเขียน โปรแกรมคำนวณความเร็วปลายแขนหุ่นยนต์

จากนั้นเขียนส่วน User Interface ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 User Interface สำหรับการทดลองความเร็วปลายแขน

ซึ่งจะทำการเก็บผลการทดลองในบทที่ 6 ต่อไป

การหาขอบเขต Singularity แบบ DKS

จากหัวข้อ 3.4.3 การวิเคราะห์ Singularity ของแขนกลแบบ 5R ข้อย่อย 2 การจะหาว่าระยะ x ใดที่ทำให้ $\det(J_x) \neq 0$ จะต้องวิเคราะห์สมการ (3.125) และ (3.129) นั่นคือ

$$J_x = \begin{bmatrix} x - a - b_2 \cos[\theta_2] & y - b_2 \sin[\theta_2] \\ x + a - b_1 \cos[\theta_1] & y - b_1 \sin[\theta_1] \end{bmatrix} \tag{4.18}$$

$$\det(J_x) = 0$$

นั่นคือ ระบบต้องทราบค่า y, θ_1, θ_2

จากนั้นทำการหาสมการค่าแกน x ที่ทำให้เมื่อ $\det(J_x) \neq 0$ ดังภาคผนวก 4.3

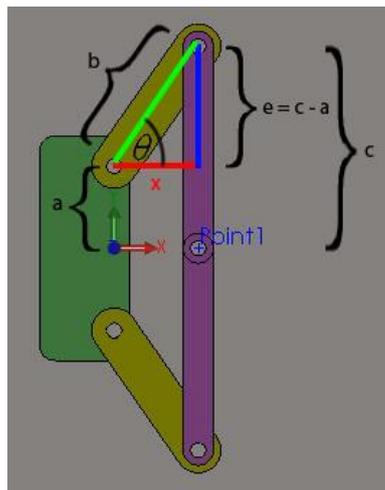
เบื้องต้นทางผู้วิจัยต้องการทราบค่า x บนแกน $y = 0$ และ มุม $\theta_2 = -1 * \theta_1$ เท่ากันเพื่อจะหาลักษณะการวางตัวของ แขนทั้งสอง เพราะฉะนั้นจึงกำหนดค่า

$$\begin{aligned} y &= 0; \\ \theta_2 &= -1 * \theta_1; \end{aligned} \tag{4.19}$$

ซึ่งจะได้ค่า $x =$

$$x = 97.5 \cos[\theta_1] \tag{4.20}$$

จากรูปที่ 3.25 ทำการกำหนดตำแหน่งต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แสดงการระบุตำแหน่งต่างๆ

เพราะฉะนั้นค่า θ จะเท่ากับ

$$\theta = \text{ArcSin}[(135 - 54.935) / 97.5] * 180 / \pi // N \tag{4.21}$$

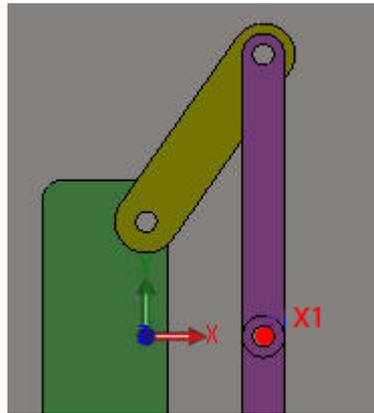
$$\theta = 55.203^\circ \quad (4.22)$$

ซึ่งค่า x จะเท่ากับ

$$x = 97.5 * \text{Cos}[\theta] \quad (4.23)$$

$$x = 55.64 \text{ มิลลิเมตร}$$

นำค่า X ไป Plot กราฟ ในตำแหน่ง $Y = 0$ จะได้



รูปที่ 4.24 ตำแหน่ง Singularity 1

แต่ในการค้นหาค่า x ต่างๆ ที่ค่า y ไม่เท่ากับ 0 นั้น จากสมการ **Error! Reference source not found.**

จะต้อง หาค่า y ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระ

ซึ่งสามารถหาค่า y ได้จากจลนศาสตร์ไปข้างหน้า ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังสมการ (4.24)

$$\begin{aligned}
y = & (0.5(1.8831410364 \times 10^{11} \sin[\theta_1] + 1.482975 \times 10^{11} \cos[\theta_1]^2 \sin[\theta_1] - 2.96595 \times 10^{11} \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] \sin[\theta_1] + 1.482975 \times 10^{11} \\
& \cos[\theta_2]^2 \sin[\theta_1] + 3.3422454 \times 10^{11} \sin[\theta_1]^2 + 1.482975 \times 10^{11} \sin[\theta_1]^3 + 1.8831410364 \times 10^{11} \sin[\theta_2] + 1.482975 \times 10^{11} \cos[\theta_1]^2 \\
& \sin[\theta_2] - 2.96595 \times 10^{11} \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] \sin[\theta_2] + 1.482975 \times 10^{11} \cos[\theta_2]^2 \sin[\theta_2] - 1.482975 \times 10^{11} \sin[\theta_1]^2 \sin[\theta_2] - \\
& 3.3422454 \times 10^{11} \sin[\theta_2]^2 - 1.482975 \times 10^{11} \sin[\theta_1] \sin[\theta_2]^2 + 1.482975 \times 10^{11} \sin[\theta_2]^3 + \sqrt{((-1.8831410364 \times 10^{11} \sin[\theta_1] - \\
& 1.482975 \times 10^{11} \cos[\theta_1]^2 \sin[\theta_1] + 2.96595 \times 10^{11} \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] \sin[\theta_1] - 1.482975 \times 10^{11} \cos[\theta_2]^2 \sin[\theta_1] - 3.3422454 \times 10^{11} \sin[\theta_1]^2 - \\
& 1.482975 \times 10^{11} \sin[\theta_1]^3 - 1.8831410364 \times 10^{11} \sin[\theta_2] - 1.482975 \times 10^{11} \cos[\theta_1]^2 \sin[\theta_2] + 2.96595 \times 10^{11} \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] \sin[\theta_2] - \\
& 1.482975 \times 10^{11} \cos[\theta_2]^2 \sin[\theta_2] + 1.482975 \times 10^{11} \sin[\theta_1]^2 \sin[\theta_2] + 3.3422454 \times 10^{11} \sin[\theta_2]^2 + 1.482975 \times 10^{11} \sin[\theta_1] \sin[\theta_2]^2 - \\
& 1.482975 \times 10^{11} \sin[\theta_2]^3)^2 - 4.(1.931426704 \times 10^9 + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_1]^2 - 3.042 \times 10^9 \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_2]^2 + \\
& 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_1] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_1]^2 - 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_2] - 3.042 \times 10^9 \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_2]^2) \\
& (-2.3130068723775 \times 10^{13} \cos[\theta_1]^2 + 3.6147515625 \times 10^{12} \cos[\theta_1]^4 + 4.626013744755 \times 10^{13} \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] - 1.445900625 \times 10^{13} \\
& \cos[\theta_1]^3 \cos[\theta_2] - 2.3130068723775 \times 10^{13} \cos[\theta_2]^2 + 2.1688509375 \times 10^{13} \cos[\theta_1]^2 \cos[\theta_2]^2 - 1.445900625 \times 10^{13} \cos[\theta_1] \cos[\theta_2]^3 + \\
& 3.6147515625 \times 10^{12} \cos[\theta_2]^4 + 8.1467231625 \times 10^{12} \cos[\theta_1]^2 \sin[\theta_1] - 1.6293446325 \times 10^{13} \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] \sin[\theta_1] + 8.1467231625 \times 10^{12} \\
& \cos[\theta_2]^2 \sin[\theta_1] + 4.590156276225 \times 10^{12} \sin[\theta_1]^2 + 7.229503125 \times 10^{12} \cos[\theta_1]^2 \sin[\theta_1]^2 - 1.445900625 \times 10^{13} \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] \sin[\theta_1]^2 \\
& + 7.229503125 \times 10^{12} \cos[\theta_2]^2 \sin[\theta_1]^2 + 8.1467231625 \times 10^{12} \sin[\theta_1]^3 + 3.6147515625 \times 10^{12} \sin[\theta_1]^4 - 8.1467231625 \times 10^{12} \cos[\theta_1]^2 \\
& \sin[\theta_2] + 1.6293446325 \times 10^{13} \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] \sin[\theta_2] - 8.1467231625 \times 10^{12} \cos[\theta_2]^2 \sin[\theta_2] + 9.18031255245 \times 10^{12} \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] + \\
& 8.1467231625 \times 10^{12} \sin[\theta_1]^2 \sin[\theta_2] + 4.590156276225 \times 10^{12} \sin[\theta_2]^2 + 7.229503125 \times 10^{12} \cos[\theta_1]^2 \sin[\theta_2]^2 - 1.445900625 \times 10^{13} \\
& \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] \sin[\theta_2]^2 + 7.229503125 \times 10^{12} \cos[\theta_2]^2 \sin[\theta_2]^2 - 8.1467231625 \times 10^{12} \sin[\theta_1] \sin[\theta_2]^2 - 7.229503125 \times 10^{12} \sin[\theta_1]^2 \\
& \sin[\theta_2]^2 - 8.1467231625 \times 10^{12} \sin[\theta_2]^3 + 3.6147515625 \times 10^{12} \sin[\theta_2]^4)) / (1.931426704 \times 10^9 + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_1]^2 - 3.042 \times 10^9 \\
& \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_2]^2 + 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_1] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_1]^2 - 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_2] - 3.042 \times 10^9 \sin[\theta_1] \\
& \sin[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_2]^2);
\end{aligned}$$

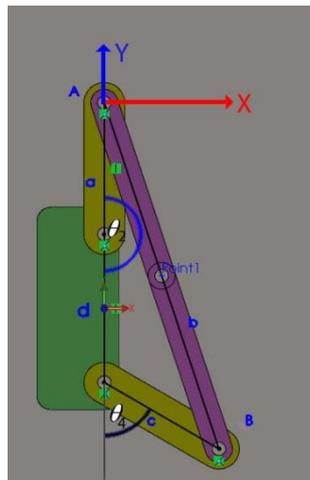
(4.24)

โดยสังเกตได้ว่าในสมการ (4.24) ค่า y จะขึ้นอยู่กับค่า θ_1, θ_2 เท่านั้น จากนั้นแทนค่า y เข้าสมการ

Error! Reference source not found. ซึ่งจะได้สมการ x ดังสมการ (4.25)

$$\begin{aligned}
x = & (-5356.1625 \sin[\theta_1] - 9506.25 \cos[\theta_2] \sin[\theta_1] - 5356.1625 \sin[\theta_2] + 9506.25 \cos[\theta_1] \sin[\theta_2] + \\
& (1.03450352834634 \times 10^{13} \sin[\theta_1]) / (1.931426704 \times 10^9 + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_1]^2 - 3.042 \times 10^9 \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_2]^2) \\
& + 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_1] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_1]^2 - 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_2] - 3.042 \times 10^9 \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_2]^2) - \\
& (9.18031255245 \times 10^{12} \cos[\theta_1] \sin[\theta_1]) / (1.931426704 \times 10^9 + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_1]^2 - 3.042 \times 10^9 \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \\
& \cos[\theta_2]^2 + 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_1] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_1]^2 - 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_2] - 3.042 \times 10^9 \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_2]^2) + \\
& (8.1467231625 \times 10^{12} \cos[\theta_1]^2 \sin[\theta_1]) / (1.931426704 \times 10^9 + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_1]^2 - 3.042 \times 10^9 \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_2]^2) \\
& + 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_1] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_1]^2 - 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_2] - 3.042 \times 10^9 \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_2]^2) - \\
& (7.229503125 \times 10^{12} \cos[\theta_1]^3 \sin[\theta_1]) / (1.931426704 \times 10^9 + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_1]^2 - 3.042 \times 10^9 \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_2]^2) \\
& + 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_1] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_1]^2 - 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_2] - 3.042 \times 10^9 \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_2]^2) + \\
& (9.18031255245 \times 10^{12} \cos[\theta_2] \sin[\theta_1]) / (1.931426704 \times 10^9 + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_1]^2 - 3.042 \times 10^9 \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_2]^2) + \\
& 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_1] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_1]^2 - 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_2] - 3.042 \times 10^9 \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_2]^2) - \\
& (1.6293446325 \times 10^{13} \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] \sin[\theta_1]) / (1.931426704 \times 10^9 + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_1]^2 - 3.042 \times 10^9 \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \\
& \cos[\theta_2]^2 + 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_1] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_1]^2 - 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_2] - 3.042 \times 10^9 \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_2]^2) + \\
& (2.1688509375 \times 10^{13} \cos[\theta_1]^2 \cos[\theta_2] \sin[\theta_1]) / (1.931426704 \times 10^9 + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_1]^2 - 3.042 \times 10^9 \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_2]^2) + \\
& 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_1] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_1]^2 - 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_2] - 3.042 \times 10^9 \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_2]^2) + \\
& (8.1467231625 \times 10^{12} \cos[\theta_2]^2 \sin[\theta_1]) / (1.931426704 \times 10^9 + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_1]^2 - 3.042 \times 10^9 \cos[\theta_1] \cos[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \cos[\theta_2]^2) + \\
& 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_1] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_1]^2 - 3.427944 \times 10^9 \sin[\theta_2] - 3.042 \times 10^9 \sin[\theta_1] \sin[\theta_2] + 1.521 \times 10^9 \sin[\theta_2]^2)
\end{aligned}
\tag{4.25}$$

ซึ่งสมการนี้ก็จะขึ้นอยู่กับตัวแปร θ_1, θ_2 เท่านั้น ในการระบุขอบจำกัดด้านซ้ายมือ ทำได้โดยการกำหนดให้ Pose ของหุ่นยนต์อยู่ชิดขอบจำกัดซ้ายของมอเตอร์ด้านซ้ายมือก่อนดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ขอบจำกัดด้านซ้าย และ ค่ากำหนดเพื่อการคำนวณ

จากรูปที่ 4.25 ลักษณะแขนจะเป็นแบบ 4 Bar Linkage ซึ่งในสมการ (4.25) ต้องการค่า θ_1, θ_2 ซึ่งผู้วิจัยเป็นคนกำหนด θ_1 แต่ค่า θ_2 จำเป็นจะต้องหา ด้วยสมการ Algebraic Position analysis of Linkages จาก Robert L. Norton [8] โดยจากรูปที่ 4.25 กำหนดค่าคงที่ได้เป็น

$$\begin{aligned}
 a &= 97.5; \\
 b &= 135 * 2; \\
 c &= 97.5; \\
 d &= 109.87;
 \end{aligned}
 \tag{4.26}$$

ระยะ Ax, Ay เป็น

$$\begin{aligned}
 Ax &= a * \text{Cos}[180 * \pi / 180]; \\
 Ay &= a * \text{Sin}[180 * \pi / 180];
 \end{aligned}
 \tag{4.27}$$

และสมการประกอบได้แก่

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{a^2 - b^2 + c^2 - d^2}{2(Ax - d)}; \\
 P &= \frac{Ay^2}{(Ax - d)^2} + 1; \\
 Q &= \frac{2Ay(d - S)}{Ax - d}; \\
 R &= (d - S)^2 - c^2; \\
 Bx &= S - \frac{2AyBy}{2(Ax - d)}; \\
 By &= \frac{-Q + \sqrt{Q^2 - 4PR}}{2P};
 \end{aligned}
 \tag{4.28}$$

สมการหา θ_4 คือ

$$\theta_4 = \text{ArcTan}\left[\frac{By}{Bx - d}\right] * 180 / \pi
 \tag{4.29}$$

หลังจากแทนค่าเข้าสมการแล้วปรากฏว่า

$$\theta_4 = 59.7168^\circ
 \tag{4.30}$$

แปลงค่า θ_4 เป็น θ_2 ได้ตั้งสมการ

$$\theta_2 = 90 - \theta_4
 \tag{4.31}$$

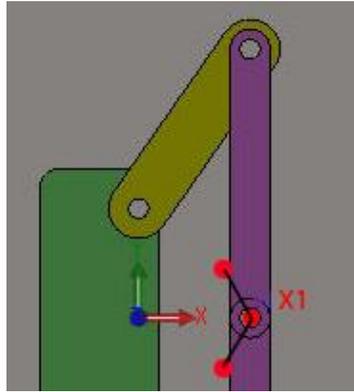
ซึ่งเมื่อได้จึงแทนค่าเข้าสมการ (4.25) ซึ่งจะได้ค่า

$$x = 42.10
 \tag{4.32}$$

และ

$$y = 24.17
 \tag{4.33}$$

นำค่า x Plot เข้ากราฟแล้วทำการวาดเส้นต่อสมมาตรดังรูปที่ 4.26

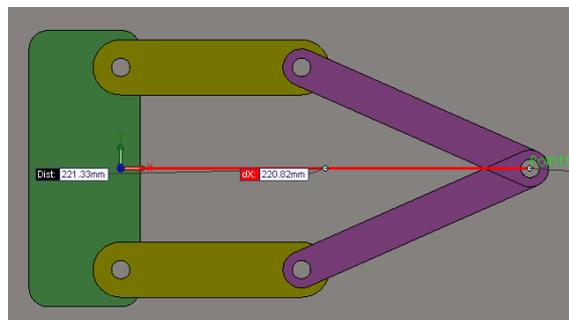


รูปที่ 4.26 Point จุด Singularity เพิ่มเติม

ซึ่งสรุปได้ว่า พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ไม่สามารถอยู่เกินเข้ามาจากระยะดังตารางที่ 4.10 ตารางที่ 4.10 ตารางระยะ Singularity ในแกน X และ Y

| No. | Singularity X (มิลลิเมตร) | Singularit Y (มิลลิเมตร) |
|-----|------------------------------|-----------------------------|
| 1. | 55.64 | 0 |
| 2. | 42.10 | 24.17 |
| 3. | 42.10 | -24.17 |

ส่วน Singularity แบบ IKS นั้น โครงสร้างหุ่นยนต์ของผู้วิจัยจะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังจุดนั้นได้ เนื่องจาก มอเตอร์ ทั้งสองข้าง ทำมุมได้สูงสุดดังรูปที่ 4.27 ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์ที่หุ่นยนต์จะต้องยึดแขนไปด้านหน้าไถลๆ สามารถออกแบบได้ง่ายจึงไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์ IKS



รูปที่ 4.27 ระยะยืดสุดแขน

ซึ่งให้ระยะในแกน X ได้เป็น 220.82 และ y = 0 ซึ่งในงานวิจัยนี้ยังไม่มียุทธศาสตร์อันใดอยู่ไถลในระยะเกือบสุดแขนนี้

การหา อินเวอร์ส จาคอบีเยน Matrix เพื่อการชดเชยค่ามุม Actuator

ใน หุ่นยนต์แบบขนานแบบ 2 ชั้น รูปสมการชั้นบนและล่างจะเหมือนกัน เพราะฉะนั้นผู้วิจัยสามารถใช้สมการเดียวกันในการหา ของแต่ละชั้นได้

โดย J^{-1} ของ Parallel Arm แต่ละคู่จะเป็น

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial \theta_L} & \frac{\partial f_x}{\partial \theta_R} \\ \frac{\partial f_y}{\partial \theta_L} & \frac{\partial f_y}{\partial \theta_R} \end{bmatrix}^{-1} \quad (4.34)$$

โดย

θ_L = มุมของมอเตอร์ด้านซ้าย

θ_R = มุมของมอเตอร์ด้านขวา

ซึ่งการหาค่า f_x และ f_y เกิดจากการแก้สมการเปรียบเทียบระหว่าง สมการเวกเตอร์กับฟังก์ชันตรีโกณมิติ ดัง สมการ(4.35)

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y - MotorSpace \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} UpperArm * Cos(\theta_{1L}) + LowerArm * Cos(\theta_{2L}) \\ UpperArm * Sin(\theta_{1L}) + LowerArm * Sin(\theta_{2L}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

ซึ่งการหา f_x เพื่อใช้ใน อินเวอร์ส จาคอบีเยน นั้น ก็คือการหาสมการที่บ่งบอกระยะของ P_x ที่อยู่ในรูปสมการที่มีตัวแปรเพียงแค่ θ_{1L} และ θ_{1R} เท่านั้น เพราะฉะนั้นต้องมีการจัดรูปสมการ โดยเริ่มจากการลดตัวแปรอิสระ θ_{2L} และ θ_{2R} ในสมการ โดยใช้คำสั่งลดรูปสมการซึ่งผู้วิจัยจะเริ่มทำในแขนซ้ายก่อนเป็นอันดับแรก ดังภาคผนวก 4.4

ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังสมการ(4.36)

$$\begin{aligned}
P_x \rightarrow & (0.5(1185800.0\text{Cos}[\text{THETA1L}] + 941192.\text{Cos}[\text{THETA1L}]^3 + 1185800.0\text{Cos}[\text{THETA1R}] - 941192.\text{Cos}[\text{THETA1L}]^2 \text{Cos}[\text{THETA1R}] - \\
& 941192.\text{Cos}[\text{THETA1L}]\text{Cos}[\text{THETA1R}]^2 + 941192.\text{Cos}[\text{THETA1R}]^3 + 2112880.0\text{Cos}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1L}] + 2112880.0\text{Cos}[\text{THETA1R}] \\
& \text{Sin}[\text{THETA1L}] + 941192.\text{Cos}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1L}]^2 + 941192.\text{Cos}[\text{THETA1R}]\text{Sin}[\text{THETA1L}]^2 - 2112880.0\text{Cos}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}] \\
& -2112880.0\text{Cos}[\text{THETA1R}]\text{Sin}[\text{THETA1R}] - 1882384.0\text{Cos}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}] - 1882384.0\text{Cos}[\text{THETA1R}]\text{Sin}[\text{THETA1L}] \\
& \text{Sin}[\text{THETA1R}] + 941192.\text{Cos}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}]^2 + 941192.\text{Cos}[\text{THETA1R}]\text{Sin}[\text{THETA1R}]^2 + \sqrt{((-1185800.0\text{Cos}[\text{THETA1L}] - \\
& 941192.\text{Cos}[\text{THETA1L}]^3 - 1185800.0\text{Cos}[\text{THETA1R}] + 941192.\text{Cos}[\text{THETA1L}]^2 \text{Cos}[\text{THETA1R}] + 941192.\text{Cos}[\text{THETA1L}]\text{Cos}[\text{THETA1R}]^2 \\
& -941192.\text{Cos}[\text{THETA1R}]^3 - 2112880.0\text{Cos}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1L}] - 2112880.0\text{Cos}[\text{THETA1R}]\text{Sin}[\text{THETA1L}] - 941192.\text{Cos}[\text{THETA1L}] \\
& \text{Sin}[\text{THETA1L}]^2 - 941192.\text{Cos}[\text{THETA1R}]\text{Sin}[\text{THETA1L}]^2 + 2112880.0\text{Cos}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}] + 2112880.0\text{Cos}[\text{THETA1R}]\text{Sin}[\text{THETA1R}] \\
& +1882384.0\text{Cos}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}] + 1882384.0\text{Cos}[\text{THETA1R}]\text{Sin}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}] - 941192.\text{Cos}[\text{THETA1L}] \\
& \text{Sin}[\text{THETA1R}]^2 - 941192.\text{Cos}[\text{THETA1R}]\text{Sin}[\text{THETA1R}]^2) - 4.(12100.+ 9604.\text{Cos}[\text{THETA1L}]^2 - 19208.\text{Cos}[\text{THETA1L}]\text{Cos}[\text{THETA1R}] + \\
& 9604.\text{Cos}[\text{THETA1R}]^2 + 21560.\text{Sin}[\text{THETA1L}] + 9604.\text{Sin}[\text{THETA1L}]^2 - 21560.\text{Sin}[\text{THETA1R}] - 19208.\text{Sin}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}] + \\
& 9604.\text{Sin}[\text{THETA1R}]^2)(-1.82289525 \times 10^8 + 5.81042 \times 10^7 \text{Cos}[\text{THETA1L}]^2 + 2.3059204 \times 10^7 \text{Cos}[\text{THETA1L}]^4 + 5.81042 \times 10^7 \text{Cos}[\text{THETA1R}]^2 \\
& -4.6118408 \times 10^7 \text{Cos}[\text{THETA1L}]^2 \text{Cos}[\text{THETA1R}]^2 + 2.3059204 \times 10^7 \text{Cos}[\text{THETA1R}]^4 - 2.5958779 \times 10^8 \text{Sin}[\text{THETA1L}] + 1.0353112 \times \\
& 10^8 \text{Cos}[\text{THETA1L}]^2 \text{Sin}[\text{THETA1L}] + 1.0353112 \times 10^8 \text{Cos}[\text{THETA1R}]^2 \text{Sin}[\text{THETA1L}] + 573839.\text{Sin}[\text{THETA1L}]^2 + 4.6118408 \times 10^7 \\
& \text{Cos}[\text{THETA1L}]^2 \text{Sin}[\text{THETA1L}]^2 + 4.6118408 \times 10^7 \text{Cos}[\text{THETA1R}]^2 \text{Sin}[\text{THETA1L}]^2 + 1.0353112 \times 10^8 \text{Sin}[\text{THETA1L}]^3 + 2.3059204 \times 10^7 \\
& \text{Sin}[\text{THETA1L}]^4 + 2.5958779 \times 10^8 \text{Sin}[\text{THETA1R}] - 1.0353112 \times 10^8 \text{Cos}[\text{THETA1L}]^3 \text{Sin}[\text{THETA1R}] - 1.0353112 \times 10^8 \text{Cos}[\text{THETA1R}]^3 \\
& \text{Sin}[\text{THETA1R}] - 1147678.0\text{Sin}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}] - 9.2236816 \times 10^7 \text{Cos}[\text{THETA1L}]^2 \text{Sin}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}] - 9.2236816 \times \\
& 10^7 \text{Cos}[\text{THETA1R}]^2 \text{Sin}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}] - 3.1059336 \times 10^8 \text{Sin}[\text{THETA1L}]^2 \text{Sin}[\text{THETA1R}] - 9.2236816 \times 10^7 \text{Sin}[\text{THETA1L}]^3 \\
& \text{Sin}[\text{THETA1R}] + 573839.\text{Sin}[\text{THETA1R}]^2 + 4.6118408 \times 10^7 \text{Cos}[\text{THETA1L}]^2 \text{Sin}[\text{THETA1R}]^2 + 4.6118408 \times 10^7 \text{Cos}[\text{THETA1R}]^2 \\
& \text{Sin}[\text{THETA1R}]^2 + 3.1059336 \times 10^8 \text{Sin}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}]^2 + 1.38355224 \times 10^8 \text{Sin}[\text{THETA1L}]^3 \text{Sin}[\text{THETA1R}]^2 - 1.0353112 \times 10^8 \\
& \text{Sin}[\text{THETA1R}]^3 - 9.2236816 \times 10^7 \text{Sin}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}]^3 + 2.3059204 \times 10^7 \text{Sin}[\text{THETA1R}]^4)) / (12100.+ 9604.\text{Cos}[\text{THETA1L}]^2 \\
& -19208.\text{Cos}[\text{THETA1L}]\text{Cos}[\text{THETA1R}] + 9604.\text{Cos}[\text{THETA1R}]^2 + 21560.\text{Sin}[\text{THETA1L}] + 9604.\text{Sin}[\text{THETA1L}]^2 - 21560.\text{Sin}[\text{THETA1R}] - \\
& 19208.\text{Sin}[\text{THETA1L}]\text{Sin}[\text{THETA1R}] + 9604.\text{Sin}[\text{THETA1R}]^2)
\end{aligned}
\tag{4.36}$$

จากนั้นกระทำแบบเดียวกันกับแกนอีกข้างซึ่งจะได้ P_y จากนั้นใช้คำสั่งหา อินเวอร์ส จาโคเบียน ดัง
ภาคผนวก 4.5

จากนั้นหา $Error\theta$

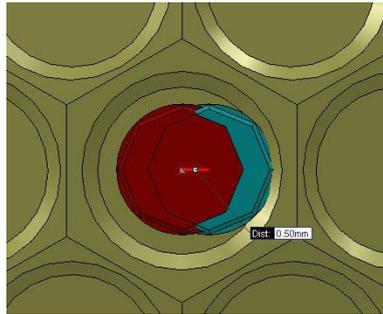
$$Error\theta = (MyInverseJacobian.ErrorX) * 180 / \pi \tag{4.37}$$

เมื่อ $ErrorX$ ที่ได้เป็นดัง (4.38)

$$ErrorX = T \arg et \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - Current \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{4.38}$$

การหาความละเอียดของต้นกำลัง (Actuator Resolution)

จากหัวข้อ 3.3.9 จาโคเบียนของแขนกลหุ่นยนต์ (Robot Manipulator Jacobian) และหัวข้อ การหา อินเวอร์ส จาโคเบียน Matrix เพื่อการชดเชยค่ามุม Actuator ซึ่งสามารถเอามาประยุกต์เพื่อหา ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการความละเอียด (Resolution) ปลายของ EFF กับความละเอียดของ มอเตอร์ ต้นกำลัง จาก ข้อย่อย 7 ที่กล่าวว่า Error แนวแกนไม่เกิน ± 0.5 mm. เมื่อทดลองวาดรูปดัง รูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ค่าความละเอียดขั้นต่ำที่ผู้วิจัยต้องการขณะ วางพลอยเทียมลงบนหลุม ± 0.5 mm.

จากรูปที่ 4.28 ตำแหน่งเป้าหมายคือตำแหน่งเม็ดพลอยสีแดง แต่ค่า Error สูงสุดที่รับได้คือค่าตำแหน่ง เม็ดพลอยสีฟ้า ซึ่งมีระยะห่างจากสีแดงคือ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งในระยะนี้เม็ดพลอยสีฟ้ายังสามารถไหล เข้าหลุมได้อยู่เนื่องจากมี Tapper ขอบด้านข้างช่วยในการลู่เข้า

ซึ่งจาก (4.38) ทำให้ได้

$$ErrorX = \begin{bmatrix} -0.5 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 150 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 150.5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

นำ $ErrorX$ แทนค่าเข้าไปยังสมการ (4.37) ซึ่งจะได้ค่า $Error\theta$ เป็น

$$Error\theta = \begin{bmatrix} 0.158 \\ -0.158 \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

ซึ่งทำให้ต้องมี มอเตอร์ ที่มีความละเอียดเชิงมุมขั้นต่ำน้อยกว่า 0.158 องศา แต่ทางปฏิบัติควรจะ ละเอียดมากกว่าค่าคำนวณ 10 เท่าเป็นอย่างต่ำ

การหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย Helix Smooth Curve

จาก (3.69) ซึ่งสามารถกำหนดสมการการเคลื่อนที่ได้ดัง (4.41)

$$\begin{aligned} x &= Hx + (l \times \text{Cos}[ct]); \\ y &= Hy + (l \times \text{Sin}[ct]); \\ z &= Hz + (h \times ct) \end{aligned} \quad (4.41)$$

โดย

H_x, H_y, H_z คือ ค่าระยะห่างในแกน x, y, z ของ Object Frame กับ Robot Frame

l คือ ค่ารัศมี

h คือค่าความสูง

c คือความเร็วเชิงมุมต่อวินาที

t คือเวลา

Frenet-Serret Formula and Frame ของหุ่นยนต์

นำสมการ(4.41) มาประกอบเป็นสมการ Vector ดัง(4.42)

$$r = \{x_r, y_r, z_r\} \quad (4.42)$$

ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็น

$$\begin{bmatrix} 2H_x + l\cos[ct] \\ 2H_y + l\sin[ct] \\ H_z - c \times h \times t \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

จากนั้นสร้างสมการ T ผ่าน

$$T = \frac{dr}{ds}; \quad (4.44)$$

โดย

$$dr = \begin{bmatrix} -cl\sin[ct] \\ cl\cos[ct] \\ ch \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

$$ds = \sqrt{r' \cdot r'} \quad (4.46)$$

ดังนั้น

$$T = \begin{bmatrix} -\frac{cl\text{Sin}[ct]}{\sqrt{c^2(h^2+l^2)}} \\ \frac{cl\text{Cos}[ct]}{\sqrt{c^2(h^2+l^2)}} \\ ch \\ \sqrt{c^2(h^2+l^2)} \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

จากนั้นสร้างสมการ N ผ่าน

$$N = \frac{dT}{\left\| \frac{dT}{ds} \right\|} \quad (4.48)$$

โดยใช้ โปรแกรม Mathematica เขียนสมการในรูป (4.49)

$$N = \frac{D[T,t]}{ds} / \text{Norm}\left[\frac{D[T,t]}{ds}\right]; \quad (4.49)$$

ได้ผลลัพธ์คือ

$$N = \begin{bmatrix} -\frac{l\text{Cos}[ct]}{(h^2+l^2)\sqrt{\text{Abs}\left[\frac{l\text{Cos}[ct]}{h^2+l^2}\right]^2 + \text{Abs}\left[\frac{l\text{Sin}[ct]}{h^2+l^2}\right]^2}} \\ \frac{l\text{Sin}[ct]}{(h^2+l^2)\sqrt{\text{Abs}\left[\frac{l\text{Cos}[ct]}{h^2+l^2}\right]^2 + \text{Abs}\left[\frac{l\text{Sin}[ct]}{h^2+l^2}\right]^2}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

จากนั้นสร้างสมการ B ผ่าน

$$B = T \times N \quad (4.51)$$

โดยใช้ โปรแกรม Mathematica เขียนสมการในรูป(4.52)

$$B = \text{Cross}[T, myN]; \quad (4.52)$$

ได้ผลลัพธ์คือ

$$B = \begin{bmatrix} \frac{hl \sqrt{\frac{c^2 (h^2 + l^2)^2 (\text{Conjugate}[h]^2 + \text{Conjugate}[l]^2)}{l(\text{Abs}[\text{Cos}[ct]]^2 + \text{Abs}[\text{Sin}[ct]]^2) \text{Conjugate}[l]}} \text{Sin}[ct]}{c(h^2 + l^2)^2} \\ \frac{hl \sqrt{\frac{c^2 (h^2 + l^2)^2 (\text{Conjugate}[h]^2 + \text{Conjugate}[l]^2)}{l(\text{Abs}[\text{Cos}[ct]]^2 + \text{Abs}[\text{Sin}[ct]]^2) \text{Conjugate}[l]}} \text{Cos}[ct]}{c(h^2 + l^2)^2} \\ \frac{l^2 \sqrt{\frac{c^2 (h^2 + l^2)^2 (\text{Conjugate}[h]^2 + \text{Conjugate}[l]^2)}{l(\text{Abs}[\text{Cos}[ct]]^2 + \text{Abs}[\text{Sin}[ct]]^2) \text{Conjugate}[l]}}}{c(h^2 + l^2)^2} \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

จากนั้นนำค่า $[T, N, B]$ (Frenet-Serret Rotational Matrix) ใส่เข้าไปใน $n A_0$ Matrix ดัง(4.54)

$$\begin{bmatrix} ux & vx & wx \\ uy & vy & wy \\ uz & vz & wz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Tx & Nx & Wx \\ Ty & Ny & Wy \\ Tz & Nz & Wz \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

จากนั้นใส่ค่า Position Vector เข้าไปในสมการ(4.54) ซึ่งจะได้ดังสมการ(4.55)

$$\begin{bmatrix} ux & vx & wx & qx \\ uy & vy & wy & qy \\ uz & vz & wz & qz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Tx & Nx & Wx & Px \\ Ty & Ny & Wy & Py \\ Tz & Nz & Wz & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

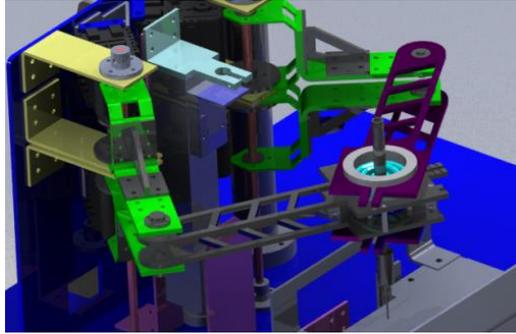
ซึ่งจะนำสมการ(4.55) ไปกำหนดค่าให้แกนหุ่นยนต์ ในขั้นตอนเขียนโปรแกรมต่อไป

4.2.6 โครงสร้าง

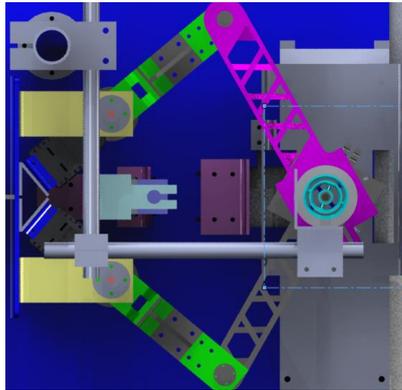
ส่วนของการออกแบบ เริ่มจากนำข้อคุณลักษณะของหุ่นยนต์ที่ทำได้จากกระบวนการที่กล่าวข้างต้น และ รูปแบบของ 2-DOF Five-Bar Mechanism แบบ RR/RRR มาผ่านกระบวนการเปรียบเทียบกับ งานวิจัยต่างๆ เช่น ของ Bruzzone[10] จนได้แนวคิดรูปแบบของหุ่นยนต์ดังแสดงในรูปที่ 4.29 โดย โครงสร้างของหุ่นยนต์ทำด้วย อลูมิเนียมและสแตนเลส เพื่อให้เกิดความเบาและแข็งแรง

แนวคิดการออกแบบ

เนื่องจากหุ่นยนต์ต้นแบบนี้เป็นกลไกที่ขยายเพิ่มเติมมาจากกลไก 5 Bar Linkage และหุ่นยนต์ Twin Arm ที่มีอยู่แล้วในท้องตลาด ทางผู้วิจัยจึงทดลองแนวคิดนี้ โดยการทดลองสร้างแบบ Prototype โดย โปรแกรม Solidwork ก่อนการผลิตจริงซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.29 และ รูปที่ 4.30

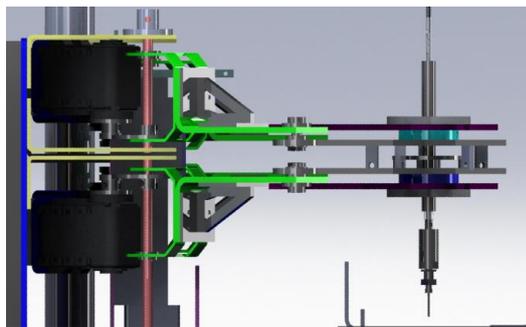


รูปที่ 4.29 ภาพ Isomatic โดยรวมของหุ่นยนต์

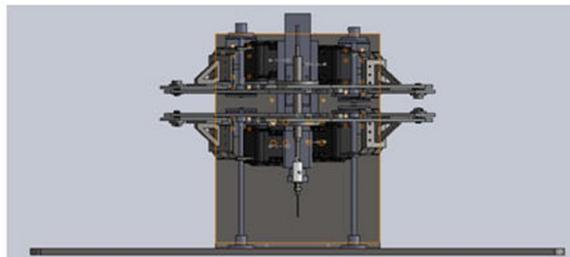


รูปที่ 4.30 ภาพ Top View โดยรวมของหุ่นยนต์

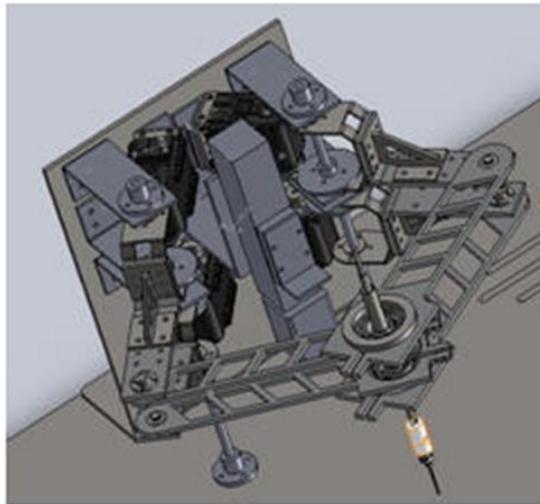
รูปที่ 4.31 รูปที่ 4.32 และ รูปที่ 4.33 ด้านล่างจะแสดงให้เห็นมุมการติด Ax-12 Motor ซึ่งจะติดเป็นมุม 50 องศา เพื่อให้ ค่าความละเอียดหลังทดเกียร์ 1:3 แล้วเพิ่มขึ้น



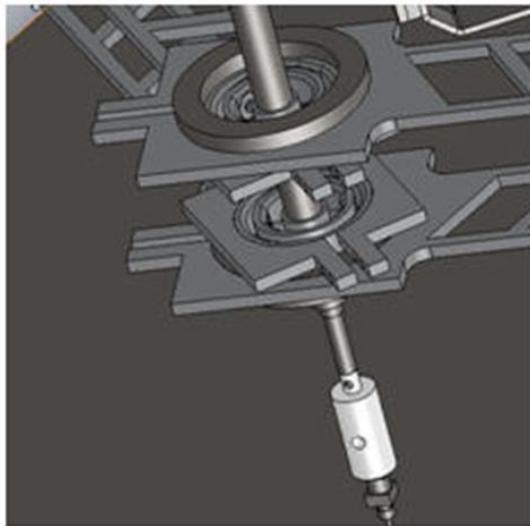
รูปที่ 4.31 ภาพ Side view โดยรวมของหุ่นยนต์



รูปที่ 4.32 Front view โดยรวมของหุ่นยนต์

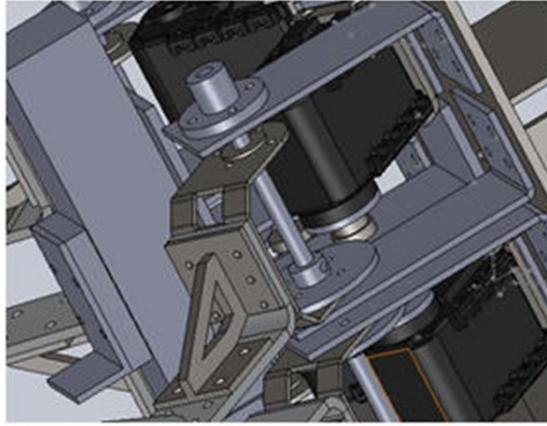


รูปที่ 4.33 แสดงภาพ Isometric View โดยรวมของหุ่นยนต์



รูปที่ 4.34 แสดงภาพ Close Up View ตรงบริเวณข้อต่อปลายแขนหุ่นยนต์

รูปที่ 4.34 แสดงให้เห็นลักษณะของ U-Joint ที่ยึดปลายแขนหุ่นยนต์ แล้วยึดติดกับท่อ (Tube) เพื่อให้เห็นลักษณะการวางตัวของ Tube เมื่อมอเตอร์ ที่ควบคุมแขนเปลี่ยนตำแหน่งไป



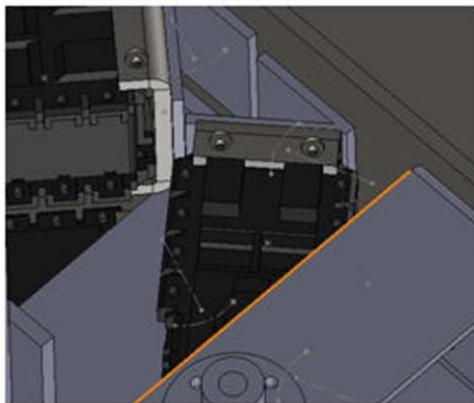
รูปที่ 4.35 แสดงส่วน Close Up View ตรงบริเวณข้อการทดเกียร์ของหุ่นยนต์

รูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นลักษณะของการทดเกียร์แบบ 3:1 ทำให้มุม Input จาก Range 300 องศาที่ความละเอียด 0.35 องศาต่อ Step จะกลายเป็น Range 100 องศาที่ 0.1166 องศาต่อ Step ซึ่งจะละเอียดขึ้น 3 เท่า แม้ Working Area จะลดลง 3 เท่าแต่ก็เพียงพอที่จะทำงาน ดังสมการ

อัตราทดของเกียร์ = จำนวนฟันของเฟืองตาม/จำนวนฟันของเฟืองขับ = ความละเอียดเฟืองขับ/ความละเอียดเฟืองตาม

$$\frac{3}{1} = \frac{0.35}{0.1166} \quad (4.56)$$

ซึ่งจาก (4.40) ที่แสดงค่าความละเอียดมอเตอร์ขั้นต่ำที่ 0.158 องศา แต่จากการทดเกียร์ทำให้ได้ความละเอียดที่ต่ำกว่าคือ 0.1166 องศาต่อ Step ดังนั้น มอเตอร์ และการทดเกียร์นี้จึงเพียงพอต่อการใช้งาน สร้างต้นแบบหุ่นยนต์แต่ทางปฏิบัติ มอเตอร์ ควรจะละเอียดมากกว่าค่าคำนวณ 10 เท่าเป็นอย่างต่ำ

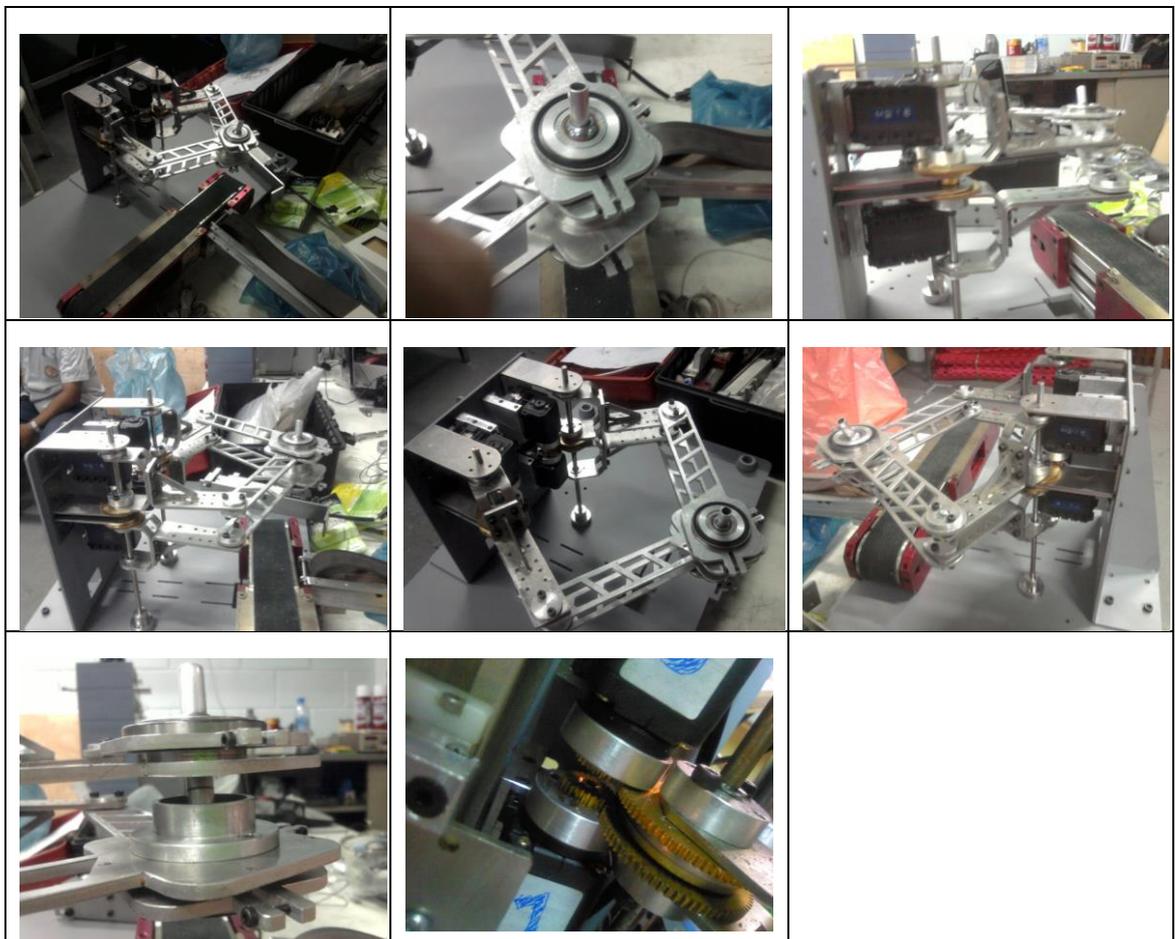


รูปที่ 4.36 แสดง Close Up view ตรงบริเวณการติด มอเตอร์ ของหุ่นยนต์

รูปที่ 4.36 แสดงให้เห็นการวางตัวของ มอเตอร์ ที่ 50 องศา ซึ่งทำเพราะหลังจากการทดเกียร์ลง 3 เท่า แล้ว Swing Range จะเป็นทิศ CCW 50 องศาและ CW 50 องศา เพื่อให้ได้ Working Area ที่เป็นรูป ปีกผีเสื้อสมมาตรจึงต้องมีการจัดมุมติด มอเตอร์

ชิ้นส่วนและวัสดุที่ใช้ในการผลิตโครงสร้างหลัก

โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นอลูมิเนียมแผ่นเบอร์ 5053 เพื่อให้มีน้ำหนักเบาและง่ายต่อการผลิตแต่มีความ แข็งที่ผิว โดย ราคากลาง มีผิวเรียบ และสามารถนำไป Finishing ผิวเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและทน ต่อการเสียดสีได้ ยึดติดกันด้วยวิธีการร่อนเนื้อ ดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 ภาพของหุ่นยนต์ รูปที่ 2, 7 ส่วนปลายข้อ รูปที่ 3,4 การยึดติดมอเตอร์ รูปที่ 8 การทดเฟือง

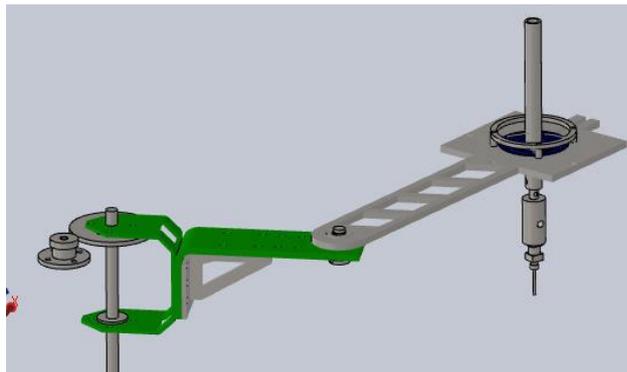
การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างและหา Torque ของต้นกำลัง

โหลดหรือภาระของหุ่นยนต์ที่จะต้องรับภาระจะมีเฉพาะส่วน โครงสร้างของตนเอง เนื่องจาก Load จากชิ้นงานจะมีน้อยมาก จนสามารถละไว้ในที่คำนวณได้ แต่ความแข็งแรงของโครงสร้างกับมี

ความสำคัญดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้คำนวณ FEA และ Applied Torque ของแขนหุ่นยนต์ด้วย Solid Work Simulation 2010

โดยมีเป้าหมาย ประเมินหา Stress และ การ Deform ของแขนกล และ ตรวจสอบหาจุดเสี่ยงต่างๆของ แขนกล โดยได้กำหนดชนิดของวัสดุเป็นอลูมิเนียมดังตารางที่ 7.1

โดยดึงเฉพาะส่วนแขนต้นและแขนปลายมาทำการวิเคราะห์ Finite Element แบบ Static ดังรูปที่ 4.38 และ รูปที่ 4.39



รูปที่ 4.38 รูปแบบโครงสร้างแขนกลใน SolidWork

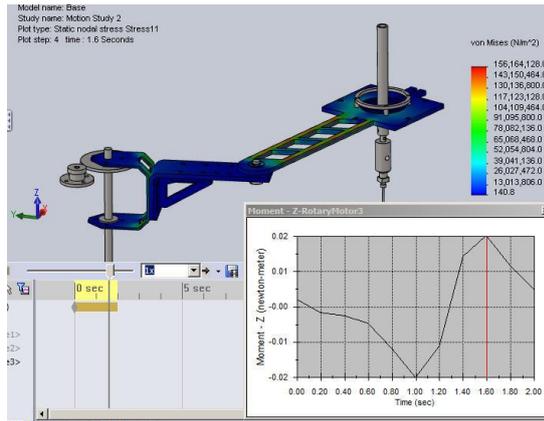


รูปที่ 4.39 mesh assembly แบบ หยาบๆ

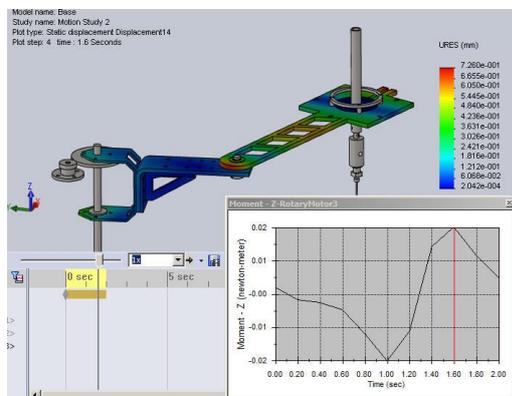
ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็นดัง ตารางที่ 4.11 และ รูปที่ 4.40 รูปที่ 4.41

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ Finite Element

| No. | ประเภท | ผลลัพธ์ |
|-----|---------------------|------------|
| 1. | Max Von MisesStrees | 1.5e+08 |
| 2. | Max Deform | -0.726 mm. |

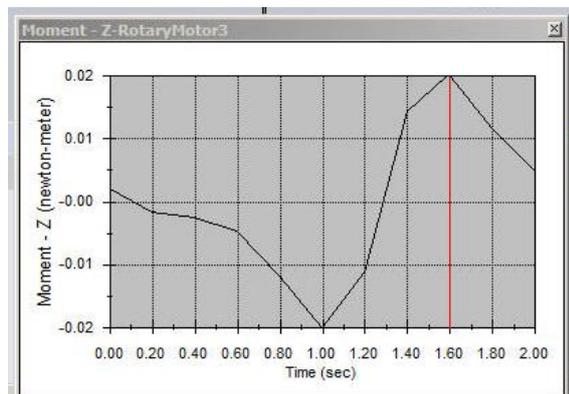


รูปที่ 4.40 Max Von MisesStress =1.5e+08



รูปที่ 4.41 Max Deform = -7.26e-01 = -0.726 mm.

จากผล Finite Element สรุปได้ว่าผลการทดลองสอดคล้องไปกับความรู้ที่ว่า Stress จะเกิดขึ้นสูงสุดที่จุดหมุน (Cantilever beam) และ การ deform แบบ displacement จะเกิดขึ้นสูงสุดที่จุดที่ใช้งาน โดย Take แรงโดยไม่มีฐานรองรับค้ำถ่วงนั่นเอง



รูปที่ 4.42 Applied Torque ที่เกิดจาก มอเตอร์ ซึ่ง Max Torque = .02 NM.

ซึ่ง มอเตอร์ ที่ผู้วิจัยใช้มีค่า Holding Torque 15 kgf-cm หรือ $15 * 9.87 / 100 = 1.48$ NM ซึ่งมากเพียงพอที่จะใช้งาน

บทที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์การออกแบบโปรแกรม

5.1 บทนำ

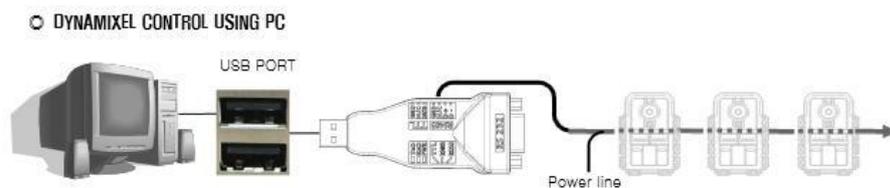
นอกจากส่วนประกอบและโครงสร้างทางกลของแขนหุ่นยนต์แล้วอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆซึ่งได้แก่ บอร์ดรับส่งข้อมูล USB2Dynamixel และ มอเตอร์ ทำงานร่วมกันกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เช่น โปเทนทิโอมิเตอร์ (Potentiometer) และ เอ็นโคดเดอร์ (Encoder) สำหรับวัดมุมหมุนของมอเตอร์ โดยทำงานร่วมกับโปรแกรม Labview รับส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ทอนุกรม (Serial Port)

5.2 อุปกรณ์รับส่งข้อมูล

อุปกรณ์รับส่งข้อมูล USB2Dynamixel มีลักษณะดังรูปที่ 5.1 เป็นอุปกรณ์ที่สามารถติดต่อกับโปรแกรม Labview ในคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ทอนุกรม ซึ่งการใช้งานก็เพียงแค่ส่ง BitTrain เลขฐาน 2 ไปยัง USB2Dynamixel ในรูปแบบโดยเฉพาะของอุปกรณ์ โดยบอร์ดนี้ทำหน้าที่หลักในการส่งสัญญาณควบคุมมอเตอร์ Dynamixel ได้ทั้งหมด 4 ตัว



รูปที่ 5.1 บอร์ด USB2Dynamixel



รูปที่ 5.2 การเชื่อมต่อ USB2Dynamixel กับคอมพิวเตอร์

5.3 มอเตอร์ Servo (Robotis AX-12)

เซอร์โวมอเตอร์ Robotis AX-12 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีข้อดี คือ เป็นเซอร์โวมอเตอร์ที่มีขนาดเล็ก ให้แรงบิดที่สูง ความละเอียดของตำแหน่งมอเตอร์เท่ากับ 10 บิต (0-1023) หมุนได้อยู่ในช่วง 0-300 องศา และภายในตัวมอเตอร์นั้นมีเซ็นเซอร์ที่ทำหน้าที่ป้องกันการเสียหายของมอเตอร์ เนื่องจากมีความร้อนหรือรับภาระมากเกินไป รูปแบบและข้อมูลของเซอร์โวมอเตอร์นั้นแสดงดังรูปที่ 5.3



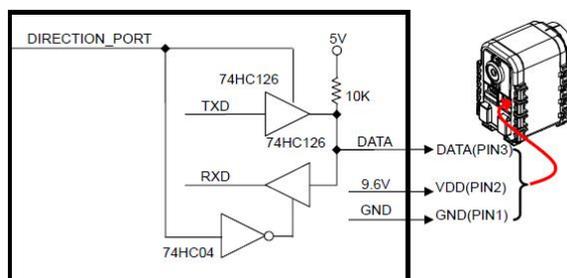
| | | |
|----------------------------------|-------|---------|
| | AX-12 | |
| Weight(g) | 55 | |
| Gear Reduction Ratio | 1/254 | |
| Input Voltage(V) | at 7V | at 10 V |
| Final Max Holding Torque(kgf.cm) | 12 | 16.5 |
| Sec/60degree | 0.269 | 0.196 |

รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะและข้อมูลของเซอร์โวมอเตอร์

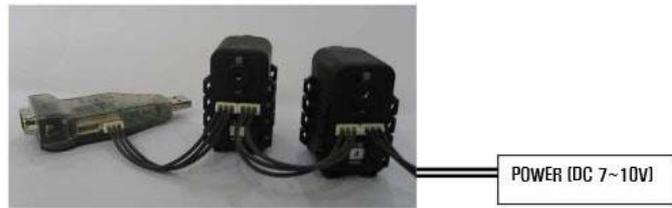
ในส่วนของระบบควบคุมนั้นเป็นแบบ Close Loop และส่งข้อมูลควบคุมมอเตอร์ไปยังทางพอร์ต RS232 แล้วส่งต่อไปยังมอเตอร์ทุกตัว ซึ่งมอเตอร์ทุกตัวนั้นต่ออนุกรมถึงกันหมด การส่งข้อมูลสามารถตรวจสอบจากเบอร์หมายเลขของมอเตอร์ และตัวแปรที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ แต่ละตัวรวมประกอบไปด้วย หมายเลขของมอเตอร์ ค่ามุมของมอเตอร์

5.4 อุปกรณ์ต่างๆ การปรับปรุงอุปกรณ์ควบคุม และการเชื่อมต่ออุปกรณ์

จากตารางที่ 4.5 ข้อ 1. หน้าทีกลไกเคลื่อนแขนจะใช้อุปกรณ์ USB2Dynamixel ต่อรวมกับแหล่งจ่ายไฟและมอเตอร์ดังรูปที่ 5.5 และวงจรดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 วงจรการเชื่อมต่อมอเตอร์



รูปที่ 5.5 การเชื่อมต่อมอเตอร์หลายๆตัวด้วย USE2Dynamixel ตัวเดียว



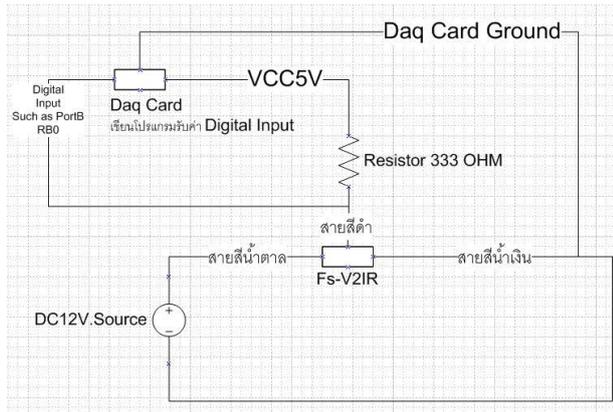
รูปที่ 5.6 เป็นการออกแบบการ Wire สายสัญญาณเข้ากับ MyDAQ Card ของ NI

ซึ่งต้องใช้ 2 ตัวเนื่องจาก จำนวน Port ไม่พอและรุ่นนี้จะจำกัด ประเภทของ Port ว่าจะให้เป็น Output Signal Port หรือ Input Signal Port

การเชื่อมต่อ FS-V21 ดังรูปที่ 5.7 กับ Card Daq เพื่อดึงสัญญาณเข้า Computer เป็นดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 ตัว Sensor แสงตรวจสอบระยะ FS-V21



รูปที่ 5.8 ไดอะแกรม แสดงการต่อวงจร ระหว่างการ์ด Daq และ FS-V21



รูปที่ 5.9 การออกแบบบอร์ดไขปลาทู เพื่อจะ Wire สายของ Fiber Optic ให้รวมกลุ่มกัน

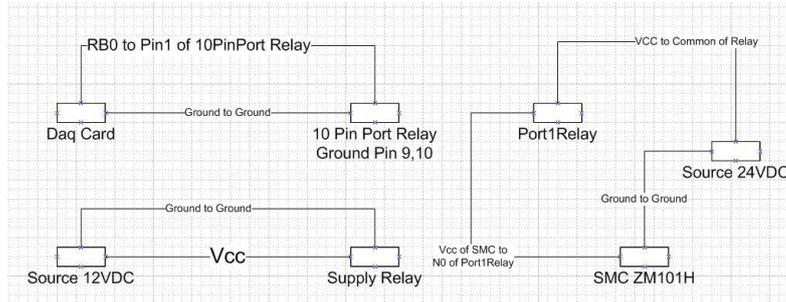
การต่อ SMC ZM101H 24VDC ดังรูปที่ 5.10 โดยขับด้วย RELAY ETT-REL8 12V รูปที่ 5.11 กับ Card Daq เพื่อควบคุมเฟรชเทียม ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.10 SMC ZM101H 24VDC อุปกรณ์สร้างลมดูด



รูปที่ 5.11 RELAY ETT-REL8 12V อุปกรณ์ Trig สวิตซ์ SMC ZM101H



รูปที่ 5.12 แผนภาพการต่อวงจร เพื่อดูเพชรเทียม



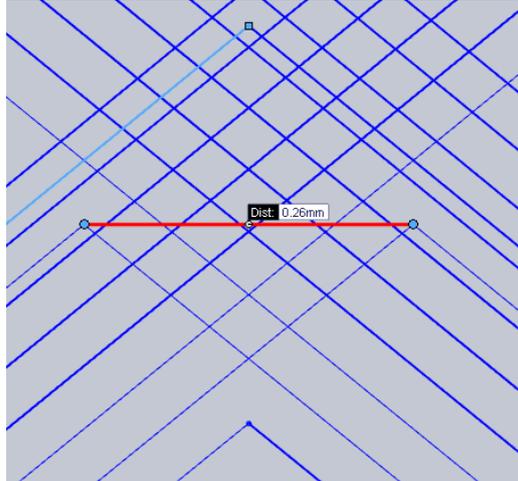
รูปที่ 5.13 กล้อง WebCam สำหรับตรวจสอบตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ต่อตรงทาง Port USB



รูปที่ 5.14 การออกแบบตำแหน่งการยึดสายอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับ Relay

ปรับปรุงทางอุปกรณ์ควบคุม

โดยการแทนที่ บอร์ด Motor Control (Omega) ที่อยู่ใน Ax-12 Servo ด้วย Board Polulu และติดตั้ง Potentiometer ภายนอกเพื่อเพิ่มความแม่นยำโดยการเพิ่มความละเอียดของการเคลื่อนที่ขนาดของ Position Error สูงสุดของปลาย End Effector จะ $< 1/2 * Resolution$ เพราะฉะนั้นถ้ายังมี ค่าความละเอียดที่เล็กลง ย่อมส่งผลทำให้ Position Error ลดลง ซึ่งทำให้ความแม่นยำเพิ่มขึ้นโดยตรง โดยคุณลักษณะของมอเตอร์ Ax-12 มี ค่าความละเอียดที่ 0.35 องศาต่อ Step โดยมี Limit อยู่ที่ 0-300 องศา โดยเมื่อทำการทดเฟืองในอัตรา 1:3 ทำให้องศาที่ต่อกับ ก้าน โยง มีความละเอียดมากขึ้นเป็น 0.116 องศาต่อ Step โดยมี Limit อยู่ที่ 0-100 องศา



รูปที่ 5.15 ค่าความละเอียดที่ปลาย End Effector เมื่อใช้ Ax-12 อยู่ที่ 0.26 mm.



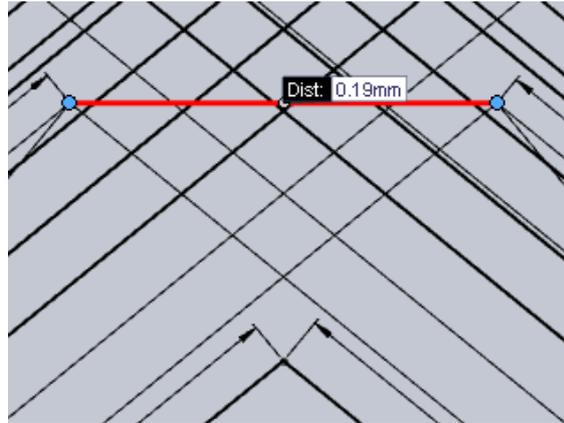
รูปที่ 5.16 บอร์ด Motor Control ให้เป็น บอร์ด Polulu รุ่น Jrk 21v3



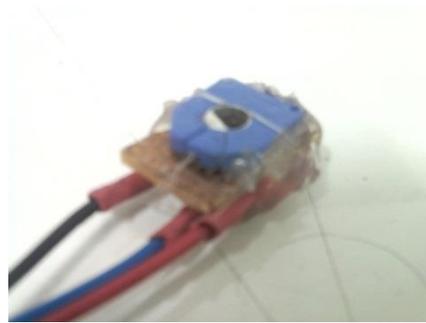
รูปที่ 5.17 การติดตั้งบอร์ด Polulu ลงบนกล่อง Control



รูปที่ 5.18 การปรับปรุงมอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์ถูกควบคุมด้วยบอร์ด Polulu



รูปที่ 5.19 ค่าความละเอียดที่ปลาย End Effector เมื่อใช้ Board Polulu อยู่ที่ 0.19 mm.



รูปที่ 5.20 การเชื่อมต่อ Potentiometer



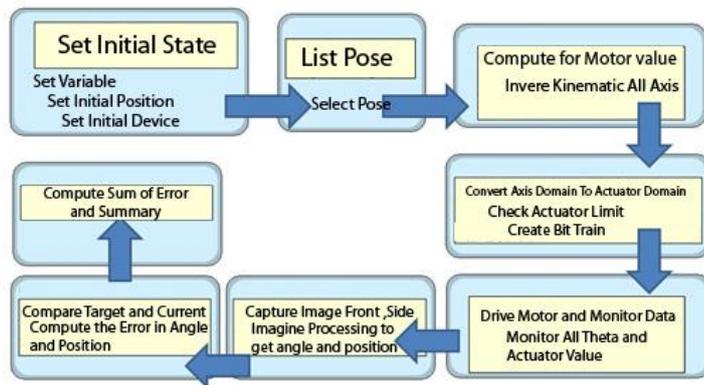
รูปที่ 5.21 การติดตั้ง Potentiometer ภายนอกมอเตอร์ตรงบริเวณเพลาส่งกำลัง

5.5 การออกแบบโปรแกรม

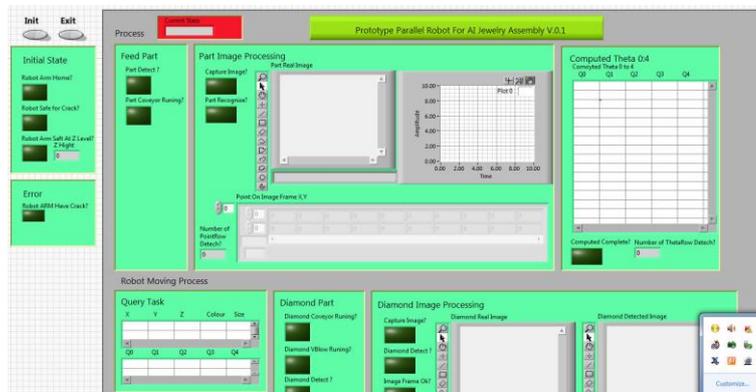
ทางผู้วิจัยพัฒนาด้วยโปรแกรมภาษา Graphic Programming ชื่อว่า Labview โดยใช้ Module เพิ่มเติม คือ State Chare, Vision Assistance, Softmotion และ MathScript โดยมุ่งเน้นให้คอมพิวเตอร์มีความสามารถปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้

โครงสร้างโปรแกรม

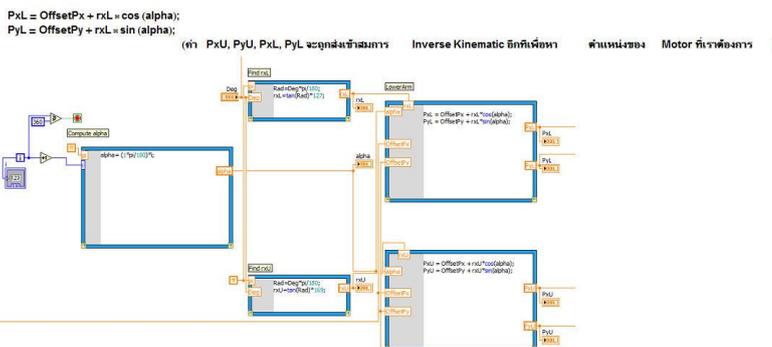
ทำการออกแบบโปรแกรมดัง State Chart ดังรูปที่ 5.22 โดยออกแบบ User Interface ดังรูปที่ 5.23 โดยโปรแกรมทำหน้าที่สั่งการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ โดยมี User Interface ดังรูปที่ 5.24 พร้อมกับมีโปรแกรมย่อยทำการถ่ายภาพและแสดงภาพจากกล้อง 2 ตัวที่วางตัวอยู่ในระนาบ x และระนาบ y พร้อมนำภาพเข้าสู่กระบวนการ ขบวนการประมวลผลภาพเพื่อหาค่าการเองตัวของปลายแขนหุ่นยนต์ และนำมาคำนวณเพื่อระบุค่า Error ต่อไป



รูปที่ 5.22 State Chart Diagram ขั้นตอนการทำงานของ โปรแกรม

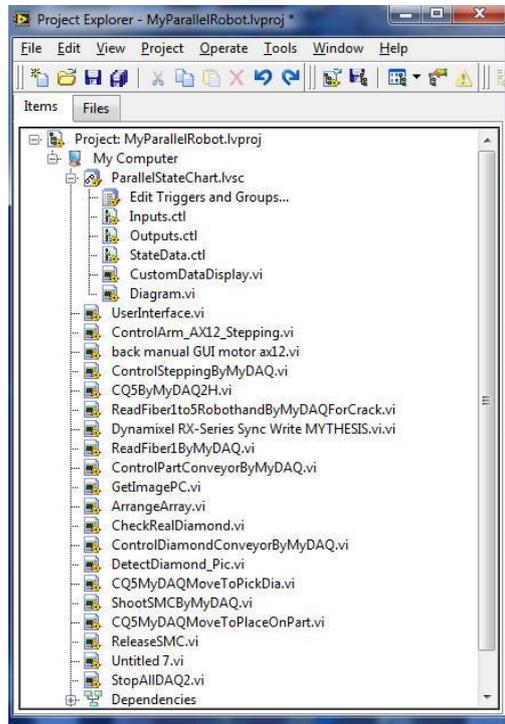


รูปที่ 5.23 User Interface ของโปรแกรมตรวจสอบปลายแขนกล



รูปที่ 5.24 ส่วน User Interface ของการเขียนคำสั่ง

โดยพัฒนา Module ย่อยๆ ตาม Function ที่เขียนไว้ใน State Chart Diagram ดังรูปที่ 5.25



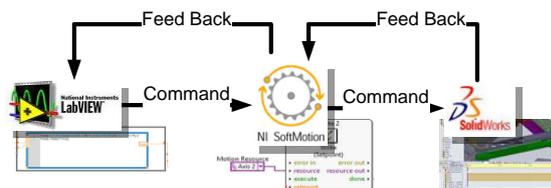
รูปที่ 5.25 โปรแกรมย่อยต่างๆ

เช่น Convert to Actuator Domain ,ControlArm_AX12_Stepping, GetImagePC และอื่นๆ

5.5.1 การเขียนโปรแกรมควบคุม

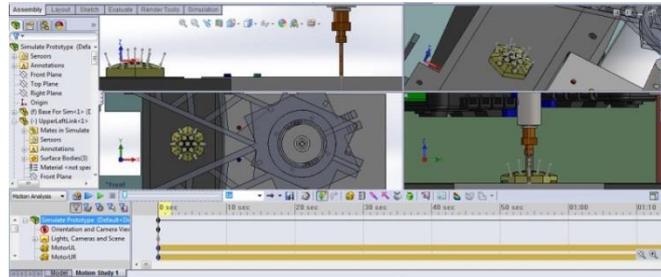
โปรแกรมเพื่อการตรวจสอบแบบจำลองทางจลนศาสตร์ และแบบจำลองความเร็ว

การนำสมการจลนศาสตร์ ของหุ่นยนต์ ที่คำนวณได้มาเขียนโปรแกรมด้วย Labview เพื่อสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองการทำงานของหุ่นยนต์นั้น ระบบต้องเชื่อมโยงการทำงานของส่วน Programming เข้ากับส่วน Robot Structure Modeling โดยผ่านโปรแกรมเชื่อมโยงซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้โปรแกรม Softmotion ซึ่งเป็น โมดูลหนึ่งของ Labview และ โปรแกรม SolidWorks ซึ่งมีการเชื่อมโยงแบบ Close Loop ดังแสดงใน รูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 Diagram การทำงานเชื่อมกันของ Labview -> Softmotion -> SolidWorks

ในการวิเคราะห์แบบจำลองนี้ ต้องใช้ SolidWorks Version 2010 ที่มีโมดูลTimeBaseEvent เพื่อให้
เกิดความสามารถในการ จำลอง โครงสร้างเครื่องจักรได้[23] ดังรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.27 โปรแกรม SolidWork ที่ใช้โมดูล TimeBaseEvent

- การเขียนโปรแกรมเพื่อการตรวจสอบจลนศาสตร์

ทำการออกแบบ ส่วนปฏิสัมพันธ์และ เขียนคำสั่งเพื่อรับค่าตำแหน่งเป้าหมาย x,y,z,Delta,Alpha และ
นำค่าเข้าสมการจลนศาสตร์ผกผัน ดังมีส่วนปฏิสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.28และมีการเขียนคำสั่งดังรูปที่ 5.29
โดยจากรูปที่ 5.29 Input ด้านซ้ายของ Math Script ประกอบด้วย

Px = ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ในทิศ X ที่ต้องการ หน่วยเป็น มิลลิเมตร

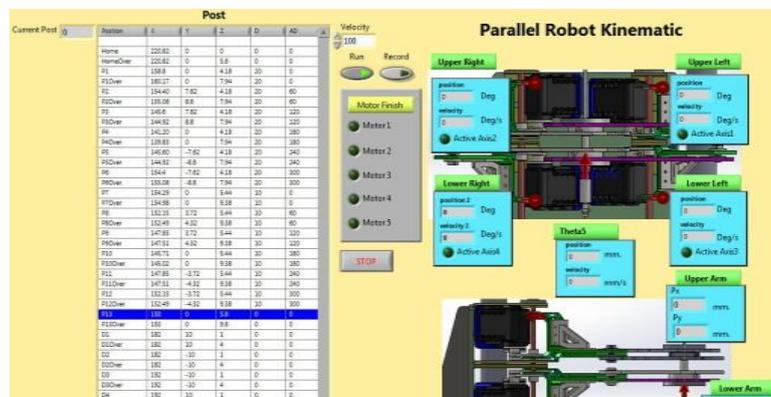
Py = ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ในทิศ Y ที่ต้องการ หน่วยเป็น มิลลิเมตร

Pi = ค่า π

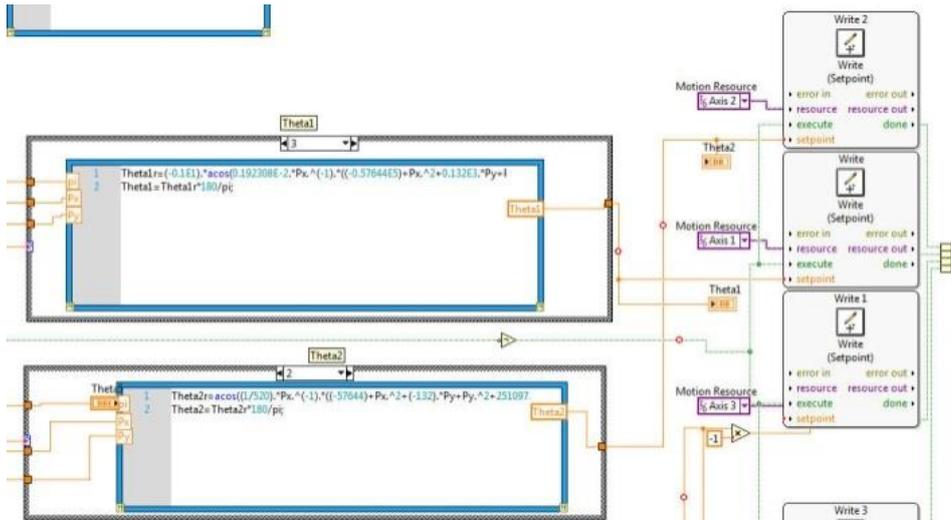
โดย Output ด้านขวาของ Math Script ประกอบด้วย

Theta1 = ค่ามุมต้นกำลังที่ได้จากสมการ จลนศาสตร์ผกผัน สำหรับต้นกำลังด้านซ้ายหน่วย
เป็นองศา

Theta2 = ค่ามุมต้นกำลังที่ได้จากสมการ จลนศาสตร์ผกผัน สำหรับต้นกำลังด้านขวาหน่วย
เป็นองศา



รูปที่ 5.28 เขียนส่วนปฏิสัมพันธ์เพื่อระบุตำแหน่งการเคลื่อนที่ แล้วส่งงานหุ่นยนต์



รูปที่ 5.29 เขียนชุดคำสั่ง จลนศาสตร์ผกผัน ควบคุมแขนหุ่นยนต์

- การเขียนโปรแกรมเพื่อการควบคุมความเร็ว

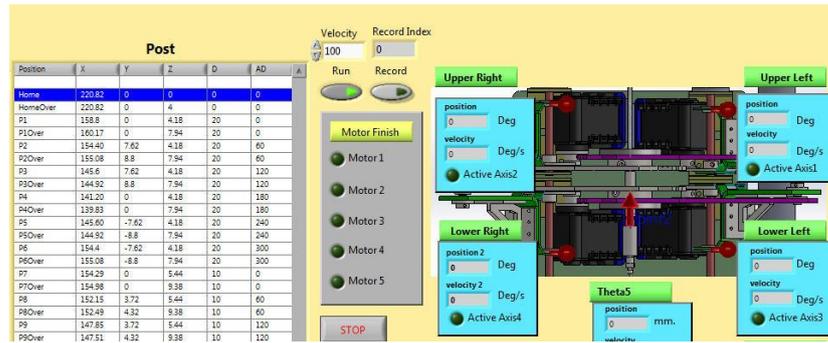
จากสมการ (3.124) ซึ่งผู้วิจัยได้สมการหาค่า $Dq[\theta IL1]$ และ $Dq[\theta IR1]$ ให้ทำการแปลงสมการ แล้วเขียน คำสั่งฝังใน โปรแกรมดัง รูปที่ 5.31 และสร้างหน้าจอส่วนติดต่อผู้ใช้เพื่อรับค่า Input เป็น Velocity ดังรูปที่ 5.30

โดยรูปที่ 5.31 จาก Input ด้านซ้ายของ Math Script ประกอบด้วย

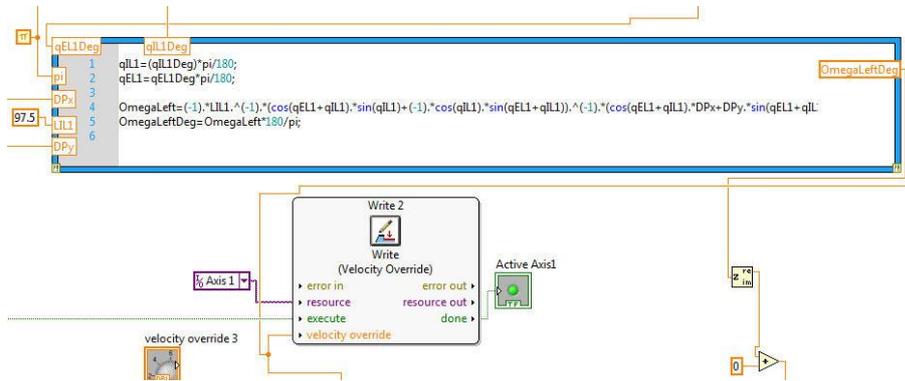
- qIL1Deg = ตำแหน่งของคันทิ้งกำลังของแขนด้านซ้าย หน่วยเป็นองศา
- qEL1Deg = ตำแหน่งของข้อแขนอิสระของแขนด้านซ้าย หน่วยเป็นองศา
- Pi = ค่า π
- DPx = ความเร็วที่ต้องการของปลายแขนกลในทิศทางแกน X หน่วยเป็น มิลลิเมตร/ วินาที
- DPy = ความเร็วที่ต้องการของปลายแขนกลในทิศทางแกน Y หน่วยเป็น มิลลิเมตร/วินาที
- LIL1 = ความยาวของก้าน โยงแขนช่วงบน

โดย Output ด้านขวาของ Math Script ประกอบด้วย

- OmegaLeftDeg = ค่าความเร็วเชิงมุม ของคันทิ้ง กำลัง เป็นองศา/วินาที นำไปใช้กำหนดให้คันทิ้งกำลัง



รูปที่ 5.30 หน้าจอส่วนติดต่อผู้ใช้ แสดงส่วนควบคุม Velocity แนวแกน

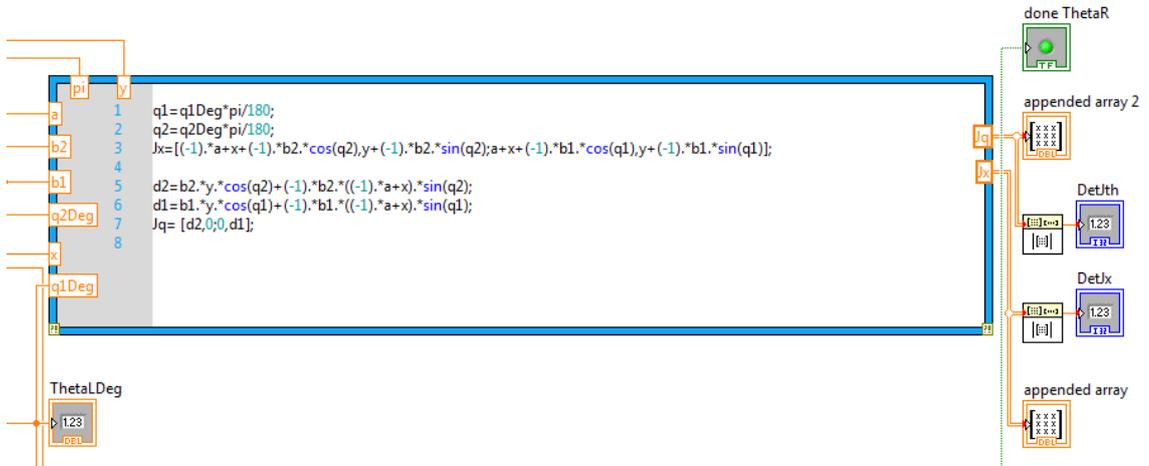


รูปที่ 5.31 การฝัง ชุดคำสั่ง Omega Compute and Omega Overwriting

การเขียนโปรแกรมหาค่า $\det(J_x)$

จากการหาขอบเขต Singularity แบบ DKS และจากนิยามดังรูปที่ 3.24 นั้นสามารถแปลงสมการเข้าสู่โปรแกรม Labview ได้โดยการเขียนโปรแกรมหาค่า $\det(J_x)$ $\det(J_o)$ ดังรูปที่ 5.32 โดยรูปที่ 5.32 จาก Input ด้านซ้ายของ Math Script ประกอบด้วย

- x, y = ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ในแกน x และ y ซึ่งได้จากสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้า หน่วยเป็นมิลลิเมตร
 - pi = ค่าพาย (3.14152)
 - a = ระยะวางมอเตอร์ต้นกำลังของหุ่นยนต์โดยวัดจากกึ่งกลางหุ่นยนต์ หน่วยมิลลิเมตร
 - b1,b2 = ความยาวแขนท่อนบนของหุ่นยนต์ หน่วยเป็น มิลลิเมตร
 - q1Deg ,q2Deg = องศาต้นกำลังของแขนซ้ายและแขนขวาของหุ่นยนต์ หน่วยเป็น องศา
- โดย Output ด้านขวาของ Math Script ประกอบด้วย
- Jq = Matrix Jq
 - Jx = Matrix Jx



รูปที่ 5.32 แสดงการฝัง ชุดคำสั่ง สร้าง Matrix Jx Jq เพื่อส่งออกไปใช้คำสั่ง det ภายนอก

การเขียนโปรแกรมเพื่อฝัง ชุดคำสั่ง อินเวอร์ส จาโคเบียน

จากสมการ อินเวอร์ส จาโคเบียน **Error! Reference source not found.** ทำการแปลงสมการแล้วเขียน ชุดคำสั่ง ผ่าน Matlab Script ซึ่งรับค่าตัวแปรต้นเป็น ค่ามุม Theta1 และ Theta2 และ Vector *ErrorX* ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็น Vector *Errorθ* เพื่อนำไปชดเชยกับต้นกำลัง ซึ่ง ชุดคำสั่ง ปรากฏดังรูปที่ 5.33

โดยรูปที่ 5.33 จาก Input ด้านซ้ายของ Math Script ประกอบด้วย

ErrorV = Matrix ขนาด 2 X 1 ประกอบด้วย Error แนวแกน x และ Error แนวแกน y หน่วยเป็นมิลลิเมตร

THETA1L = ค่ามุมต้นกำลังด้านซ้ายของหุ่นยนต์ มีหน่วยเป็น องศา

THETA1R = ค่ามุมต้นกำลังด้านขวาของหุ่นยนต์ มีหน่วยเป็น องศา

โดย Output ด้านขวาของ Math Script ประกอบด้วย

ErrorTheta = Matrix ขนาด 2 X 1 ประกอบด้วย ค่ามุมชดเชย Error แนวมุมของต้นกำลัง แขนซ้ายของหุ่นยนต์ และ ค่ามุมชดเชย Error แนวมุมของต้นกำลังแขนขวาของหุ่นยนต์ หน่วยเป็น องศา

```

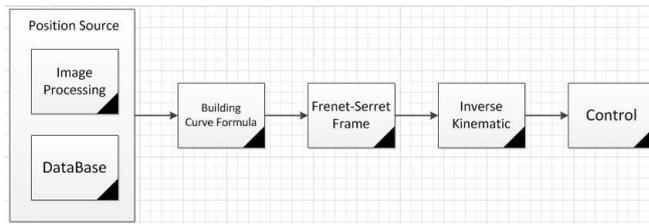
MATLAB script
ErrorV
TETA1L
TETA1R
segment1
ErrorTheta

segment1= [(0.5E0.*(0.120714E9+0.9604E8.*cos(THETA1L).^2-
0.517044E12.*cos(THETA1R).*sin(THETA1R).^2+0.922368E12.*
0.517044E12.*cos(THETA1R).^2.*sin(THETA1L)+0.289835E12.*
0.922368E12.*cos(THETA1L).^3.*cos(THETA1R)+(-0.146049E1
THETA1L).*sin(THETA1R)+0.188238E11.*cos(THETA1L).*sin(
0.517044E12.*cos(THETA1L).^2.*sin(THETA1L)+(-0.103409E13
0.461184E12.*cos(THETA1L).^2.*sin(THETA1R).^2+(-0.922368
0.230592E12.*sin(THETA1L).^4+(-0.517044E12).*cos(THETA1L
-0.372645E15).*cos(THETA1R).*sin(THETA1L).^2+0.839846E1
0.367065E17).*cos(THETA1R).^2.*sin(THETA1L).*sin(THETA1R
0.38025E13.*cos(THETA1L).^2+(-0.7644E13).*cos(THETA1L).*
0.182596E17.*cos(THETA1L).^2.*sin(THETA1R).^2+0.184474E1
THETA1L).*sin(THETA1L).^3+0.922368E12.*cos(THETA1R).*s
0.230592E12.*sin(THETA1R).^4)].*(((-0.1183E11).*sin(THETA1L
0.1183E11).*sin(THETA1R)+0.941192E10.*cos(THETA1L).^2.*sin
(-0.74529E15).*cos(THETA1L).*cos(THETA1R).*sin(THETA1L)+
THETA1L).^2+(-0.7644E13).*cos(THETA1L).*cos(THETA1R)+
0.844153E15).*cos(THETA1R).*sin(THETA1R)+0.74529E15).*cos(
0.376477E15).*cos(THETA1R).*sin(THETA1R).^2+(-0.1E1).*(((-0
0.376477E15).*cos(THETA1R).^2.*sin(THETA1R)+(-0.839846E1
    
```

รูปที่ 5.33 การฝังอินเวอร์ส จาโคเบียน ลงในโปรแกรม Labview

การเขียนโปรแกรมกำหนดค่าตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ ด้วย สมการ Helix Smooth Curve และ Frenet-Serret Frame

จากกระบวนการทำงานของโปรแกรมทั้งหมดส่วนของจลนศาสตร์ผกผัน สมการ Frenet-Serret จะถูกนำมาใช้หลังการสร้างสมการการเคลื่อนที่และก่อนการทำ ดังรูปที่ 5.34



รูปที่ 5.34 กระบวนการในการเขียน โปรแกรม

ซึ่งจากสมการ (4.47),(4.50),(4.53) และ(4.55) ได้ทำการแปลงสมการ ให้เป็น ชุดคำสั่ง โปรแกรมดังรูปที่ 5.35

โดยรูปที่ 5.35 จาก Input ด้านซ้ายของ Math Script ประกอบด้วย

- l = ความยาวรัศมีของ Helix Curve หน่วยเป็นมิลลิเมตร
- c = ความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่รอบ Helix Curve มีหน่วยเป็น เรเดียน/วินาที
- t = ค่าเวลา มีหน่วยเป็น วินาที
- Hx 2,Hy 2,Hz 2 = ค่าตำแหน่งจาก Robot Frame ไปยัง จุดศูนย์กลางของ Helix Curve มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

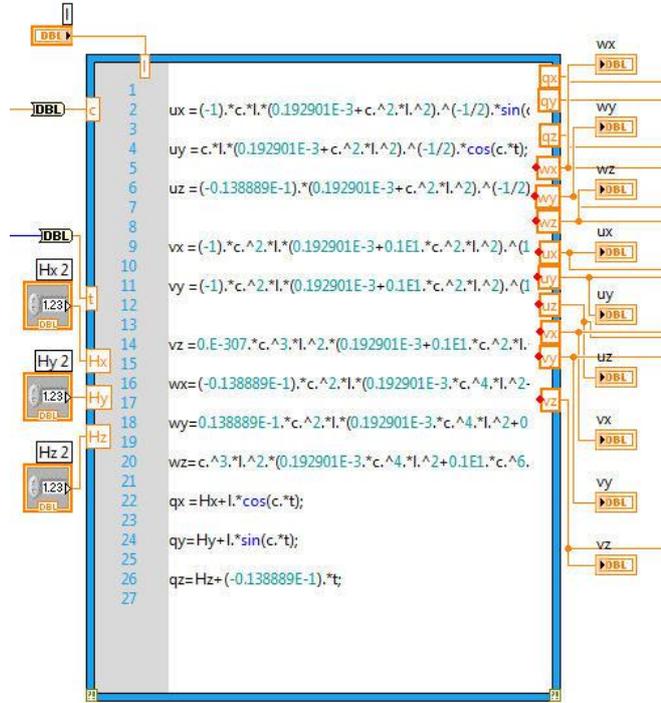
โดย Output ด้านขวาของ Math Script ประกอบด้วย

wx,wy,wz,ux,uy,uz,vx,vy,vz

= Element ของ Frenet-Serret Rotation Matrix ขนาด 3X3

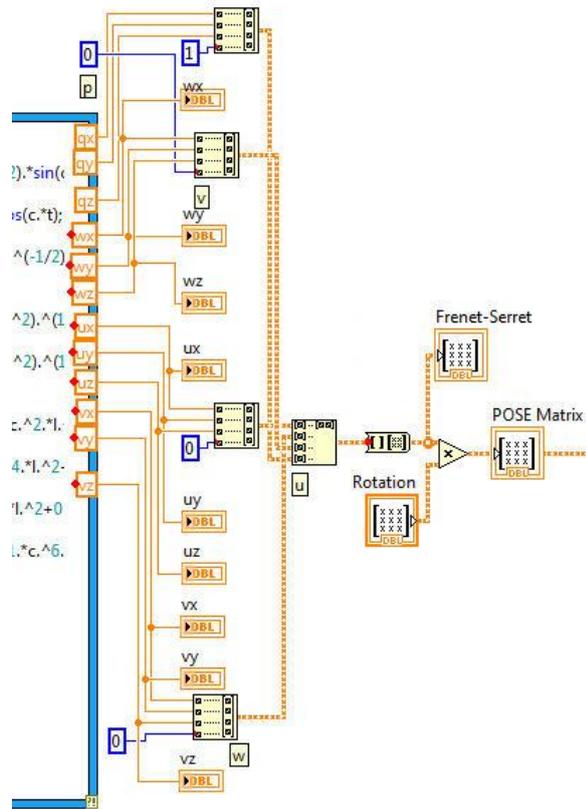
qx,qy,qz

= ค่าระยะแกน x,y,z ที่เป็นตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์
หน่วยเป็น มิลลิเมตร



รูปที่ 5.35 แสดงการฝัง ชุดคำสั่ง Frenet-Serret เข้าไปใน โปรแกรม Labview

โดย Output ของ ชุดคำสั่ง ที่ได้จะต้องนำไปรวมเป็น Matrix เพื่อนำไป dot เข้ากับ Rotation Matrix เพื่อปรับมุมเข้าชิ้นงานตามต้องการดังรูปที่ 5.36

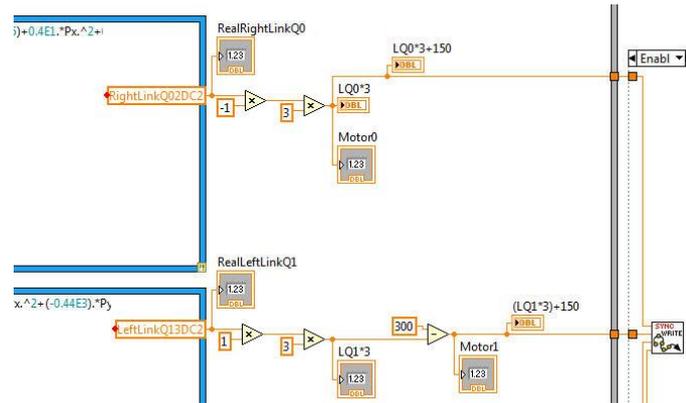


รูปที่ 5.36 การประกอบเข้าเป็น Matrix และการ Dot ด้วย Rotation Matrix

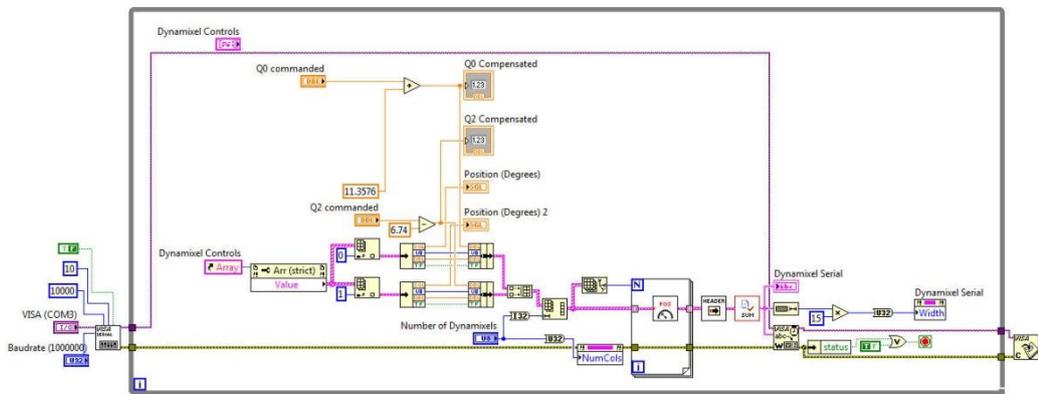
5.5.2 การเขียนโปรแกรมเชื่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

การเขียนโปรแกรมควบคุม มอเตอร์ Dynamixel AX-12 ผ่าน USB2Dynamixel

จาก ชุดคำสั่งการคำนวณจลนศาสตร์ผกผัน จน ได้ค่ามุม Axis Domain แล้วจากนั้นทำการ Convert เป็น Actuator Domain เมื่อได้ค่าเป็น Actuator Domain แล้วดังรูปที่ 5.37 แล้วทำการส่งค่า นั้น ไปยัง VISA Command ซึ่งเป็นคำสั่งที่ใช้สื่อสารกับ Port RS232 ที่มีอุปกรณ์ USB2Dynamixel ติดตั้งอยู่ดังรูปที่ 5.38



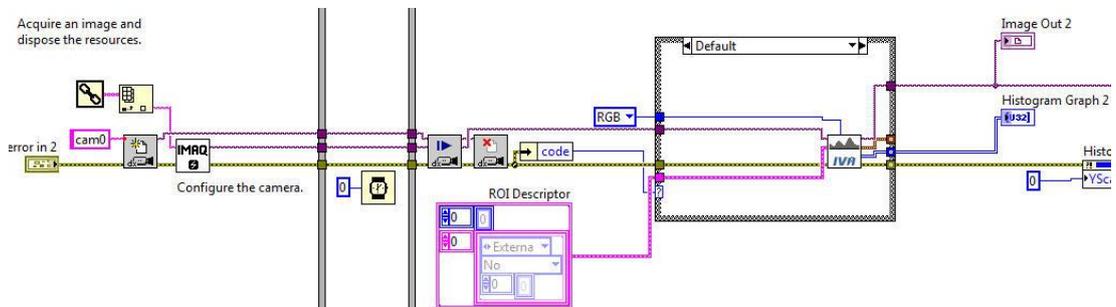
รูปที่ 5.37 แสดงการส่งค่ามุม Theta ที่เป็น Actuator Domain ไปยัง Function Call SyncWrite



รูปที่ 5.38 แสดง Function Call SyncWrite ซึ่งทำหน้าที่รับค่าเพื่อส่งให้ Port Rs232

การเขียนโปรแกรมดึงภาพจาก กล้อง Logitech Webcam Pro 9000

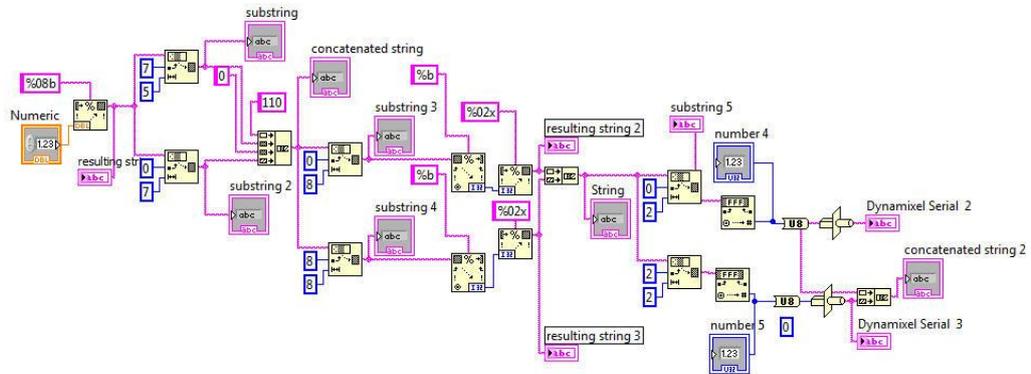
เมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่มาอยู่ในตำแหน่งเป้าหมายแล้วหยุดนิ่ง ชุดคำสั่ง หลักจะทำการสั่ง Call Function Snap Image ซึ่งมี ชุดคำสั่งดังรูปที่ 5.39 เพื่อทำการจับภาพนิ่งแล้วส่งภาพขึ้น หน้าจอส่วนติดต่อผู้ใช้ และ Save เป็น File .jpg ไว้



รูปที่ 5.39 แสดง ชุดคำสั่ง จากสั่ง Snap Shot รูปนิ่งจากกล้อง WebCam

การเขียนโปรแกรมเพื่อส่งค่าเข้า บอร์ด Polulu รุ่น Jrk 21v3

หลังจากเปลี่ยนบอร์ด Control Motor เป็น Polulu บอร์ด ดังนั้นจึงต้องมีการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมส่งการส่งค่า ดังรูปที่ 5.40



รูปที่ 5.40 ชุดคำสั่ง การสร้าง Acsii Code เพื่อส่งให้ Polulu Board

บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ที่ได้ออกแบบขึ้นทั้งส่วนการทดสอบกับแบบจำลอง และทดสอบกับหุ่นยนต์จริง โดยการทดสอบจะทดสอบเชิงตำแหน่ง เชิงมุม ความเร็ว การปรับปรุงค่า Error

6.2 การทดลอง

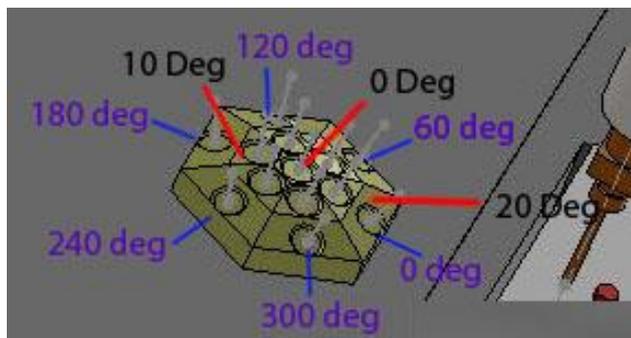
การทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองด้วยการจำลองสถานการณ์ในส่วนสมการจลนศาสตร์ ผกผัน ความเร็ว และ อินเวอร์ส จาโคเบียน และการทดลองจริงด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบ ในส่วนตำแหน่ง ปลายแขน และการปรับปรุงหุ่นยนต์เพื่อปรับปรุงตำแหน่ง

6.2.1 ทดลองแนวคิดด้วยการจำลองสถานการณ์

จากการเขียนโปรแกรมในส่วน 5.5.1 การเขียนโปรแกรมควบคุม ทางผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลอง ดังนี้

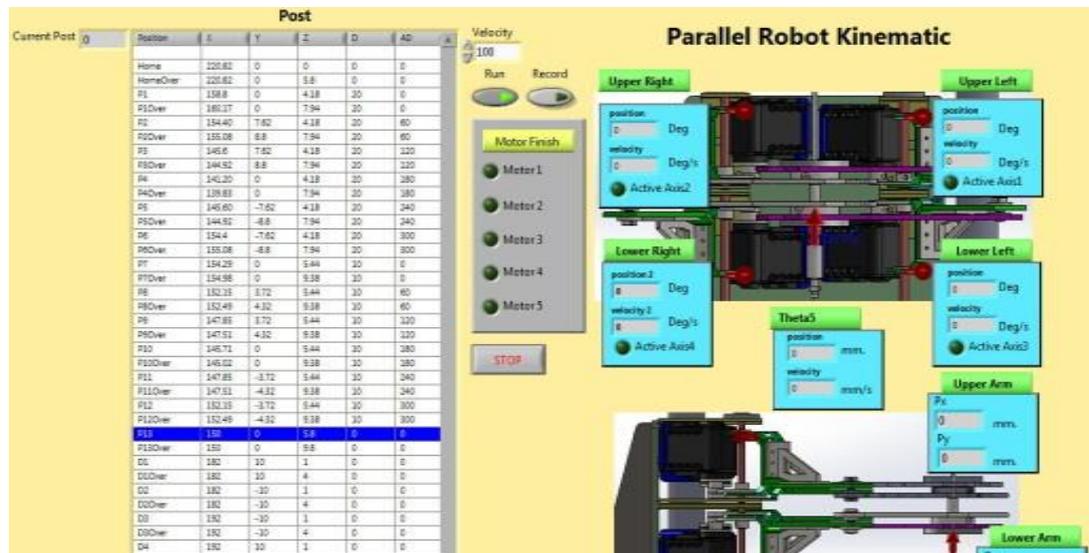
การทดลองเชิงตำแหน่งด้วยการจำลองสถานการณ์

ในการทดลองผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยการสร้างโมเดลชิ้นงานจำลอง ที่เป็นตัวแทนของคุณสมบัติของหุ่นยนต์ นั่นคือ สามารถเข้างานได้ในทุกๆ มุมรอบแกน Z ในขั้นละ 60 องศา (Alpha) และในมุมรอบแกน x และ y ทั้ง 10, 20 องศา (Beta) ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ตัวอย่างรูปแบบชิ้นงานเพื่อทดลองการทำงานของแบบจำลอง

จากนั้นเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการเข้างานในแต่ละตำแหน่ง มุม Alpha และ Beta ซึ่งในการทดลอง ผู้วิจัยจะ ใส่ค่าต่างๆ เข้าไปยัง หน้าจอส่วนติดต่อผู้ใช้ ดังรูปที่ 6.2 ด้านล่าง



รูปที่ 6.2 หน้าจอส่วนติดต่อผู้ใช้ สำหรับทดลองการเคลื่อนที่

ซึ่งการใช้งาน หน้าจอส่วนติดต่อผู้ใช้ นั้น ผู้ใช้สามารถเลือกค่า x , y , z และค่ามุม Alpha, Beta จาก ส่วน Input ด้านซ้าย จากนั้นกดปุ่ม Run ของโปรแกรม Labview ระบบจะคำนวณหาค่ามุมของต้นกำลังทั้ง 5 ตัว นั่นคือ Theta 1 ถึง 5 พร้อมกับส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม SolidWorks เพื่อวิเคราะห์และจำลองการทำงานของแขนหุ่นยนต์ โดยขยับแขนหุ่นยนต์ตามมุมต้นกำลังที่ Labview คำนวณได้ ซึ่งการทดลองจะทดลอง 34 ครั้งไล่เรียงตามตำแหน่งต่างๆรอบตัวชิ้นงานต้นแบบ แล้วพิจารณาผลการทดลอง

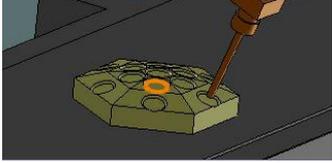
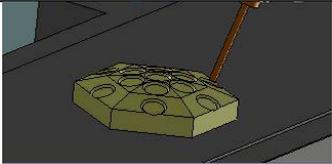
วิธีการเก็บผลการทดลองเชิงตำแหน่งด้วยการจำลองสถานการณ์

ผู้วิจัยทำการสั่งให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามค่าดังรูป รูปที่ 6.1 เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งที่สั่งการ จึงสั่งหยุดการเคลื่อนที่ แล้วจึงใช้เครื่องมือในโปรแกรม SolidWorks ทำการวัดตำแหน่ง แล้วจึงจัดเก็บค่านั้นไว้

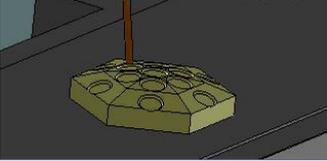
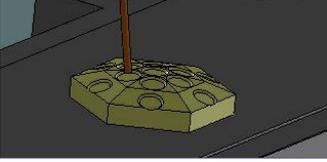
ผลการทดลองเชิงตำแหน่งด้วยการจำลองสถานการณ์

ผู้วิจัยนำค่าที่ได้ทั้ง 34 ครั้งมาเขียนเพื่อสรุปผลดัง ตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลลัพธ์ของการทดลอง

| ลำดับ | รูป | | ตำแหน่งที่ต้องการ (มิลลิเมตร) | ตำแหน่งที่ได้จริง (มิลลิเมตร) | Error(%) |
|-------|---|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------|
| 1 |  | แกน X | 158.8 | 158.7 | 0.1 |
| | | แกน Y | 0 | 0 | 0 |
| | | แกน Z | 4.18 | 3.91 | 0.27 |
| | | Alpha | 0 | 0 | 0 |
| | | Delta | 20 | 20 | 0 |
| 2 |  | แกน X | 154.4 | 154.58 | -0.18 |
| | | แกน Y | 7.62 | 7.53 | 0.09 |
| | | แกน Z | 4.18 | 3.91 | 0.27 |
| | | Alpha | 60 | 60 | 0 |
| | | Delta | 20 | 20 | 0 |
| 3 |  | แกน X | 145.6 | 145.65 | -0.05 |
| | | แกน Y | 7.62 | 7.53 | 0.09 |
| | | แกน Z | 4.18 | 3.91 | 0.27 |
| | | Alpha | 120 | 120 | 0 |
| | | Delta | 20 | 20 | 0 |
| 4 |  | แกน X | 141.2 | 141.3 | -0.1 |
| | | แกน Y | 0 | 0 | 0 |
| | | แกน Z | 4.18 | 3.91 | 0.27 |
| | | Alpha | 180 | 180 | 0 |
| | | Delta | 20 | 20 | 0 |
| 5 |  | แกน X | 145.6 | 145.9 | -0.3 |
| | | แกน Y | -7.62 | -7.53 | -0.09 |
| | | แกน Z | 4.18 | 3.91 | 0.27 |
| | | Alpha | 240 | 240 | 0 |
| | | Delta | 20 | 20 | 0 |
| 6 |  | แกน X | 154.4 | 154.39 | 0.01 |
| | | แกน Y | -7.62 | -7.6 | -0.02 |
| | | แกน Z | 4.18 | 4.07 | 0.11 |
| | | Alpha | 300 | 300 | 0 |
| | | Delta | 20 | 20 | 0 |
| 7 |  | แกน X | 154.29 | 154.27 | 0.02 |
| | | แกน Y | 0 | 0 | 0 |
| | | แกน Z | 5.44 | 5.33 | 0.11 |
| | | Alpha | 0 | 0 | 0 |
| | | Delta | 10 | 10 | 0 |

ตารางที่ 6.1 ผลลัพธ์ของการทดลอง(ต่อ)

| ลำดับ | รูป | | ตำแหน่งที่ต้องการ (มิลลิเมตร) | ตำแหน่งที่ได้จริง (มิลลิเมตร) | Error(%) |
|-------|---|------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------|
| 8 |  บท 1 | บท 2 แกน X | บท 3 152.15 | บท 4 152.14 | บท 5 0.01 |
| | | แกน Y | 3.72 | 3.7 | 0.02 |
| | | แกน Z | 5.44 | 5.33 | 0.11 |
| | | Alpha | 60 | 60 | 0 |
| | | Delta | 10 | 10 | 0 |
| 9 |  | แกน X | 147.85 | 147.86 | -0.01 |
| | | แกน Y | 3.72 | 3.7 | 0.02 |
| | | แกน Z | 5.44 | 5.33 | 0.11 |
| | | Alpha | 120 | 120 | 0 |
| | | Delta | 10 | 10 | 0 |
| 10 |  | แกน X | 145.71 | 145.73 | -0.02 |
| | | แกน Y | 0 | 0 | 0 |
| | | แกน Z | 5.44 | 5.33 | 0.11 |
| | | Alpha | 180 | 180 | 0 |
| | | Delta | 10 | 10 | 0 |
| 11 |  | แกน X | 147.85 | 147.86 | -0.01 |
| | | แกน Y | -3.72 | -3.7 | -0.02 |
| | | แกน Z | 5.44 | 5.33 | 0.11 |
| | | Alpha | 240 | 240 | 0 |
| | | Delta | 10 | 10 | 0 |
| 12 |  | แกน X | 152.15 | 152.14 | 0.01 |
| | | แกน Y | -3.72 | -3.7 | -0.02 |
| | | แกน Z | 5.44 | 5.33 | 0.11 |
| | | Alpha | 300 | 300 | 0 |
| | | Delta | 10 | 10 | 0 |
| 13 |  | แกน X | 150 | 150 | 0 |
| | | แกน Y | 0 | 0 | 0 |
| | | แกน Z | 5.8 | 5.7 | 0.1 |
| | | Alpha | 0 | 0 | 0 |
| | | Delta | 0 | 0 | 0 |

สรุปผลการทดลองเชิงตำแหน่งด้วยการจำลองสถานการณ์

หลักการเก็บค่าดัง ตารางที่ 6.1 แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย Error ดังปรากฏใน ตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 สรุปค่า Error เฉลี่ยจากการจำลองสถานการณ์ของสมการจลนศาสตร์เชิงมุมและตำแหน่ง

| ค่าเฉลี่ย Error แกน X (มิลลิเมตร) | ค่าเฉลี่ย Error แกน Y (มิลลิเมตร) | ค่าเฉลี่ย Error แกน Z (มิลลิเมตร) | ค่าเฉลี่ย Error แกน Alpha (องศา) | ค่าเฉลี่ย Error แกน Delta (องศา) |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| 0.063 | 0.0284 | 0.1707 | 0 | 0 |

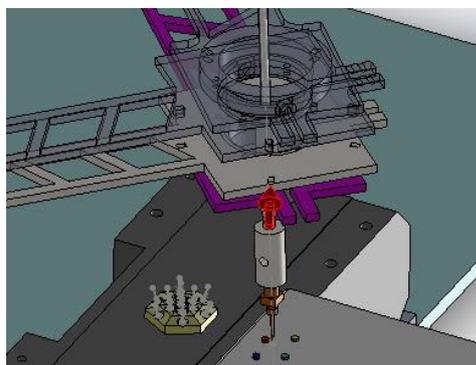
จากตารางที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าค่า Error นั้นน้อยมากจนถึงไม่มี เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรมจึงทำให้มีปัจจัยต่างๆที่จะทำให้ผลลัพธ์ออกมาคลาดเคลื่อนมีน้อย และผู้วิจัยสามารถปรับเปลี่ยนส่วนผิดพลาดต่างๆ ได้ง่ายจนได้รับผลลัพธ์ตามที่ผู้วิจัยต้องการได้ จึงสรุปได้ว่าสมการจลนศาสตร์ผกผันมีความถูกต้อง

การทดลองความเร็ว

จาก 5.5.1 การเขียนโปรแกรมควบคุม ส่วนการเขียนโปรแกรมควบคุมความเร็ว ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองโดยทำการสั่งปลายแขนหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปกลับ ในตำแหน่ง $x = 150, y = 0, z = 0, D = 0, Ad = 0$ โดยกำหนด ความเร็วปลายแขนที่ต้องการเท่ากับ 150 mm/s จากนั้นสั่ง Run โปรแกรม

วิธีการเก็บผลการทดลองความเร็วด้วยการจำลองสถานการณ์

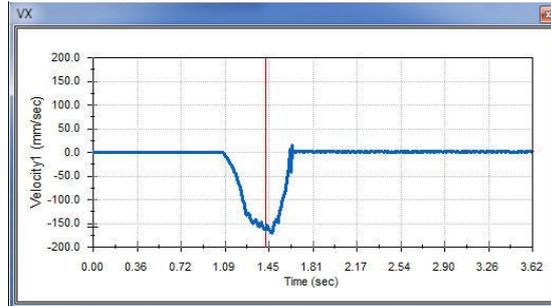
จัดเก็บค่าความเร็วปลายแขนทั้งแกน x ,y ความเร็วเชิงมุมที่ต้นกำลังทั้งสองด้วยเครื่องมือวัดค่าในโปรแกรม Solidworks ดังรูปที่ 6.3



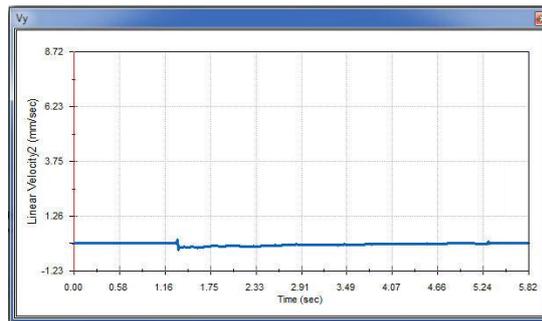
รูปที่ 6.3 แสดงการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อกำหนดค่าความเร็วแกน x

ผลการทดลองความเร็วด้วยการจำลองสถานการณ์

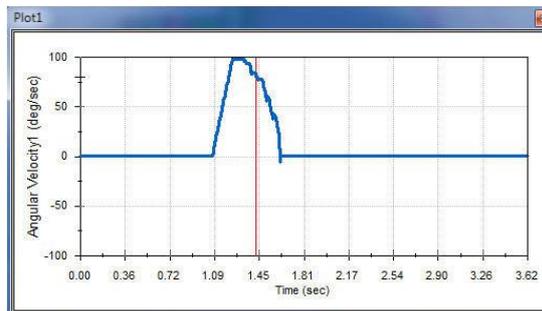
วัดค่าต่างๆ ตามเวลาจะได้กราฟดัง รูปที่ 6.4 ถึง รูปที่ 6.9



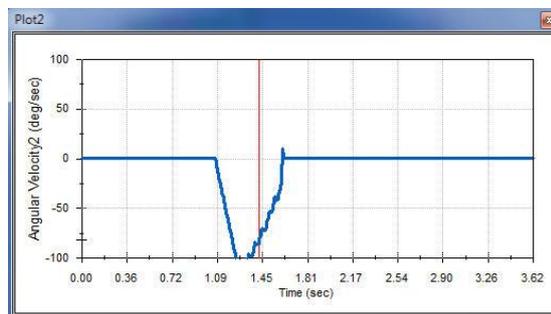
รูปที่ 6.4 ความเร็วปลานแกนกล ในแนวแกน x ที่ได้ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 120-150 mm/s



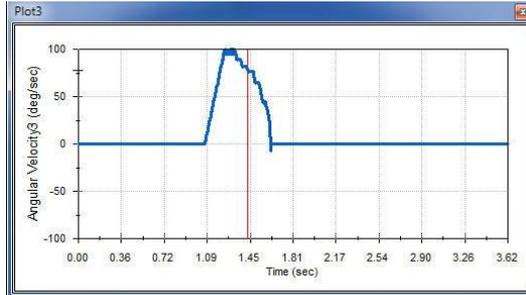
รูปที่ 6.5 ความเร็วปลานแกนกล ในแนวแกน y ที่ได้ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0-0.2 mm/s



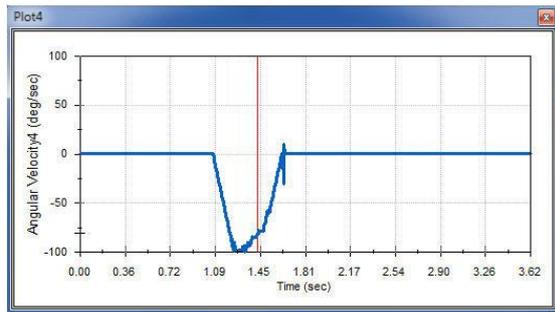
รูปที่ 6.6 ค่าความเร็วเชิงมุมของต้นกำลังด้านซ้าย ด้านแขนบน $Dr[\theta IL1]$



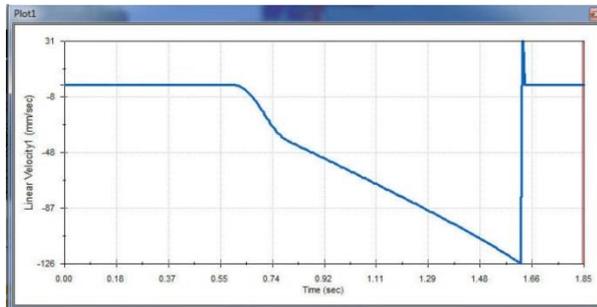
รูปที่ 6.7 ค่าความเร็วเชิงมุมของต้นกำลังด้านขวาบน $Dr[\theta IL2]$



รูปที่ 6.8 ค่าความเร็วเชิงมุมของต้นกำลังด้านซ้ายล่าง



รูปที่ 6.9 ค่าความเร็วเชิงมุมของต้นกำลังด้านขวาล่าง



รูปที่ 6.10 ความเร็วเชิงเส้นในแกน x เมื่อกำหนดความเร็วต้นคงที่

จากค่าการทดลองทำให้ทราบว่า การกำหนดค่าความเร็วปลายแขนให้เป็นค่าคงที่ตามต้องการนั้นจะทำให้ต้นกำลังเคลื่อนที่อยู่ตลอด โดยที่มีความเร็วเชิงมุมไม่คงที่ดัง รูปที่ 6.6 และ รูปที่ 6.7 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกราฟที่กำหนดให้ความเร็วเชิงมุมอยู่คงที่แล้วผู้วิจัยจะได้กราฟความเร็วเชิงเส้นในแกน x ดังรูปที่ 6.10

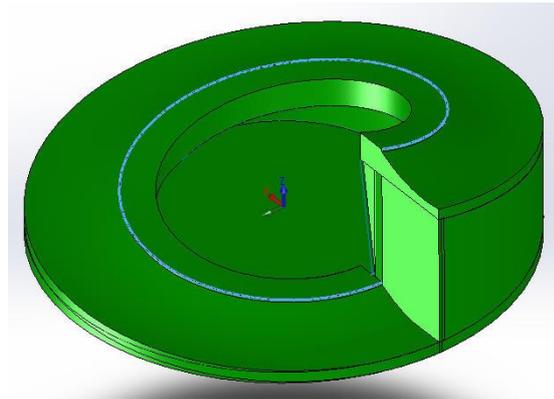
จากรูปที่ 6.10 จะสังเกตได้ว่าค่าความเร็วเชิงเส้นในแกน x ไม่คงที่เกิดการเพิ่มขึ้นตลอดเวลาตามเวลา

สรุปผลการทดลองความเร็วด้วยการจำลองสถานการณ์

สมการกำหนดความเร็วปลายแขนถูกต้องและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

การทดลองสมการ Helix Smooth Curve และ Frenet-Serret

จากรูปที่ 5.35 และ รูปที่ 5.36 ซึ่งแสดงการแปลงสมการเป็นชุดคำสั่งของ โปรแกรมในส่วนการนำสมการ Frenet-Serret ไปใช้ ผู้วิจัยจึงทำการทดลองสมการด้วยการสร้างชิ้นงานตัวอย่างดังรูปที่ 6.11 (เส้นสีฟ้า) ที่ปลาย EFF ต้องเคลื่อนที่ตามเส้นบนผิวชิ้นงาน ไปที่ละ 10 องศา ซึ่งเส้นนี้เกิดจากสมการ Helix Smooth Curve



รูปที่ 6.11 แสดง เส้นโค้ง เป้าหมาย (สีฟ้า)

โดยมี Parameter ของสมการ Helix Smooth Curve ดัง(6.1)

$$\begin{aligned}
 l &= 5 \\
 Hx &= 150 \\
 Hy &= 0 \\
 Hz &= 6 \\
 c &= 1^\circ \\
 t &= 10
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

วิธีการเก็บผลการทดลองสมการ Helix Smooth Curve และ Frenet-Serret

ใช้วิธี Capture หน้าจอทั้งหมดทั้งในแบบ ภาพนิ่งและแบบ Video แล้วสังเกตการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลทุกๆ 10 องศาการเคลื่อนที่

ผลการทดลองสมการ Helix Smooth Curve และ Frenet-Serret

ผลการ Capture หน้าจอปรากฏดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 ผลการจำลองสถานการณ์ แขนกล ด้วย Frenet-Serret Frame

ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปตามขอบเส้นที่ได้ออกแบบไว้ บนผิวชิ้นงาน โดยมีการขยับต้นกำลัง ปลายแขนบนและล่าง และ End Effector สอดคล้อง เข้ามุมจนครบรอบ

สรุปผลการทดลองสมการ Helix Smooth Curve และ Frenet-Serret

ปรากฏว่าปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนเส้นเป้าหมายได้ถูกต้องตามสมการ Helix Smooth Curve

6.2.2 การทดลองด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบ

การออกแบบการทดลองด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อหา Error แกน x, y

ทางผู้วิจัยได้ออกแบบได้ทดลองเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นแรกทดสอบการเคลื่อนที่แนวแกน โดยหลักการทำงานเป็นการทำงานแบบเคลื่อนที่ปลายแขนกล

จากจุดอยู่หนึ่งให้ปลายแขนวิ่งจากจุดปลายที่ $x = 176, y = 0$ ไปยังตำแหน่งเป้าหมายต่างๆ

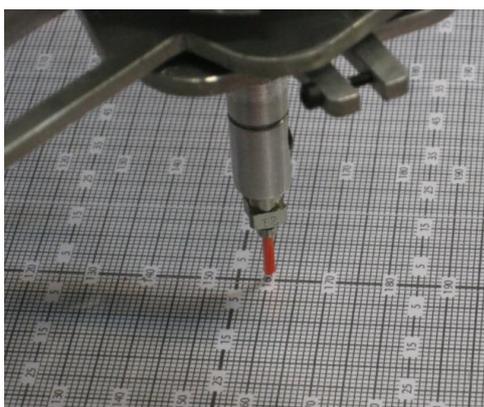
แล้วกลับมาที่ $x = 176, y = 0$ ไปกลับ 20 ครั้ง ดังตารางที่ 6.20

ตารางที่ 6.3 ตำแหน่งเป้าหมายทั้ง 8 รอบจุดเริ่มต้น

| ตำแหน่งที่ | ตำแหน่งเป้าหมายแกน x (มิลลิเมตร) | ตำแหน่งเป้าหมายแกน y (มิลลิเมตร) |
|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 161 | 0 |
| 2 | 191 | 0 |
| 3 | 176 | 15 |
| 4 | 176 | -15 |
| 5 | 186.6 | 10.6 |
| 6 | 186.6 | -10.6 |
| 7 | 165.4 | 10.6 |
| 8 | 165.4 | -10.6 |

วิธีการเก็บผลการทดลองเชิงตำแหน่งด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อหา Error แกน x, y

ทางผู้วิจัยใช้แผ่น Grid ตารางตำแหน่ง ดังรูปที่ 6.13 เพื่อวัดและเก็บค่าตำแหน่ง วิธีจัดเก็บค่าโดยการบันทึกค่าที่วัดได้แต่ละครั้งลงบนกระดาษ



รูปที่ 6.13 แสดงภาพตำแหน่งแขนหุ่นยนต์พร้อม Scale บอกระยะ

ผลการทดลองหา Error แนวแกน

หลังจากจัดเก็บค่าการเคลื่อนที่เชิงตำแหน่งโดยการวัดด้วยตาราง Grid แล้วผลปรากฏดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ค่าระยะของปลายแขนหุ่นยนต์ ในแนวแกน X,Y ทั้ง 8 ตำแหน่งจำนวน 20 ครั้ง

| | ตำแหน่งที่ 1 | | ตำแหน่งที่ 2 | | ตำแหน่งที่ 3 | | ตำแหน่งที่ 4 | | ตำแหน่งที่ 5 | | ตำแหน่งที่ 6 | | ตำแหน่งที่ 7 | | ตำแหน่งที่ 8 | |
|----|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|-------|--------------|------|--------------|-------|--------------|------|--------------|-------|
| | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y |
| 1 | 160.0 | 0 | 194 | -1.5 | 176 | 15.0 | 177.5 | -14.5 | 189.5 | 10.5 | 187.0 | -10.3 | 167.0 | 10.5 | 165.0 | -9.5 |
| 2 | 160.0 | 0 | 194 | -2.0 | 176 | 15.3 | 178.0 | -14.8 | 189.0 | 10.5 | 186.7 | -10.5 | 167.0 | 10.5 | 165.5 | -10.0 |
| 3 | 160.0 | 0 | 194 | -1.5 | 176 | 15.0 | 178.0 | -14.5 | 189.5 | 11.0 | 187.5 | -10.9 | 167.0 | 10.0 | 165.5 | -10.0 |
| 4 | 160.0 | 0 | 194 | -1.0 | 176 | 15.0 | 178.3 | -14.8 | 189.0 | 10.5 | 188.0 | -11.0 | 167.0 | 10.0 | 165.5 | -10.0 |
| 5 | 160.0 | 0 | 194 | -1.0 | 176 | 16.0 | 178.0 | -14.5 | 189.5 | 10.5 | 187.0 | -11.2 | 167.0 | 10.0 | 165.5 | -10.0 |
| 6 | 160.0 | 0 | 194 | -0.5 | 176 | 16.0 | 178.0 | -14.5 | 189.5 | 10.5 | 187.0 | -10.8 | 167.5 | 10.0 | 165.5 | -10.0 |
| 7 | 160.0 | 0 | 194 | -0.5 | 176 | 16.0 | 178.0 | -14.5 | 189.5 | 10.5 | 186.6 | -10.9 | 168.0 | 9.5 | 165.5 | -9.5 |
| 8 | 160.0 | 0 | 194 | -0.5 | 176 | 15.5 | 177.7 | -14.5 | 189.2 | 10.5 | 186.3 | -10.8 | 168.0 | 9.5 | 165.5 | -9.5 |
| 9 | 160.2 | 0 | 194 | -0.5 | 176 | 15.5 | 178.0 | -14.5 | 189.0 | 10.5 | 187.0 | -10.5 | 168.0 | 9.5 | 165.5 | -9.5 |
| 10 | 160.3 | 0 | 194 | -0.5 | 176 | 15.5 | 178.0 | -14.5 | 189.0 | 10.5 | 187.2 | -10.9 | 168.0 | 9.5 | 165.5 | -9.5 |
| 11 | 160.5 | 0 | 194 | -0.5 | 176 | 15.7 | 178.0 | -14.5 | 189.0 | 10.0 | 187.0 | -11.0 | 168.0 | 9.5 | 165.0 | -9.5 |
| 12 | 160.5 | 0 | 194 | -0.5 | 176 | 15.5 | 178.0 | -14.5 | 189.0 | 10.0 | 187.0 | -11.2 | 168.5 | 9.3 | 165.0 | -9.5 |
| 13 | 161.0 | 0 | 194 | -0.5 | 176 | 15.5 | 178.0 | -14.5 | 189.0 | 10.0 | 186.5 | -10.8 | 169.0 | 9.0 | 165.0 | -9.5 |
| 14 | 160.5 | 0 | 194 | -0.5 | 176 | 15.5 | 178.0 | -14.5 | 189.0 | 10.0 | 186.3 | -10.9 | 168.0 | 9.0 | 166.0 | -10.0 |
| 15 | 161.0 | 0 | 194 | -0.5 | 176 | 15.5 | 178.0 | -14.5 | 189.0 | 10.0 | 187.0 | -10.8 | 169.0 | 9.0 | 165.0 | -9.5 |
| 16 | 160.0 | 0 | 194 | -0.5 | 176 | 15.5 | 178.0 | -14.5 | 189.0 | 10.0 | 187.2 | -10.5 | 168.0 | 9.5 | 165.5 | -9.5 |
| 17 | 161.0 | 0 | 194 | -0.5 | 176 | 15.5 | 178.0 | -14.5 | 189.0 | 10.0 | 186.5 | -10.9 | 168.0 | 9.5 | 165.0 | -9.5 |
| 18 | 161.0 | -0.5 | 194 | -0.3 | 176 | 15.5 | 178.0 | -14.5 | 189.0 | 10.0 | 187.0 | -10.8 | 168.0 | 9.5 | 165.0 | -9.5 |
| 19 | 161.0 | -0.5 | 194 | -0.3 | 176 | 15.4 | 178.0 | -14.5 | 189.0 | 10.0 | 187.0 | -10.9 | 168.0 | 9.5 | 165.3 | -9.5 |
| 20 | 161.5 | -0.7 | 194 | -0.3 | 176 | 15.0 | 178.0 | -14.5 | 189.5 | 10.0 | 186.6 | -10.8 | 168.0 | 9.5 | 165.0 | -9.5 |

ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเป้าหมายแล้วจะได้ค่า Error แกน X ดังตารางที่ 6.5

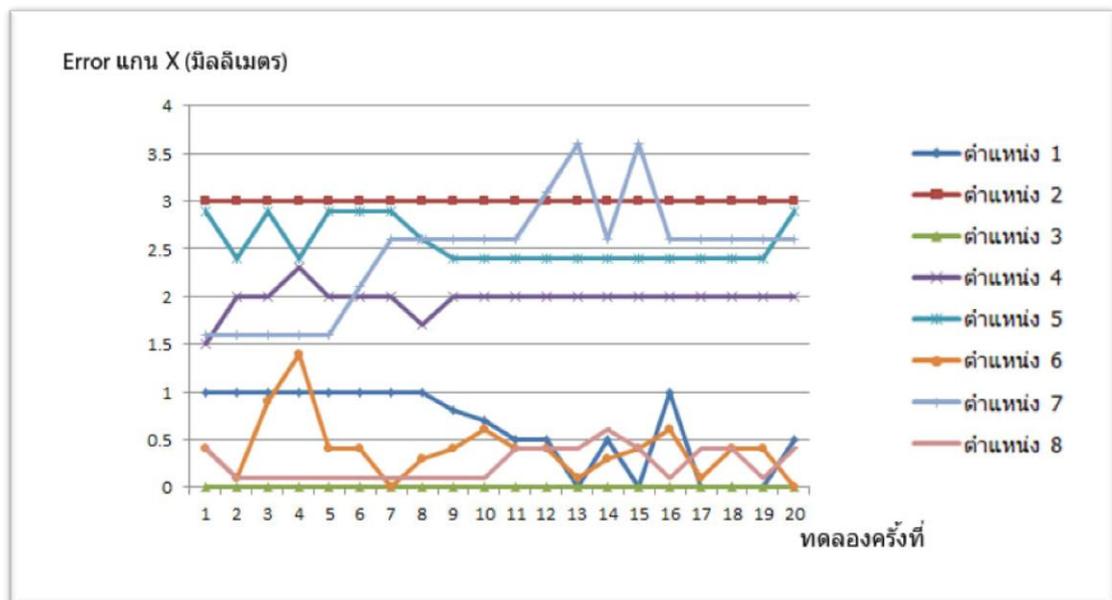
ตารางที่ 6.5 ตารางแสดง Error แนวแกน X จำนวน 20 ครั้ง

| Absolute Error แกน X (mm.) | ตำแหน่ง 1 | ตำแหน่ง 2 | ตำแหน่ง 3 | ตำแหน่ง 4 | ตำแหน่ง 5 | ตำแหน่ง 6 | ตำแหน่ง 7 | ตำแหน่ง 8 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ครั้งที่ 1 | 1 | 3 | 0 | 1.5 | 2.9 | 0.4 | 1.6 | 0.4 |
| ครั้งที่ 2 | 1 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.1 | 1.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 3 | 1 | 3 | 0 | 2 | 2.9 | 0.9 | 1.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 4 | 1 | 3 | 0 | 2.3 | 2.4 | 1.4 | 1.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 5 | 1 | 3 | 0 | 2 | 2.9 | 0.4 | 1.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 6 | 1 | 3 | 0 | 2 | 2.9 | 0.4 | 2.1 | 0.1 |
| ครั้งที่ 7 | 1 | 3 | 0 | 2 | 2.9 | 0 | 2.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 8 | 1 | 3 | 0 | 1.7 | 2.6 | 0.3 | 2.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 9 | 0.8 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.4 | 2.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 10 | 0.7 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.6 | 2.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 11 | 0.5 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.4 | 2.6 | 0.4 |
| ครั้งที่ 12 | 0.5 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.4 | 3.1 | 0.4 |
| ครั้งที่ 13 | 0 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.1 | 3.6 | 0.4 |
| ครั้งที่ 14 | 0.5 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.3 | 2.6 | 0.6 |

ตารางที่ 6.5 ตารางแสดง Error แนวแกน X จำนวน 20 ครั้ง (ต่อ)

| Absolute Error แกน X (mm.) | ตำแหน่ง 1 | ตำแหน่ง 2 | ตำแหน่ง 3 | ตำแหน่ง 4 | ตำแหน่ง 5 | ตำแหน่ง 6 | ตำแหน่ง 7 | ตำแหน่ง 8 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ครั้งที่ 15 | 0 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.4 | 3.6 | 0.4 |
| ครั้งที่ 16 | 1 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.6 | 2.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 17 | 0 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.1 | 2.6 | 0.4 |
| ครั้งที่ 18 | 0 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.4 | 2.6 | 0.4 |
| ครั้งที่ 19 | 0 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.4 | 2.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 20 | 0.5 | 3 | 0 | 2 | 2.9 | 0 | 2.6 | 0.4 |

ซึ่งสามารถนำค่าที่จัดเก็บได้มาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 6.14

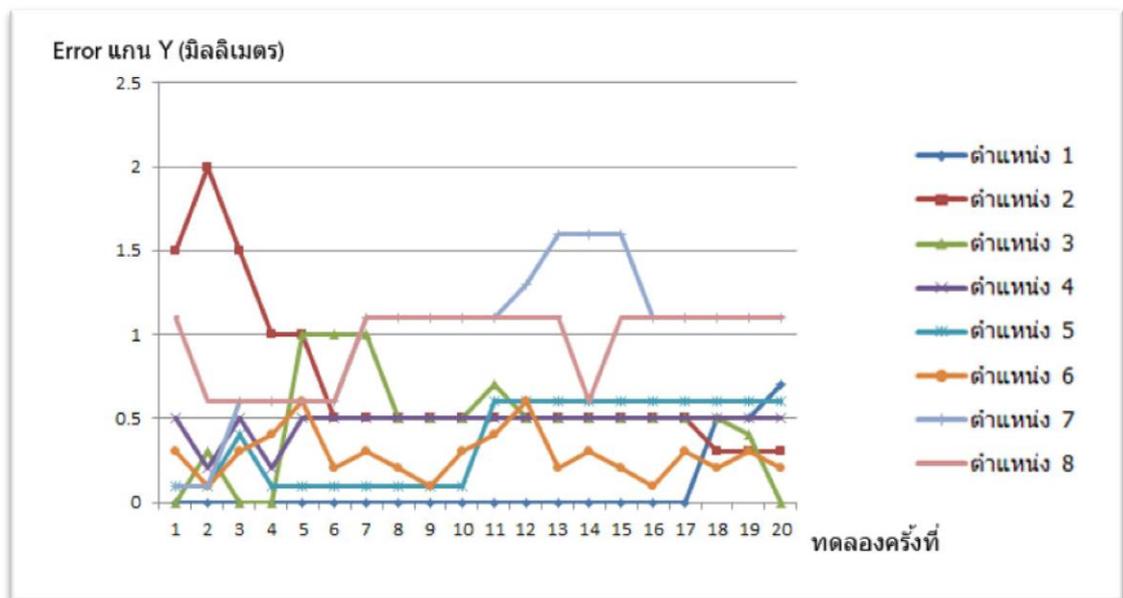


รูปที่ 6.14 แสดงระยะ Error ในแนวแกน X จากการจัดเก็บค่า 20 ครั้ง

เมื่อนำข้อมูลตารางที่ 6.4 มาเปรียบเทียบกับเป้าหมายแล้วจะได้ค่า Error แกน Y ดัง ตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 ตารางแสดง Error แนวแกน Y จำนวน 20 ครั้ง

| Absolute Error (แกน Y (mm.)) | ตำแหน่ง 1 | ตำแหน่ง 2 | ตำแหน่ง 3 | ตำแหน่ง 4 | ตำแหน่ง 5 | ตำแหน่ง 6 | ตำแหน่ง 7 | ตำแหน่ง 8 |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ครั้งที่ 1 | 1 | 3 | 0 | 1.5 | 2.9 | 0.4 | 1.6 | 0.4 |
| ครั้งที่ 2 | 1 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.1 | 1.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 3 | 1 | 3 | 0 | 2 | 2.9 | 0.9 | 1.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 4 | 1 | 3 | 0 | 2.3 | 2.4 | 1.4 | 1.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 5 | 1 | 3 | 0 | 2 | 2.9 | 0.4 | 1.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 6 | 1 | 3 | 0 | 2 | 2.9 | 0.4 | 2.1 | 0.1 |
| ครั้งที่ 7 | 1 | 3 | 0 | 2 | 2.9 | 0 | 2.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 8 | 1 | 3 | 0 | 1.7 | 2.6 | 0.3 | 2.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 9 | 0.8 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.4 | 2.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 10 | 0.7 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.6 | 2.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 11 | 0.5 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.4 | 2.6 | 0.4 |
| ครั้งที่ 12 | 0.5 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.4 | 3.1 | 0.4 |
| ครั้งที่ 13 | 0 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.1 | 3.6 | 0.4 |
| ครั้งที่ 14 | 0.5 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.3 | 2.6 | 0.6 |
| ครั้งที่ 15 | 0 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.4 | 3.6 | 0.4 |
| ครั้งที่ 16 | 1 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.6 | 2.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 17 | 0 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.1 | 2.6 | 0.4 |
| ครั้งที่ 18 | 0 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.4 | 2.6 | 0.4 |
| ครั้งที่ 19 | 0 | 3 | 0 | 2 | 2.4 | 0.4 | 2.6 | 0.1 |
| ครั้งที่ 20 | 0.5 | 3 | 0 | 2 | 2.9 | 0 | 2.6 | 0.4 |

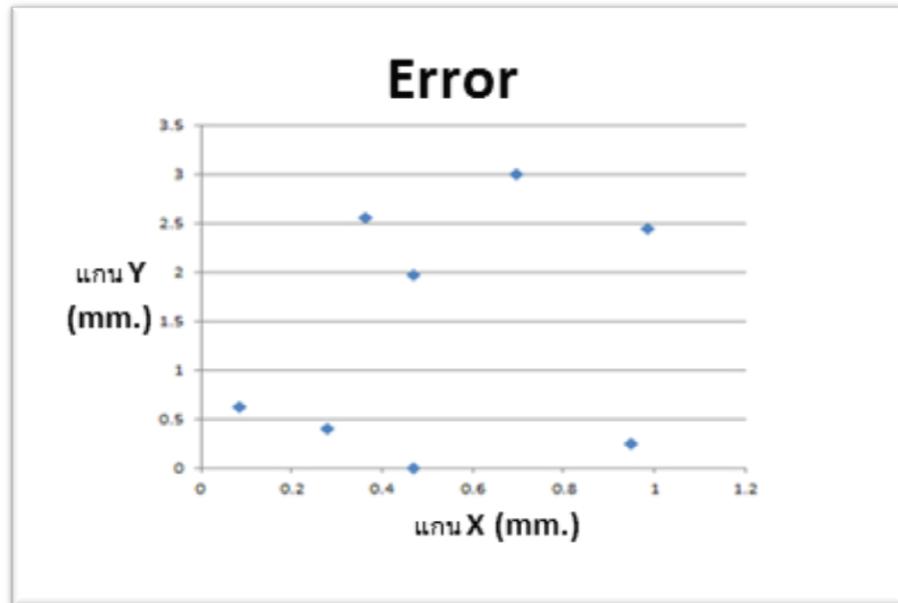


รูปที่ 6.15 แสดงระยะ Error ในแนวแกน Y จากการจัดเก็บค่า 20 ครั้ง

ตารางที่ 6.7 สรุปค่า Error เฉลี่ยในแกน x,y

| ตำแหน่งที่ | Error เฉลี่ยแกน X | Error เฉลี่ยแกน Y |
|------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0.085 | 0.63 |
| 2 | 0.695 | 3 |
| 3 | 0.47 | 0 |
| 4 | 0.47 | 1.98 |
| 5 | 0.365 | 2.56 |
| 6 | 0.28 | 0.4 |
| 7 | 0.985 | 2.45 |
| 8 | 0.95 | 0.24 |

ทางผู้วิจัยได้นำค่า Error ตามตารางที่ 6.7 มาวาดกราฟ Error แนวแกนดังรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 แสดงการ Plot ค่า Error สมบูรณ์ในแนวแกน X,Y จากตำแหน่งทั้ง 8

ตารางที่ 6.8 ค่า Repeatability ปลายแกนแขนหุ่นยนต์ ในระนาบ X,Y

| ตำแหน่ง | Repeatability | |
|---------|---------------|-------|
| | X | Y |
| 1 | 0.42 | 0.14 |
| 2 | 0.07 | 0.35 |
| 3 | 0.31 | 0.21 |
| 4 | 0.08 | 0.05 |
| 5 | 0.21 | 0.28 |
| 6 | 0.29 | 0.16 |
| 7 | 0.46 | 0.33 |
| 8 | 0.25 | 0.21 |
| เฉลี่ย | 0.261 | 0.261 |

สรุปผลการทดลองหา Error แนวแกน

จากตารางค่าความผิดพลาด เฉลี่ย ทั้งในแกน X และ Y มากกว่า 2.5 มิลลิเมตร โดยมีค่า Repeatability ในแกน X และ แกน Y เท่ากับ 0.26 มิลลิเมตร ซึ่งทั้งค่า Error มีค่าสูงเกินไป และ ค่า Repeatability มีค่าต่ำเกินไป จึงต้องทำการแก้ไขระบบเพื่อลดค่า Error ลง และเพิ่มค่า Repeatability ให้เข้าใกล้ 1

การออกแบบการทดลองหา Error รอบแกน x, y

ขั้นที่สองทดสอบการเคลื่อนที่แนวมุมรอบแกน โดยหลักการทำงานเป็นการทำงานแบบเคลื่อนที่ปลายแขนกลจากจุดอยู่นิ่งให้ปลายแขนวิ่งจากจุดปลายที่ $x = 176, y = 0$ ไปยังตำแหน่งเป้าหมายต่างๆ ดังตารางที่ 6.3 แล้วกลับมาที่ $x = 176, y = 0$ ไปกลับ 20 ครั้ง ดังตารางที่ 6.20

และ ลักษณะปลายแขนกล และ แผ่น Grid ตรวจสอบตำแหน่งจะเป็นดังตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.9 ตำแหน่งเป้าหมายเชิงมุมทั้ง 12 จุดรอบแกน x และ y

| ตำแหน่งที่ | ตำแหน่งเป้าหมาย หมุนรอบ แกน x (องศา) | ตำแหน่งเป้าหมาย หมุนรอบ แกน y (องศา) |
|------------|---|---|
| 1 | 0 | -10 |
| 2 | 0 | -20 |
| 3 | 8.68 | -5.04 |
| 4 | 17.5 | -10.31 |
| 5 | 8.682 | 5.038 |
| 6 | 17.5 | 10.31 |
| 7 | 0 | 10 |
| 8 | 0 | 20 |
| 9 | -8.68 | 5.04 |
| 10 | -17.5 | 10.31 |
| 11 | -8.68 | -5.04 |
| 12 | -17.5 | -10.31 |

ตารางที่ 6.10 ค่ามุมของปลายแขนหุ่นยนต์ ในแนวรอบแกน X, Y ทั้ง 12 ตำแหน่งจำนวน 20 ครั้ง

| ครั้งที่ | ตำแหน่งที่ 1 | | ตำแหน่งที่ 2 | | ตำแหน่งที่ 3 | | ตำแหน่งที่ 4 | | ตำแหน่งที่ 5 | | ตำแหน่งที่ 6 | |
|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | รอบแกน X | รอบแกน Y |
| 1 | -6.35 | -11.43 | -4.9 | -20.09 | 4.07 | -7.86 | 15.77 | -10.29 | 6.351 | 3.58 | 12.90 | 9.11 |
| 2 | -4.06 | -10.5 | -5.86 | -20.07 | 6.05 | -7.52 | 17.41 | -10.4 | 7.10 | 3.03 | 13.23 | 8.20 |
| 3 | -5 | -10.47 | -5.1 | -20.16 | 5.86 | -7.63 | 14.95 | -11.86 | 6.52 | 2.96 | 12.81 | 9.04 |
| 4 | -5.6 | -10.46 | -4.25 | -20.22 | 6.15 | -7.75 | 16.05 | -11.97 | 6.34 | 3.54 | 12.87 | 9.09 |
| 5 | -6.2 | -10.66 | -3.51 | -20.16 | 6.17 | -7.58 | 16.18 | -11.51 | 7.20 | 3.54 | 13.41 | 7.62 |
| 6 | -4.66 | -10.66 | -2.62 | -20.1 | 5.6 | -7.62 | 14.77 | -11.45 | 7.11 | 4 | 12.84 | 9.34 |
| 7 | -6.22 | -10.73 | -1.79 | -20.28 | 6 | -7.73 | 17.13 | -12.1 | 7.36 | 4.05 | 12.72 | 9.35 |
| 8 | -5.6 | -10.74 | -1.14 | -20.27 | 5.56 | -7.86 | 17.71 | -12.26 | 7.28 | 4.58 | 12.43 | 9.10 |
| 9 | -5.49 | -10.53 | -0.95 | -20.09 | 6.08 | -7.8 | 17.31 | -12.13 | 7.15 | 4.24 | 12.9 | 9.44 |
| 10 | -5.68 | -10.4 | -0.83 | -20.17 | 5.86 | -7.66 | 17.21 | -12.26 | 7.15 | 4.44 | 13.20 | 10.9 |
| 11 | -5.59 | -10.6 | -1.56 | -20.3 | 5.85 | -7.65 | 16.67 | -12.8 | 7.05 | 8.6 | 13.20 | 11.0 |
| 12 | -5.52 | -10.5 | -1.4 | -20.5 | 5.97 | -7.73 | 17.47 | -12.26 | 6.96 | 8.2 | 12.9 | 11.2 |
| 13 | -5.71 | -10.55 | -1.31 | -20.4 | 5.76 | -7.79 | 17.50 | -12.75 | 6.83 | 8.6 | 12.9 | 10.8 |
| 14 | -5.73 | -10.58 | -1.21 | -20.2 | 5.76 | -7.74 | 17.53 | -12.42 | 6.83 | 8.2 | 12.84 | 10.9 |
| 15 | -5.64 | -10.59 | -0.68 | -20.5 | 5.93 | -7.83 | 17.10 | -12.44 | 6.84 | 8.4 | 12.84 | 10.8 |
| 16 | -5.58 | -10.6 | -0.75 | -20.5 | 5.95 | -7.85 | 17.26 | -12.98 | 6.83 | 8.3 | 12.80 | 10.5 |
| 17 | -5.37 | -10.5 | -0.51 | -20.1 | 5.95 | -7.8 | 17.17 | -14.5 | 6.83 | 8.0 | 12.81 | 10.9 |
| 18 | -4.38 | -10.53 | -0.6 | -20.2 | 5.83 | -7.96 | 17.19 | -14.5 | 6.84 | 8.7 | 12.82 | 10.8 |
| 19 | -4.43 | -10.29 | -0.85 | -20.25 | 5.77 | -7.91 | 17.3 | -14.5 | 6.96 | 8.1 | 12.84 | 10.9 |
| 20 | -3.81 | -10.2 | -0.4 | -20.2 | 6.00 | -7.2 | 17.0 | -14.5 | 6.75 | 8.12 | 12.80 | 10.8 |

ตารางที่ 6.10 ค่าการจัดเก็บมุมของปลายแขนหุ่นยนต์ ในแนวรอบแกน x,y ทั้ง 12 ตำแหน่งจำนวน 20 ครั้ง (ต่อ)

| ครั้งที่ | ตำแหน่งที่ 7 | | ตำแหน่งที่ 8 | | ตำแหน่งที่ 9 | | ตำแหน่งที่ 10 | | ตำแหน่งที่ 11 | | ตำแหน่งที่ 12 | |
|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| | รอบแกน X | รอบแกน Y | รอบแกน X | รอบแกน Y | รอบแกน X | รอบแกน Y | รอบแกน X | รอบแกน Y | รอบแกน X | รอบแกน Y | รอบแกน X | รอบแกน Y |
| 1 | -3.59 | 12 | -5.68 | 23.03 | -12.82 | 5.06 | -19.76 | 9.96 | -12.27 | -3.75 | -19.88 | -10.18 |
| 2 | -3.65 | 10.05 | -5.08 | 23.24 | -13.32 | 5.91 | -20.07 | 9.47 | -12.58 | -3.12 | -19.89 | -10.37 |
| 3 | -3.71 | 10.06 | -4.82 | 23.55 | -13.13 | 5.72 | -20.32 | 9.29 | -12.87 | -2.28 | -17.78 | -10.08 |
| 4 | -3.35 | 10.26 | -5.13 | 23.22 | -13.45 | 5.69 | -21.16 | 9.43 | -12.84 | -1.81 | -19.62 | -10.29 |
| 5 | -3.22 | 10.23 | -6.49 | 21.85 | -13.45 | 6.08 | -22.24 | 9.72 | -12.1 | -1.69 | -19.97 | -10.39 |
| 6 | -4.34 | 9.86 | -5.06 | 23.2 | -13.28 | 6.27 | -22.86 | 9.89 | -12.7 | -2.41 | -19.54 | -10.44 |
| 7 | -3.62 | 10.23 | -5.25 | 23.1 | -13.62 | 6.54 | -23.45 | 9.48 | -13.17 | -2.76 | -19.41 | -10.87 |
| 8 | -3.75 | 9.84 | -5.39 | 22.99 | -13.31 | 5.85 | -21.39 | 9.93 | -12.7 | -3.78 | -19.12 | -10.89 |
| 9 | -3.6 | 10.33 | -5.16 | 23.02 | -13.24 | 6.10 | -20.68 | 10.61 | -12.8 | -3.69 | -19.53 | -11.3 |
| 10 | -3.66 | 10.03 | -4.95 | 23.18 | -13.31 | 6.09 | -21.22 | 10.13 | -12.74 | -4.31 | -20.12 | -11.36 |
| 11 | -4.03 | 9.864 | -6.34 | 22.21 | -13.12 | 6.12 | -20.98 | 10.12 | -12.67 | -4.4 | -19.8 | -11.2 |
| 12 | -4.10 | 9.93 | -5.41 | 23.13 | -13.53 | 6.42 | -20.91 | 10.23 | -12.72 | -3.98 | -20.31 | -11.51 |
| 13 | -3.55 | 10.07 | -5.4 | 23.33 | -13.23 | 6.2 | -21.04 | 10.23 | -12.72 | -3.78 | -20.43 | -11.78 |
| 14 | -3.6 | 10.24 | -5.41 | 23.19 | -13.28 | 6.02 | -20.8 | 10.02 | -12.31 | -3.97 | -20.46 | -11.61 |
| 15 | -4.36 | 9.85 | -5.10 | 23.53 | -13.42 | 5.92 | -20.53 | 10.37 | -12.33 | -4.32 | -20.43 | -11.69 |
| 16 | -3.71 | 10.11 | -4.98 | 23.45 | -13.27 | 6.37 | -20.37 | 10.78 | -12.58 | -4.1 | -20.58 | -11.62 |
| 17 | -3.54 | 10.34 | -5.22 | 23.37 | -13.35 | 6.22 | -20.13 | 10.88 | -12.29 | -4 | -20.02 | -11.73 |
| 18 | -4.87 | 10.38 | -5.24 | 23.29 | -13.1 | 6.21 | -20.08 | 11.43 | -12.29 | -4.56 | -20.46 | -11.58 |
| 19 | -3.66 | 10.52 | -4.96 | 23.74 | -12.77 | 6.34 | -20.27 | 11.65 | -11.9 | -4.11 | -20.8 | -11.87 |
| 20 | -3.9 | 10.02 | -6.46 | 22.77 | -13.42 | 6.39 | -20.3 | 11.73 | -11.77 | -4.14 | -20.23 | -12.09 |

วิธีการเก็บผลการทดลองเชิงตำแหน่งด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อหา Error รอบแกน x, y

ซึ่งทางผู้วิจัยได้จัดเก็บผลการทดลองได้ทำการถ่ายภาพในจังหวะการเข้ามุมต่างๆทั้ง 12 ตำแหน่งดังรูปที่ 6.17 โดยใช้กล้อง Webcam Logitech พร้อมเขียนโปรแกรมตรวจสอบมุมของปลายแขนกล จากนั้นทำการบันทึกค่าบนกระดาษ

| | ตำแหน่งที่ 1 | | ตำแหน่งที่ 2 | | ตำแหน่งที่ 3 | | ตำแหน่งที่ 4 | | ตำแหน่งที่ 5 | | ตำแหน่งที่ 6 | |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | หมุนรอบแกน x | หมุนรอบแกน y |
| | 0 | -10 | 0 | -20 | 8.68 | -5.04 | 17.5 | -10.31 | 8.682 | 5.038 | 17.5 | 10.31 |
| ตำแหน่ง หมุนรอบ แกน x | | | | | | | | | | | | |
| ตำแหน่ง หมุนรอบ แกน y | | | | | | | | | | | | |

รูปที่ 6.17 รูปปลายแขนหุ่นยนต์ แสดงตำแหน่งมุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ กระทำต่อระนาบแนวนอน

| | ตำแหน่งที่ 7 | | ตำแหน่งที่ 8 | | ตำแหน่งที่ 9 | | ตำแหน่งที่ 10 | | ตำแหน่งที่ 11 | | ตำแหน่งที่ 12 | |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| | หมุนรอบแกน x | หมุนรอบแกน y | หมุนรอบแกน x | หมุนรอบแกน y | หมุนรอบแกน x | หมุนรอบแกน y | หมุนรอบแกน x | หมุนรอบแกน y | หมุนรอบแกน x | หมุนรอบแกน y | หมุนรอบแกน x | หมุนรอบแกน y |
| | 0 | 10 | 0 | 20 | -8.68 | 5.04 | -17.5 | 10.31 | -8.682 | -5.038 | -17.5 | -10.31 |
| ตำแหน่ง หมุนรอบ แกน x | | | | | | | | | | | | |
| ตำแหน่ง หมุนรอบ แกน y | | | | | | | | | | | | |

รูปที่ 6.17 รูปปลายแขนหุ่นยนต์ แสดงตำแหน่งมุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ กระทำต่อระนาบแนวนอน (ต่อ)

ผลการทดลองหา **Error** รอบแกน **x, y**

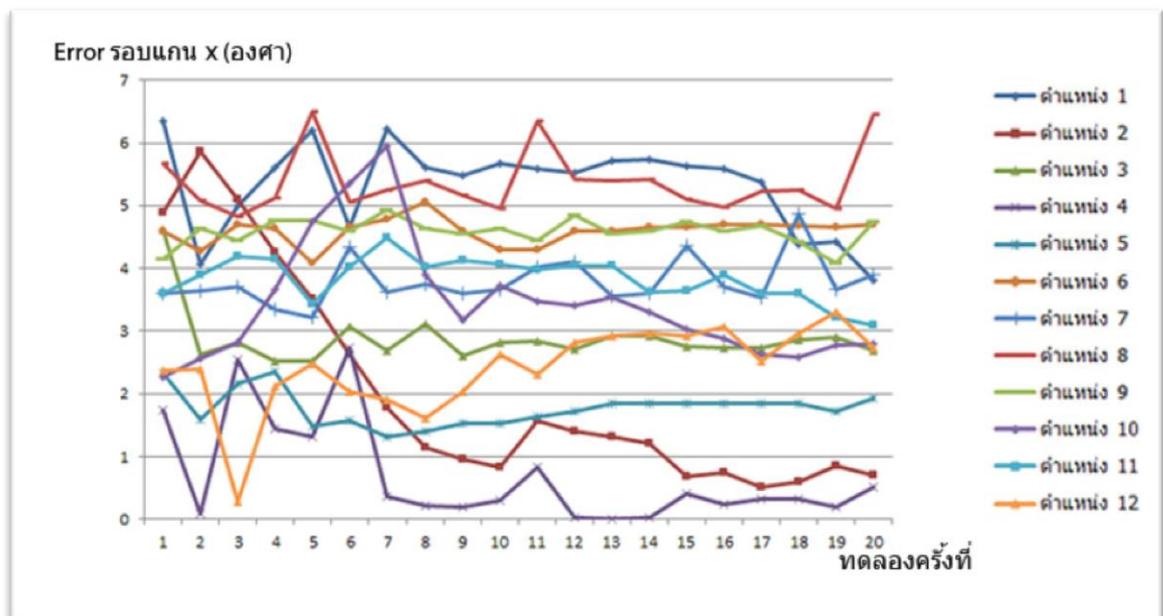
ซึ่งสามารถนำค่าที่จัดเก็บได้มาวาดกราฟได้ดัง รูปที่ 6.18 และ รูปที่ 6.19

ตารางที่ 6.11 ตารางแสดง Error รอบแกน X จำนวน 20 ครั้ง

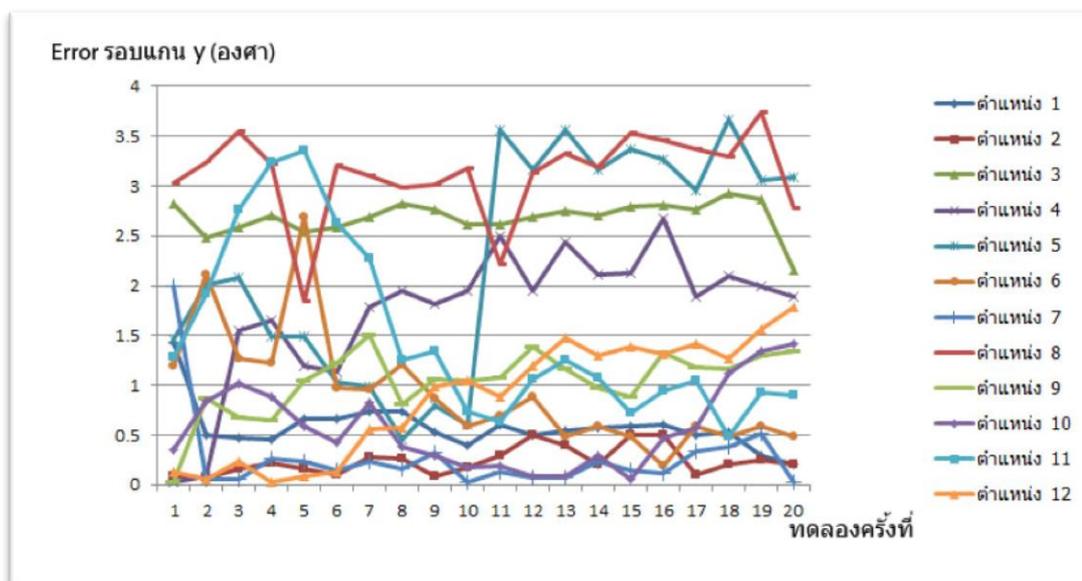
| Error รอบแกน x (mm.) | ตำแหน่ง 1 | ตำแหน่ง 2 | ตำแหน่ง 3 | ตำแหน่ง 4 | ตำแหน่ง 5 | ตำแหน่ง 6 | ตำแหน่ง 7 | ตำแหน่ง 8 | ตำแหน่ง 9 | ตำแหน่ง 10 | ตำแหน่ง 11 | ตำแหน่ง 12 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| ครั้งที่ 1 | 6.35 | 4.9 | 4.61 | 1.73 | 2.331 | 4.6 | 3.59 | 5.68 | 4.14 | 2.26 | 3.59 | 2.38 |
| ครั้งที่ 2 | 4.06 | 5.86 | 2.63 | 0.09 | 1.582 | 4.27 | 3.65 | 5.08 | 4.64 | 2.57 | 3.9 | 2.39 |
| ครั้งที่ 3 | 5 | 5.1 | 2.82 | 2.55 | 2.162 | 4.69 | 3.71 | 4.82 | 4.45 | 2.82 | 4.19 | 0.28 |
| ครั้งที่ 4 | 5.6 | 4.25 | 2.53 | 1.45 | 2.342 | 4.63 | 3.35 | 5.13 | 4.77 | 3.66 | 4.16 | 2.12 |
| ครั้งที่ 5 | 6.2 | 3.51 | 2.51 | 1.32 | 1.482 | 4.09 | 3.22 | 6.49 | 4.77 | 4.74 | 3.42 | 2.47 |
| ครั้งที่ 6 | 4.66 | 2.62 | 3.08 | 2.73 | 1.572 | 4.66 | 4.34 | 5.06 | 4.6 | 5.36 | 4.02 | 2.04 |
| ครั้งที่ 7 | 6.22 | 1.79 | 2.68 | 0.37 | 1.322 | 4.78 | 3.62 | 5.25 | 4.94 | 5.95 | 4.49 | 1.91 |
| ครั้งที่ 8 | 5.6 | 1.14 | 3.12 | 0.21 | 1.402 | 5.07 | 3.75 | 5.39 | 4.63 | 3.89 | 4.02 | 1.62 |
| ครั้งที่ 9 | 5.49 | 0.95 | 2.6 | 0.19 | 1.532 | 4.6 | 3.6 | 5.16 | 4.56 | 3.18 | 4.12 | 2.03 |
| ครั้งที่ 10 | 5.68 | 0.83 | 2.82 | 0.29 | 1.532 | 4.3 | 3.66 | 4.95 | 4.63 | 3.72 | 4.06 | 2.62 |
| ครั้งที่ 11 | 5.59 | 1.56 | 2.83 | 0.83 | 1.632 | 4.3 | 4.03 | 6.34 | 4.44 | 3.48 | 3.99 | 2.3 |
| ครั้งที่ 12 | 5.52 | 1.4 | 2.71 | 0.03 | 1.722 | 4.6 | 4.1 | 5.41 | 4.85 | 3.41 | 4.04 | 2.81 |
| ครั้งที่ 13 | 5.71 | 1.31 | 2.92 | 0 | 1.852 | 4.6 | 3.55 | 5.4 | 4.55 | 3.54 | 4.04 | 2.93 |
| ครั้งที่ 14 | 5.73 | 1.21 | 2.92 | 0.03 | 1.852 | 4.66 | 3.6 | 5.41 | 4.6 | 3.3 | 3.63 | 2.96 |
| ครั้งที่ 15 | 5.64 | 0.68 | 2.75 | 0.4 | 1.842 | 4.66 | 4.36 | 5.1 | 4.74 | 3.03 | 3.65 | 2.93 |
| ครั้งที่ 16 | 5.58 | 0.75 | 2.73 | 0.24 | 1.852 | 4.7 | 3.71 | 4.98 | 4.59 | 2.87 | 3.9 | 3.08 |
| ครั้งที่ 17 | 5.37 | 0.51 | 2.73 | 0.33 | 1.852 | 4.69 | 3.54 | 5.22 | 4.67 | 2.63 | 3.61 | 2.52 |
| ครั้งที่ 18 | 4.38 | 0.6 | 2.85 | 0.31 | 1.842 | 4.68 | 4.87 | 5.24 | 4.42 | 2.58 | 3.61 | 2.96 |
| ครั้งที่ 19 | 4.43 | 0.85 | 2.91 | 0.2 | 1.722 | 4.66 | 3.66 | 4.96 | 4.09 | 2.77 | 3.22 | 3.3 |
| ครั้งที่ 20 | 3.81 | 0.7 | 2.68 | 0.5 | 1.932 | 4.7 | 3.9 | 6.46 | 4.74 | 2.8 | 3.09 | 2.73 |

ตารางที่ 6.12 ตารางแสดง Error รอบแกน Y จำนวน 20 ครั้ง

| Error รอบ แกน y (mm.) | ตำแหน่ง 1 | ตำแหน่ง 2 | ตำแหน่ง 3 | ตำแหน่ง 4 | ตำแหน่ง 5 | ตำแหน่ง 6 | ตำแหน่ง 7 | ตำแหน่ง 8 | ตำแหน่ง 9 | ตำแหน่ง 10 | ตำแหน่ง 11 | ตำแหน่ง 12 |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| ครั้งที่ 1 | 1.43 | 0.09 | 2.82 | 0.02 | 1.458 | 1.2 | 2 | 3.03 | 0.02 | 0.35 | 1.29 | 0.13 |
| ครั้งที่ 2 | 0.5 | 0.07 | 2.48 | 0.09 | 2.008 | 2.11 | 0.05 | 3.24 | 0.87 | 0.84 | 1.92 | 0.06 |
| ครั้งที่ 3 | 0.47 | 0.16 | 2.59 | 1.55 | 2.078 | 1.27 | 0.06 | 3.55 | 0.68 | 1.02 | 2.76 | 0.23 |
| ครั้งที่ 4 | 0.46 | 0.22 | 2.71 | 1.66 | 1.498 | 1.22 | 0.26 | 3.22 | 0.65 | 0.88 | 3.23 | 0.02 |
| ครั้งที่ 5 | 0.66 | 0.16 | 2.54 | 1.2 | 1.498 | 2.69 | 0.23 | 1.85 | 1.04 | 0.59 | 3.35 | 0.08 |
| ครั้งที่ 6 | 0.66 | 0.1 | 2.58 | 1.14 | 1.038 | 0.97 | 0.14 | 3.2 | 1.23 | 0.42 | 2.63 | 0.13 |
| ครั้งที่ 7 | 0.73 | 0.28 | 2.69 | 1.79 | 0.988 | 0.96 | 0.23 | 3.1 | 1.5 | 0.83 | 2.28 | 0.56 |
| ครั้งที่ 8 | 0.74 | 0.27 | 2.82 | 1.95 | 0.458 | 1.21 | 0.16 | 2.99 | 0.81 | 0.38 | 1.26 | 0.58 |
| ครั้งที่ 9 | 0.53 | 0.09 | 2.76 | 1.82 | 0.798 | 0.87 | 0.33 | 3.02 | 1.06 | 0.3 | 1.35 | 0.99 |
| ครั้งที่ 10 | 0.4 | 0.17 | 2.62 | 1.95 | 0.598 | 0.59 | 0.03 | 3.18 | 1.05 | 0.18 | 0.73 | 1.05 |
| ครั้งที่ 11 | 0.6 | 0.3 | 2.61 | 2.49 | 3.562 | 0.69 | 0.136 | 2.21 | 1.08 | 0.19 | 0.64 | 0.89 |
| ครั้งที่ 12 | 0.5 | 0.5 | 2.69 | 1.95 | 3.162 | 0.89 | 0.07 | 3.13 | 1.38 | 0.08 | 1.06 | 1.2 |
| ครั้งที่ 13 | 0.55 | 0.4 | 2.75 | 2.44 | 3.562 | 0.49 | 0.07 | 3.33 | 1.16 | 0.08 | 1.26 | 1.47 |
| ครั้งที่ 14 | 0.58 | 0.2 | 2.7 | 2.11 | 3.162 | 0.59 | 0.24 | 3.19 | 0.98 | 0.29 | 1.07 | 1.3 |
| ครั้งที่ 15 | 0.59 | 0.5 | 2.79 | 2.13 | 3.362 | 0.49 | 0.15 | 3.53 | 0.88 | 0.06 | 0.72 | 1.38 |
| ครั้งที่ 16 | 0.6 | 0.5 | 2.81 | 2.67 | 3.262 | 0.19 | 0.11 | 3.45 | 1.33 | 0.47 | 0.94 | 1.31 |
| ครั้งที่ 17 | 0.5 | 0.1 | 2.76 | 1.89 | 2.962 | 0.59 | 0.34 | 3.37 | 1.18 | 0.57 | 1.04 | 1.42 |
| ครั้งที่ 18 | 0.53 | 0.2 | 2.92 | 2.09 | 3.662 | 0.49 | 0.38 | 3.29 | 1.17 | 1.12 | 0.48 | 1.27 |
| ครั้งที่ 19 | 0.29 | 0.25 | 2.87 | 1.99 | 3.062 | 0.59 | 0.52 | 3.74 | 1.3 | 1.34 | 0.93 | 1.56 |
| ครั้งที่ 20 | 0.2 | 0.2 | 2.16 | 1.89 | 3.082 | 0.49 | 0.02 | 2.77 | 1.35 | 1.42 | 0.9 | 1.78 |



รูปที่ 6.18 แสดงระยะมุม Error ในแนวรอบแกน x จากการจัดเก็บค่า 20 ครั้ง



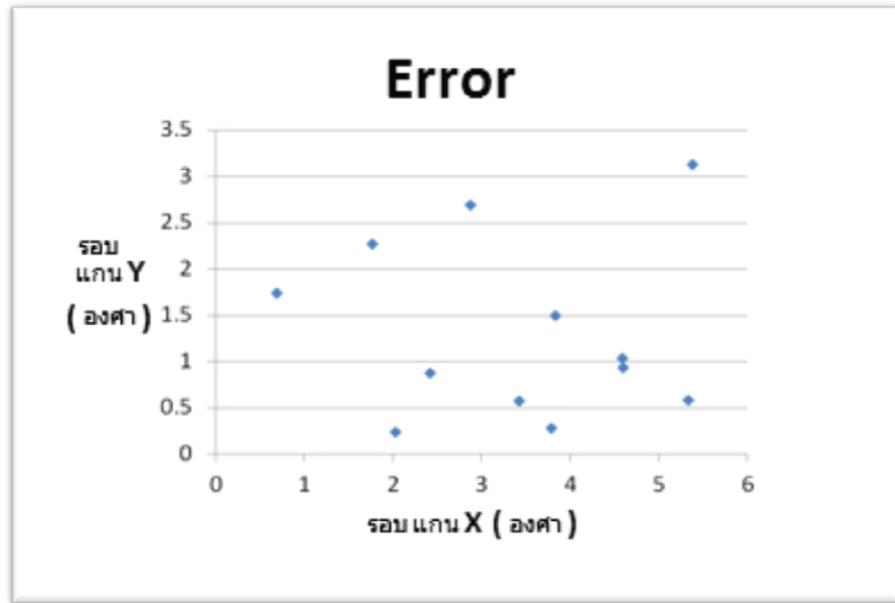
รูปที่ 6.19 แสดงระยะมุม Error ในแนวรอบแกน Y จากการจัดเก็บค่า 20 ครั้ง

ทางผู้วิจัยได้ทำการคำนวณค่าเฉลี่ย Error ของปลายแขนหุ่นยนต์ได้ค่าตามตารางที่ 6.13

ตารางที่ 6.13 ค่าเฉลี่ย Error ปลายแขนหุ่นยนต์ ในระนาบรอบแกน X และแกน Y

| ตำแหน่งที่ | Error เฉลี่ย รอบแกน X (องศา) | Error เฉลี่ย รอบแกน Y (องศา) |
|------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 5.331 | 0.576 |
| 2 | 2.026 | 0.238 |
| 3 | 2.8715 | 2.6835 |
| 4 | 0.69 | 1.741 |
| 5 | 1.76795 | 2.263 |
| 6 | 4.597 | 0.9295 |
| 7 | 3.7905 | 0.2763 |
| 8 | 5.3765 | 3.1195 |
| 9 | 4.591 | 1.036 |
| 10 | 3.428 | 0.5705 |
| 11 | 3.8375 | 1.492 |
| 12 | 2.419 | 0.8705 |

นำค่า Error ในแนวรอบแกน x และ y มาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.20 แสดงการ Plot ค่าเฉลี่ย Error สมบูรณ์ในแนวมุม รอบแกน X,Y จากตำแหน่งทั้ง 12

ตารางที่ 6.14 ค่า Repeatability ปลายแกนแขนหุ่นยนต์ ในระนาบมุมรอบแกน X และ แกน Y

| ตำแหน่ง | Repeatability | |
|---------|---------------|----------|
| | รอบแกน X | รอบแกน Y |
| 1 | 0.56 | 0.13 |
| 2 | 1.41 | 0.11 |
| 3 | 0.23 | 0.09 |
| 4 | 0.66 | 0.52 |
| 5 | 0.29 | 0.54 |
| 6 | 0.26 | 0.40 |
| 7 | 0.29 | 0.26 |
| 8 | 0.36 | 0.29 |
| 9 | 0.15 | 0.24 |
| 10 | 0.69 | 0.56 |
| 11 | 0.29 | 0.72 |
| 12 | 0.47 | 0.56 |
| เฉลี่ย | 0.471 | 0.368 |

สรุปผลการทดลองหา Error แนวรอบแกน x, y

จากตารางค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ทั้งในรอบแกน X และ Y มากกว่า 3.4 องศา โดยมีค่า Repeatability ในแกน X และ แกน Y เท่ากับ 0.471 องศา และ 0.368 องศา ซึ่งทั้งค่า Error มีค่าสูงเกินไป และ ค่า Repeatability มีค่าต่ำเกินไป จึงต้องทำการแก้ไขระบบเพื่อลดค่า Error ลง และเพิ่มค่า Repeatability ให้เข้าใกล้ 1

6.2.3 การปรับปรุงผลการทดลอง

หลังจากทำการปรับปรุงตามบทที่ 5 ส่วนปรับปรุงทางอุปกรณ์ควบคุม และจึงทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง

การออกแบบการทดลองด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อหา Error แกน x, y หลังการปรับปรุงการควบคุมมอเตอร์

ทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยมีวิธีการทดลองซ้ำเหมือน การออกแบบการทดลองด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อหา Error แกน x, y ซึ่งได้ระบุไปก่อนหน้านี้แล้ว

วิธีการเก็บผลการทดลองเชิงตำแหน่งด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อหา Error แกน x, y หลังการปรับปรุงการควบคุมมอเตอร์

ทางผู้วิจัยได้ใช้วิธีเก็บผลการทดลองโดยมีวิธีเก็บผลซ้ำเหมือน วิธีการเก็บผลการทดลองเชิงตำแหน่งด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อหา Error แกน x, y ซึ่งได้ระบุไปก่อนหน้านี้แล้ว

ผลการทดลองหา Error แนวแกนหลังปรับปรุงการควบคุมมอเตอร์

หลังจากจัดเก็บค่าการเคลื่อนที่เชิงตำแหน่งโดยการวัดด้วยตาราง Grid แล้วผลปรากฏดัง ตารางที่ 6.15

ตารางที่ 6.15 ค่าการจัดเก็บระยะของปลายแขนหุ่นยนต์ ในแนวแกน X,Y ทั้ง 8 ตำแหน่งจำนวน 20 ครั้ง
หลังปรับปรุง

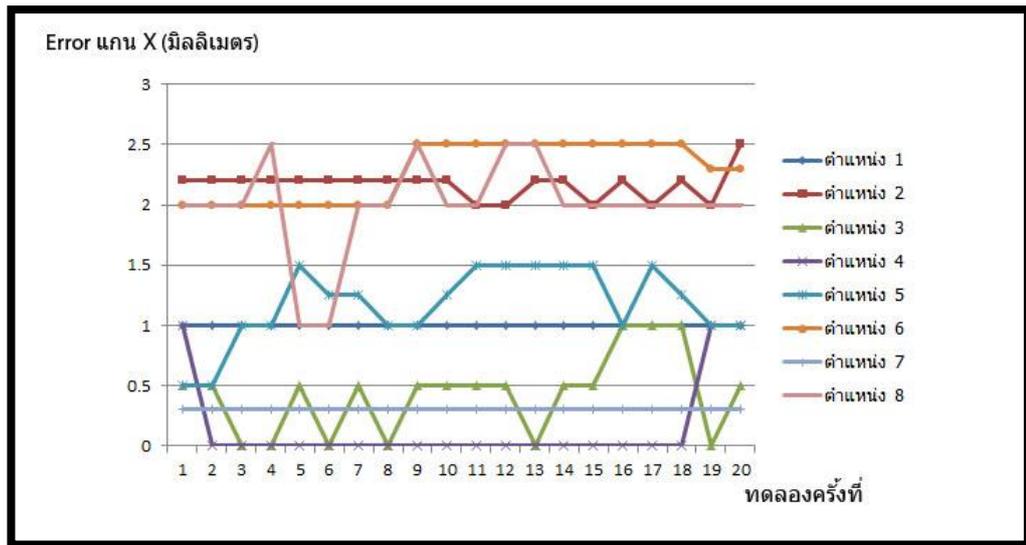
| | ตำแหน่งที่ 1 | | ตำแหน่งที่ 2 | | ตำแหน่งที่ 3 | | ตำแหน่งที่ 4 | | ตำแหน่งที่ 5 | | ตำแหน่งที่ 6 | | ตำแหน่งที่ 7 | | ตำแหน่งที่ 8 | |
|----|--------------|---|--------------|------|--------------|------|--------------|-----|--------------|----|--------------|-------|--------------|------|--------------|-------|
| | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y |
| 1 | 162 | 0 | 188.8 | -1 | 175.5 | 14.2 | 175 | -16 | 186.1 | 10 | 184.6 | -10.1 | 165.1 | 12.6 | 167.4 | -10.5 |
| 2 | 162 | 0 | 188.8 | -0.5 | 175.5 | 14.2 | 176 | -15 | 186.1 | 10 | 184.6 | -10.1 | 165.1 | 12.6 | 167.4 | -10.5 |
| 3 | 162 | 0 | 188.8 | -1 | 176 | 14.2 | 176 | -14 | 185.6 | 10 | 184.6 | -10.1 | 165.1 | 12.6 | 167.4 | -10.1 |
| 4 | 162 | 0 | 188.8 | -0.5 | 176 | 14.5 | 176 | -14 | 185.6 | 10 | 184.6 | -10.1 | 165.1 | 12.6 | 167.9 | -10.1 |
| 5 | 162 | 0 | 188.8 | -0.5 | 175.5 | 14.2 | 176 | -15 | 185.1 | 10 | 184.6 | -10.5 | 165.1 | 12.6 | 166.4 | -10.5 |
| 6 | 162 | 0 | 188.8 | -0.5 | 176 | 14.2 | 176 | -15 | 185.3 | 10 | 184.6 | -10.5 | 165.1 | 12.6 | 166.4 | -10.5 |
| 7 | 162 | 0 | 188.8 | -0.5 | 175.5 | 14.2 | 176 | -14 | 185.3 | 10 | 184.6 | -10.5 | 165.1 | 12.6 | 167.4 | -10.9 |
| 8 | 162 | 0 | 188.8 | -0.5 | 176 | 14.2 | 176 | -15 | 185.6 | 10 | 184.6 | -10.5 | 165.1 | 12.6 | 167.4 | -10.9 |
| 9 | 162 | 0 | 188.8 | -1 | 175.5 | 14.2 | 176 | -14 | 185.6 | 10 | 184.1 | -10.5 | 165.1 | 12.6 | 167.9 | -11.1 |
| 10 | 162 | 0 | 188.8 | -0.5 | 175.5 | 14.2 | 176 | -14 | 185.3 | 10 | 184.1 | -10.5 | 165.1 | 12.3 | 167.4 | -11.1 |
| 11 | 162 | 0 | 189 | -0.5 | 175.5 | 14.2 | 176 | -14 | 185.1 | 10 | 184.1 | -10.5 | 165.1 | 12.3 | 167.4 | -10.9 |
| 12 | 162 | 0 | 189 | -0.5 | 175.5 | 14.2 | 176 | -14 | 185.1 | 10 | 184.1 | -10.5 | 165.1 | 12.3 | 167.9 | -11.1 |
| 13 | 162 | 0 | 188.8 | -0.5 | 176 | 14.2 | 176 | -14 | 185.1 | 10 | 184.1 | -10.5 | 165.1 | 12.3 | 167.9 | -10.5 |
| 14 | 162 | 0 | 188.8 | -1 | 175.5 | 14.2 | 176 | -14 | 185.1 | 10 | 184.1 | -10.5 | 165.1 | 12.3 | 167.4 | -11 |
| 15 | 162 | 0 | 189 | -1 | 175.5 | 14.2 | 176 | -14 | 185.1 | 10 | 184.1 | -10.5 | 165.1 | 12.3 | 167.4 | -10.5 |
| 16 | 162 | 0 | 188.8 | -1 | 175 | 14.2 | 176 | -14 | 185.6 | 10 | 184.1 | -10.5 | 165.1 | 12.3 | 167.4 | -10.5 |
| 17 | 162 | 0 | 189 | -1 | 175 | 14.2 | 176 | -14 | 185.1 | 10 | 184.1 | -10.5 | 165.1 | 12.3 | 167.4 | -10.5 |
| 18 | 162 | 0 | 188.8 | -0.5 | 175 | 14.2 | 176 | -14 | 185.3 | 10 | 184.1 | -10.5 | 165.1 | 12.3 | 167.4 | -10.5 |
| 19 | 162 | 0 | 189 | -1 | 176 | 14.2 | 175 | -14 | 185.6 | 10 | 184.3 | -10.5 | 165.1 | 12.3 | 167.4 | -10.5 |
| 20 | 162 | 0 | 188.5 | -0.5 | 175.5 | 14.2 | 175 | -14 | 185.6 | 10 | 184.3 | -10.5 | 165.1 | 12.3 | 167.4 | -10.5 |

ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเป้าหมายแล้วจะได้ค่า Error แกน X ดัง ตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.16 ตารางแสดง Error แนวแกน X หลังปรับปรุงการควบคุม มอเตอร์ จำนวน 20 ครั้ง

| Absolute Error แกน x (mm.) | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 | ตำแหน่งที่ 4 | ตำแหน่งที่ 5 | ตำแหน่งที่ 6 | ตำแหน่งที่ 7 | ตำแหน่งที่ 8 |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ครั้งที่ 1 | 1 | 2.2 | 0.5 | 1 | 0.5 | 2 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 2 | 1 | 2.2 | 0.5 | 0 | 0.5 | 2 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 3 | 1 | 2.2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 4 | 1 | 2.2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0.3 | 2.5 |
| ครั้งที่ 5 | 1 | 2.2 | 0.5 | 0 | 1.5 | 2 | 0.3 | 1 |
| ครั้งที่ 6 | 1 | 2.2 | 0 | 0 | 1.25 | 2 | 0.3 | 1 |
| ครั้งที่ 7 | 1 | 2.2 | 0.5 | 0 | 1.25 | 2 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 8 | 1 | 2.2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 9 | 1 | 2.2 | 0.5 | 0 | 1 | 2.5 | 0.3 | 2.5 |
| ครั้งที่ 10 | 1 | 2.2 | 0.5 | 0 | 1.25 | 2.5 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 11 | 1 | 2 | 0.5 | 0 | 1.5 | 2.5 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 12 | 1 | 2 | 0.5 | 0 | 1.5 | 2.5 | 0.3 | 2.5 |
| ครั้งที่ 13 | 1 | 2.2 | 0 | 0 | 1.5 | 2.5 | 0.3 | 2.5 |
| ครั้งที่ 14 | 1 | 2.2 | 0.5 | 0 | 1.5 | 2.5 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 15 | 1 | 2 | 0.5 | 0 | 1.5 | 2.5 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 16 | 1 | 2.2 | 1 | 0 | 1 | 2.5 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 17 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1.5 | 2.5 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 18 | 1 | 2.2 | 1 | 0 | 1.25 | 2.5 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 19 | 1 | 2 | 0 | 1 | 1 | 2.3 | 0.3 | 2 |
| ครั้งที่ 20 | 1 | 2.5 | 0.5 | 1 | 1 | 2.3 | 0.3 | 2 |

ซึ่งสามารถนำค่าที่จัดเก็บได้มาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 6.21



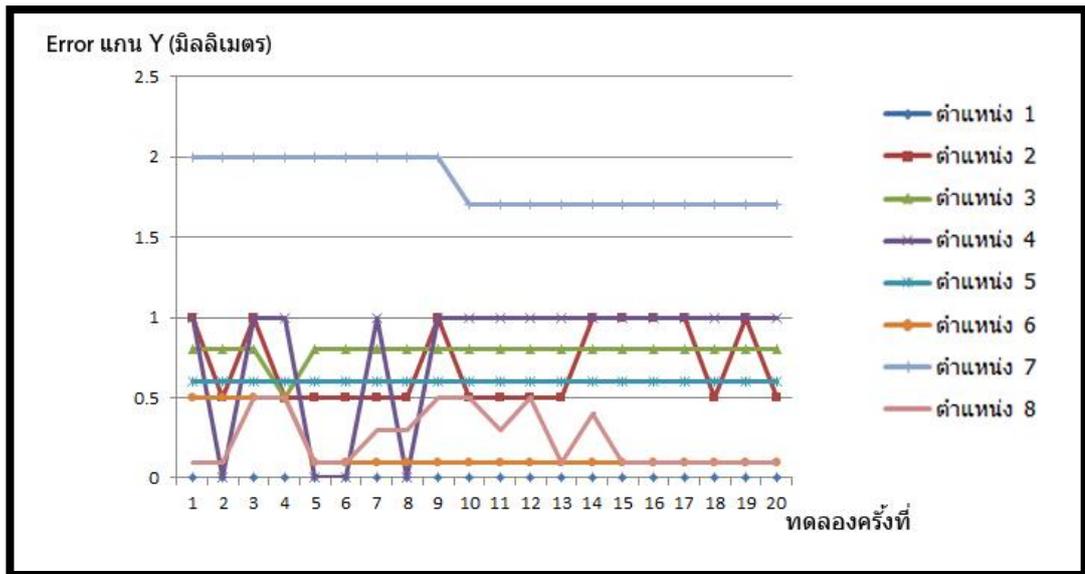
รูปที่ 6.21 แสดงระยะ Error ในแนวแกน X จากการจัดเก็บค่า 20 ครั้ง หลังปรับปรุง

ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเป้าหมายแล้วจะได้ค่า Error แกน Y ดังตารางที่ 6.17

ตารางที่ 6.17 ตารางแสดง Error แนวแกน Y หลังปรับปรุงการควบคุม มอเตอร์ จำนวน 20 ครั้ง

| Absolute Error แกน y (mm.) | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 | ตำแหน่งที่ 4 | ตำแหน่งที่ 5 | ตำแหน่งที่ 6 | ตำแหน่งที่ 7 | ตำแหน่งที่ 8 |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| ครั้งที่ 1 | 0 | 1 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.5 | 2 | 0.1 |
| ครั้งที่ 2 | 0 | 0.5 | 0.8 | 0 | 0.6 | 0.5 | 2 | 0.1 |
| ครั้งที่ 3 | 0 | 1 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.5 | 2 | 0.5 |
| ครั้งที่ 4 | 0 | 0.5 | 0.5 | 1 | 0.6 | 0.5 | 2 | 0.5 |
| ครั้งที่ 5 | 0 | 0.5 | 0.8 | 0 | 0.6 | 0.1 | 2 | 0.1 |
| ครั้งที่ 6 | 0 | 0.5 | 0.8 | 0 | 0.6 | 0.1 | 2 | 0.1 |
| ครั้งที่ 7 | 0 | 0.5 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 2 | 0.3 |
| ครั้งที่ 8 | 0 | 0.5 | 0.8 | 0 | 0.6 | 0.1 | 2 | 0.3 |
| ครั้งที่ 9 | 0 | 1 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 2 | 0.5 |
| ครั้งที่ 10 | 0 | 0.5 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 1.7 | 0.5 |
| ครั้งที่ 11 | 0 | 0.5 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 1.7 | 0.3 |
| ครั้งที่ 12 | 0 | 0.5 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 1.7 | 0.5 |
| ครั้งที่ 13 | 0 | 0.5 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 1.7 | 0.1 |
| ครั้งที่ 14 | 0 | 1 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 1.7 | 0.4 |
| ครั้งที่ 15 | 0 | 1 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 1.7 | 0.1 |
| ครั้งที่ 16 | 0 | 1 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 1.7 | 0.1 |
| ครั้งที่ 17 | 0 | 1 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 1.7 | 0.1 |
| ครั้งที่ 18 | 0 | 0.5 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 1.7 | 0.1 |
| ครั้งที่ 19 | 0 | 1 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 1.7 | 0.1 |
| ครั้งที่ 20 | 0 | 0.5 | 0.8 | 1 | 0.6 | 0.1 | 1.7 | 0.1 |

ซึ่งสามารถนำค่าที่จัดเก็บได้มาวาดกราฟได้ดัง รูปที่ 6.22

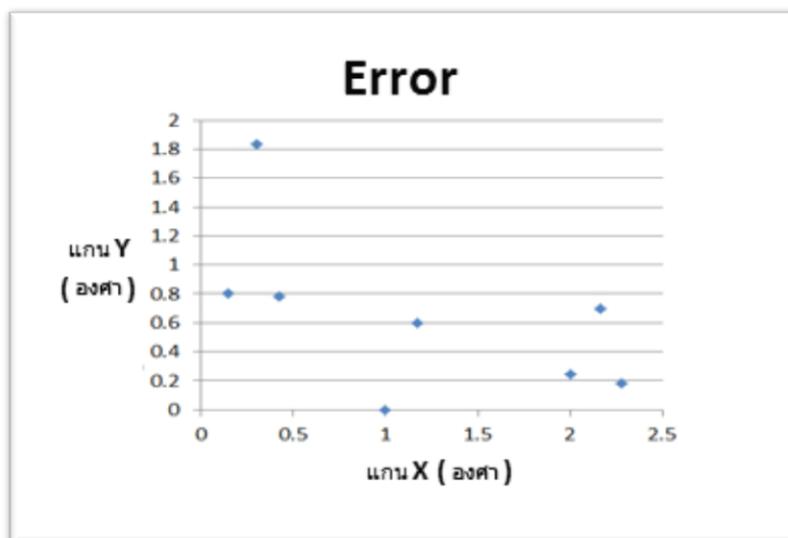


รูปที่ 6.22 แสดงระยะ Error ในแนวแกน Y จากการจับเก็บค่า 20 ครั้ง หลังปรับปรุง

สรุปผลการทดลองหาค่า Error แนวแกน หลังปรับปรุงอุปกรณ์ควบคุม

ตารางที่ 6.18 ค่า Error สัมบูรณ์แนวแกน x,y

| ตำแหน่งที่ | Error สัมบูรณ์ แกน X (มิลลิเมตร) | Error สัมบูรณ์ แกน Y (มิลลิเมตร) |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 1 | 0 |
| 2 | 2.165 | 0.7 |
| 3 | 0.425 | 0.785 |
| 4 | 0.15 | 0.8 |
| 5 | 1.175 | 0.6 |
| 6 | 2.28 | 0.18 |
| 7 | 0.3 | 1.835 |
| 8 | 2 | 0.245 |
| ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ | 1.1825 | 0.614 |



รูปที่ 6.23 แสดงการ Plot ค่า Error สมบูรณ์ในแนวแกน X,Y จากตำแหน่งทั้ง 8 หลังปรับปรุง

ตารางที่ 6.19 ค่าความสามารถในการทำงานซ้ำเฉลี่ย (Repeatability) ในแต่ละตำแหน่งหลังปรับปรุงตำแหน่ง

| ตำแหน่ง | Repeatability | |
|---------------|---------------|--------------|
| | X | Y |
| 1 | 0 | 0.047 |
| 2 | 0.082 | 0.24 |
| 3 | 0.255 | 0.028 |
| 4 | 0.142 | 0.35 |
| 5 | 0.257 | 0.081 |
| 6 | 0.224 | 0.128 |
| 7 | 0.28 | 0.148 |
| 8 | 0.2 | 0.255 |
| เฉลี่ย | 0.145 | 0.159 |

จากตารางค่าความผิดพลาด เฉลี่ย ทั้งในแกน X และ Y สูงสุดที่ 2.16 มิลลิเมตร

โดยมีค่า Repeatability ในแกน X และ แกน Y เท่ากับ 0.145 และ 0.159 มิลลิเมตร ซึ่งทั้งค่า Error มีค่าสูงเกินไป และ ค่า Repeatability มีค่าต่ำเกินไป จึงต้องทำการแก้ไขระบบเพื่อลดค่า Error ลง และเพิ่มค่า Repeatability ให้เข้าใกล้ 1

การออกแบบการทดลองด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อหา Error รอบแกน x, y หลังการปรับปรุงการควบคุมมอเตอร์

ทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยมีวิธีการทดลองซ้ำเหมือน การออกแบบการทดลองด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อหา Error รอบแกน x, y หลังการปรับปรุงการควบคุมมอเตอร์ซึ่งได้ระบุไปก่อนหน้านี้แล้ว

วิธีการเก็บผลการทดลองเชิงตำแหน่งด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อหา Error รอบแกน x, y หลังการปรับปรุงการควบคุมมอเตอร์

ทางผู้วิจัยได้ใช้วิธีเก็บผลการทดลองโดยมีวิธีเก็บผลซ้ำเหมือน วิธีการเก็บผลการทดลองเชิงตำแหน่งด้วยหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อหา Error รอบแกน x, y หลังการปรับปรุงการควบคุมมอเตอร์ซึ่งได้ระบุไปก่อนหน้านี้แล้ว

ผลการทดลองหา Error แนวรอบแกนหลังปรับปรุงการควบคุมมอเตอร์

หลังจากจัดเก็บค่าการเคลื่อนที่เชิงตำแหน่งโดยการวัดด้วยวิธีการประมวลผลภาพ แล้วผลปรากฏดังตารางที่ 6.15

ตารางที่ 6.20 ค่ามุมของปลายแขนหุ่นยนต์ ในแนวรอบแกน x,y ทั้ง 12 ตำแหน่ง หลังปรับปรุง

| ครั้งที่ | ตำแหน่งที่ 1 | | ตำแหน่งที่ 2 | | ตำแหน่งที่ 3 | | ตำแหน่งที่ 4 | | ตำแหน่งที่ 5 | | ตำแหน่งที่ 6 | |
|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | รอบแกน X | รอบแกน Y |
| 1 | -1.63 | -9.89 | 1.46 | -17.3 | 8 | -6.96 | 16.61 | -8.61 | 9.16 | 1.33 | 20.48 | 9.21 |
| 2 | -1.5 | -9.02 | 1.3 | -16.92 | 9.72 | -6.6 | 16.98 | -8.14 | 9.47 | 0.86 | 18.01 | 8.28 |
| 3 | -2.25 | -9.52 | 1.18 | -17.28 | 8.07 | -6.21 | 16.88 | -8.18 | 9.26 | 1.96 | 20.39 | 8.97 |
| 4 | -1.6 | -9.33 | 1.3 | -17.1 | 9.25 | -5.49 | 17.19 | -8.13 | 9 | 1.41 | 20 | 8.21 |
| 5 | -2.2 | -9.69 | 1.04 | -16.61 | 8.51 | -6.54 | 16.23 | -8.56 | 9.14 | 1.86 | 20.24 | 7.49 |
| 6 | -1.56 | -8.77 | 0.49 | -16.11 | 8.34 | -7 | 16.49 | -8.35 | 9.39 | 1.55 | 19.76 | 7.55 |
| 7 | -1.85 | -9.2 | 0.07 | -16.43 | 8.4 | -6.22 | 16.47 | -8.36 | 9.31 | 1.85 | 19.94 | 7.68 |
| 8 | -1.95 | -9.48 | -0.07 | -16.15 | 8.37 | -5.95 | 16.4 | -8.35 | 8.79 | 1.28 | 20.15 | 8.02 |
| 9 | -1.93 | -9.45 | -0.1 | -16.42 | 9.07 | -5.51 | 16.61 | -8.39 | 8.68 | 1.22 | 19.87 | 7.65 |
| 10 | -2.28 | -9.21 | -0.23 | -17.3 | 8.93 | -5.49 | 17 | -7.9 | 8.63 | 1.88 | 19.66 | 8.04 |
| 11 | -1.69 | -9.43 | -0.49 | -17.94 | 9.12 | -5.67 | 16.32 | -8.14 | 8.68 | 1.83 | 19.94 | 8.36 |
| 12 | -2.44 | -9.56 | -0.67 | -18.19 | 9.32 | -5.41 | 16.38 | -8.19 | 9.08 | 1.51 | 20.24 | 7.74 |
| 13 | -2.13 | -9.44 | -0.33 | -18.4 | 9.47 | -5.55 | 16.83 | -8.51 | 8.86 | 1.46 | 20.52 | 7.05 |
| 14 | -2.41 | -9.23 | -1.33 | -18.1 | 8.54 | -6.38 | 16.59 | -8.38 | 8.61 | 1.5 | 20.09 | 6.56 |
| 15 | -2.2 | -9.31 | -1.07 | -18.17 | 8.34 | -6.07 | 16.73 | -8.33 | 8.83 | 1.26 | 20.07 | 7.09 |
| 16 | -2.14 | -9.52 | -1.67 | -18.98 | 8.54 | -6.22 | 16.81 | -8.48 | 8.94 | 1.21 | 19.36 | 6.15 |
| 17 | -2.44 | -9.289 | -1.86 | -17.96 | 9.4 | -5.31 | 16.47 | -8.72 | 8.51 | 1.76 | 20.08 | 7.19 |
| 18 | -2.51 | -8.82 | -2 | -17.76 | 8.89 | -6.22 | 16.58 | -8.45 | 9.06 | 0.49 | 19.74 | 7.71 |
| 19 | -3.16 | -9.03 | -1.79 | -17.9 | 9.6 | -5.29 | 16.78 | -8.56 | 9.23 | 0.88 | 18.92 | 8.13 |
| 20 | -3.71 | -8.67 | -1.28 | -18.27 | 7.95 | -5.47 | 17.18 | -8.24 | 9.45 | 1.7 | 20.17 | 9.52 |

ตารางที่ 6.20 ค่ามุมของปลายแขนหุ่นยนต์ในแนวรอบแกน X, Y ทั้ง 12 ตำแหน่ง หลังปรับปรุง (ต่อ)

| ครั้งที่ | ตำแหน่งที่ 7 | | ตำแหน่งที่ 8 | | ตำแหน่งที่ 9 | | ตำแหน่งที่ 10 | | ตำแหน่งที่ 11 | | ตำแหน่งที่ 12 | |
|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
| | รอบแกน X | รอบแกน Y | รอบแกน X | รอบแกน Y | รอบแกน X | รอบแกน Y | รอบแกน X | รอบแกน Y | รอบแกน X | รอบแกน Y | รอบแกน X | รอบแกน Y |
| 1 | -0.29 | 3.04 | -0.86 | 11.83 | -7.96 | 2.83 | -19.94 | 7.36 | -7.89 | -5.5 | -16.78 | -9.7 |
| 2 | -0.65 | 3.37 | -0.79 | 11.78 | -7.99 | 2.3 | -20.38 | 7.39 | -8.27 | -5.74 | -16.45 | -9.73 |
| 3 | -0.2 | 3.56 | -0.95 | 11.97 | -8.05 | 2.17 | -20.13 | 7.6 | -8.1 | -5.83 | -16.84 | -10 |
| 4 | -1.15 | 4.01 | -0.95 | 11.71 | -8.14 | 2.88 | -20.24 | 8.16 | -8.28 | -6.08 | -16.52 | -10.05 |
| 5 | -1.04 | 4.21 | -1.07 | 11.87 | -8 | 2.25 | -20.5 | 7.58 | -8.19 | -5.6 | -16.64 | -10.11 |
| 6 | -1.02 | 3.81 | -1.14 | 11.76 | -8.29 | 2.4 | -20.2 | 8.07 | -8.45 | -5.75 | -16.1 | -10.13 |
| 7 | -0.8 | 3.67 | -1.18 | 11.63 | -8.34 | 2.55 | -20.53 | 7.72 | -8.31 | -5.57 | -16 | -10.14 |
| 8 | -0.91 | 3.8 | -1.39 | 11.79 | -8.28 | 2.86 | -20.6 | 8.1 | -8.29 | -5.71 | -16.67 | -10 |
| 9 | -0.78 | 4 | -1.34 | 11.75 | -8.07 | 2.84 | -20.32 | 7.43 | -7.88 | -5.66 | -16.7 | -10.08 |
| 10 | -0.94 | 3.78 | -1 | 11.71 | -8.32 | 2.64 | -20.48 | 7.58 | -8.19 | -5.81 | -16.48 | -10.14 |
| 11 | -0.7 | 3.87 | -1.14 | 11.99 | -8.41 | 2.99 | -20.46 | 7.41 | -8.43 | -5.48 | -16.64 | -9.97 |
| 12 | -0.85 | 3.77 | -1.16 | 12.34 | -8.14 | 2.87 | -20.22 | 7.64 | -7.99 | -5.77 | -16.24 | -9.9 |
| 13 | -0.82 | 3.8 | -0.88 | 12.17 | -8.55 | 2.2 | -20.44 | 7.38 | -7.98 | -5.88 | -16.58 | -9.8 |
| 14 | -0.83 | 3.79 | -0.9 | 11.74 | -8.19 | 2.62 | -20.39 | 7.86 | -8.17 | -5.99 | -16.36 | -10.03 |
| 15 | -0.65 | 3.94 | -0.71 | 12.1 | -8.3 | 2.39 | -20.54 | 7.7 | -8.4 | -5.91 | -16.67 | -10.62 |
| 16 | -0.84 | 3.81 | -0.45 | 11.74 | -8.22 | 2.55 | -20.46 | 8.07 | -7.89 | -5.94 | -16.37 | -9.85 |
| 17 | -0.5 | 3.82 | -0.63 | 11.93 | -8.48 | 2.18 | -20.38 | 6.91 | -8.28 | -6.12 | -16.32 | -10.22 |
| 18 | -0.85 | 3.76 | -0.71 | 11.39 | -8.22 | 2.174 | -20.35 | 7.7 | -8.09 | -6.15 | -16.69 | -9.96 |
| 19 | -0.36 | 3.97 | -0.44 | 11.47 | -8.24 | 2.55 | -20.47 | 7.76 | -8.25 | -6.21 | -16.41 | -10 |
| 20 | -0.3 | 4.04 | -0.59 | 11.41 | -8.71 | 2.49 | -20.53 | 7.58 | -8.06 | -5.98 | -16.69 | -10.24 |

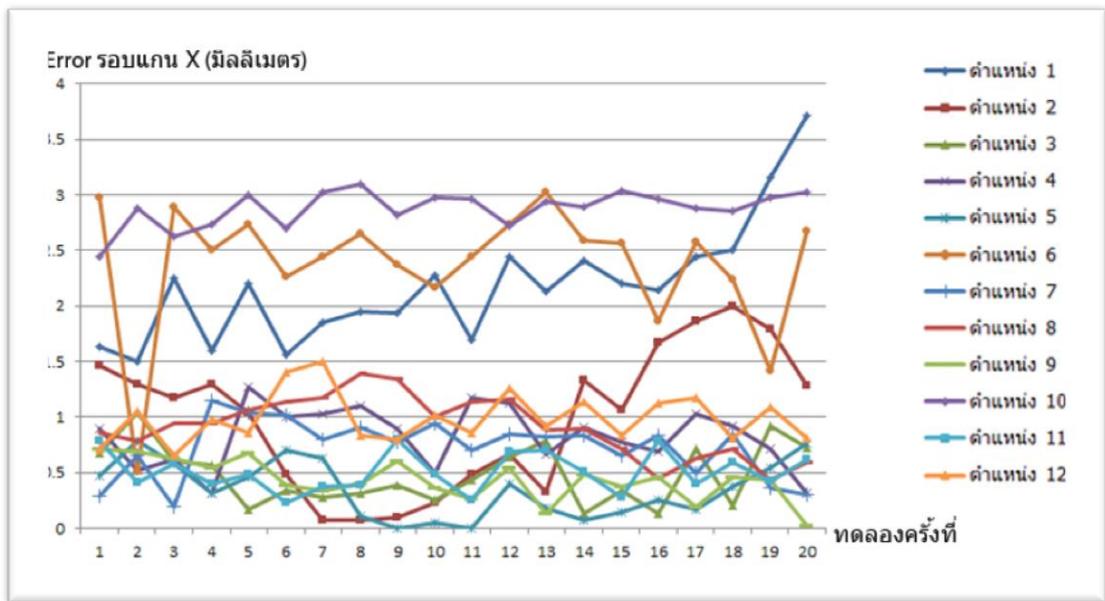
ซึ่งสามารถนำค่าที่จัดเก็บได้มาวาดกราฟได้ดัง รูปที่ 6.24 และ รูปที่ 6.25

ตารางที่ 6.21 ตารางแสดง Error รอบแกน X หลังจากปรับปรุง จำนวน 20 ครั้ง

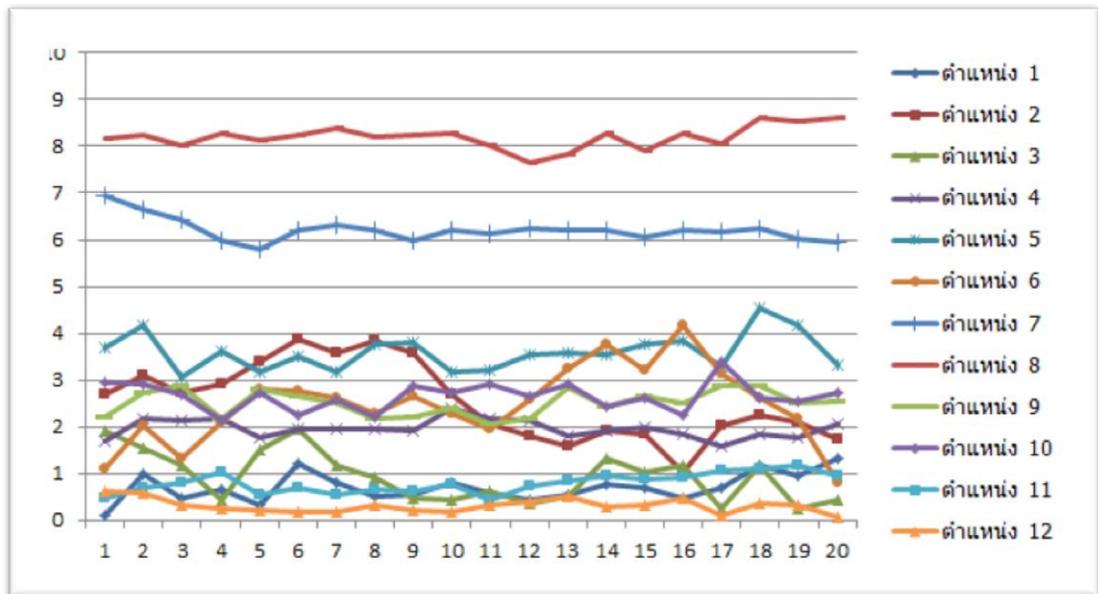
| Error รอบแกน x (mm.) | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 | ตำแหน่งที่ 4 | ตำแหน่งที่ 5 | ตำแหน่งที่ 6 | ตำแหน่งที่ 7 | ตำแหน่งที่ 8 | ตำแหน่งที่ 9 | ตำแหน่งที่ 10 | ตำแหน่งที่ 11 | ตำแหน่งที่ 12 |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| ครั้งที่ 1 | 1.63 | 1.46 | 0.68 | 0.89 | 0.478 | 2.98 | 0.29 | 0.86 | 0.72 | 2.44 | 0.79 | 0.72 |
| ครั้งที่ 2 | 1.5 | 1.3 | 1.04 | 0.52 | 0.788 | 0.51 | 0.65 | 0.79 | 0.69 | 2.88 | 0.41 | 1.05 |
| ครั้งที่ 3 | 2.25 | 1.18 | 0.61 | 0.62 | 0.578 | 2.89 | 0.2 | 0.95 | 0.63 | 2.63 | 0.58 | 0.66 |
| ครั้งที่ 4 | 1.6 | 1.3 | 0.57 | 0.31 | 0.318 | 2.5 | 1.15 | 0.95 | 0.54 | 2.74 | 0.4 | 0.98 |
| ครั้งที่ 5 | 2.2 | 1.04 | 0.17 | 1.27 | 0.458 | 2.74 | 1.04 | 1.07 | 0.68 | 3 | 0.49 | 0.86 |
| ครั้งที่ 6 | 1.56 | 0.49 | 0.34 | 1.01 | 0.708 | 2.26 | 1.02 | 1.14 | 0.39 | 2.7 | 0.23 | 1.4 |
| ครั้งที่ 7 | 1.85 | 0.07 | 0.28 | 1.03 | 0.628 | 2.44 | 0.8 | 1.18 | 0.34 | 3.03 | 0.37 | 1.5 |
| ครั้งที่ 8 | 1.95 | 0.07 | 0.31 | 1.1 | 0.108 | 2.65 | 0.91 | 1.39 | 0.4 | 3.1 | 0.39 | 0.83 |
| ครั้งที่ 9 | 1.93 | 0.1 | 0.39 | 0.89 | 0.002 | 2.37 | 0.78 | 1.34 | 0.61 | 2.82 | 0.8 | 0.8 |
| ครั้งที่ 10 | 2.28 | 0.23 | 0.25 | 0.5 | 0.052 | 2.16 | 0.94 | 1 | 0.36 | 2.98 | 0.49 | 1.02 |
| ครั้งที่ 11 | 1.69 | 0.49 | 0.44 | 1.18 | 0.002 | 2.44 | 0.7 | 1.14 | 0.27 | 2.96 | 0.25 | 0.86 |
| ครั้งที่ 12 | 2.44 | 0.67 | 0.64 | 1.12 | 0.398 | 2.74 | 0.85 | 1.16 | 0.54 | 2.72 | 0.69 | 1.26 |
| ครั้งที่ 13 | 2.13 | 0.33 | 0.79 | 0.67 | 0.178 | 3.02 | 0.82 | 0.88 | 0.13 | 2.94 | 0.7 | 0.92 |
| ครั้งที่ 14 | 2.41 | 1.33 | 0.14 | 0.91 | 0.072 | 2.59 | 0.83 | 0.9 | 0.49 | 2.89 | 0.51 | 1.14 |
| ครั้งที่ 15 | 2.2 | 1.07 | 0.34 | 0.77 | 0.148 | 2.57 | 0.65 | 0.71 | 0.38 | 3.04 | 0.28 | 0.83 |
| ครั้งที่ 16 | 2.14 | 1.67 | 0.14 | 0.69 | 0.258 | 1.86 | 0.84 | 0.45 | 0.46 | 2.96 | 0.79 | 1.13 |
| ครั้งที่ 17 | 2.44 | 1.86 | 0.72 | 1.03 | 0.172 | 2.58 | 0.5 | 0.63 | 0.2 | 2.88 | 0.4 | 1.18 |
| ครั้งที่ 18 | 2.51 | 2 | 0.21 | 0.92 | 0.378 | 2.24 | 0.85 | 0.71 | 0.46 | 2.85 | 0.59 | 0.81 |
| ครั้งที่ 19 | 3.16 | 1.79 | 0.92 | 0.72 | 0.548 | 1.42 | 0.36 | 0.44 | 0.44 | 2.97 | 0.43 | 1.09 |
| ครั้งที่ 20 | 3.71 | 1.28 | 0.73 | 0.32 | 0.768 | 2.67 | 0.3 | 0.59 | 0.03 | 3.03 | 0.62 | 0.81 |

ตารางที่ 6.22 ตารางแสดง Error รอบแกน Y หลังจากปรับปรุง จำนวน 20 ครั้ง

| Error รอบแกน y (mm.) | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 | ตำแหน่งที่ 4 | ตำแหน่งที่ 5 | ตำแหน่งที่ 6 | ตำแหน่งที่ 7 | ตำแหน่งที่ 8 | ตำแหน่งที่ 9 | ตำแหน่งที่ 10 | ตำแหน่งที่ 11 | ตำแหน่งที่ 12 |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| ครั้งที่ 1 | 0.11 | 2.7 | 1.92 | 1.7 | 3.708 | 1.1 | 6.96 | 8.17 | 2.21 | 2.95 | 0.46 | 0.61 |
| ครั้งที่ 2 | 0.98 | 3.08 | 1.56 | 2.17 | 4.178 | 2.03 | 6.63 | 8.22 | 2.74 | 2.92 | 0.7 | 0.58 |
| ครั้งที่ 3 | 0.48 | 2.72 | 1.17 | 2.13 | 3.078 | 1.34 | 6.44 | 8.03 | 2.87 | 2.71 | 0.79 | 0.31 |
| ครั้งที่ 4 | 0.67 | 2.9 | 0.45 | 2.18 | 3.628 | 2.1 | 5.99 | 8.29 | 2.16 | 2.15 | 1.04 | 0.26 |
| ครั้งที่ 5 | 0.31 | 3.39 | 1.5 | 1.75 | 3.178 | 2.82 | 5.79 | 8.13 | 2.79 | 2.73 | 0.56 | 0.2 |
| ครั้งที่ 6 | 1.23 | 3.89 | 1.96 | 1.96 | 3.488 | 2.76 | 6.19 | 8.24 | 2.64 | 2.24 | 0.71 | 0.18 |
| ครั้งที่ 7 | 0.8 | 3.57 | 1.18 | 1.95 | 3.188 | 2.63 | 6.33 | 8.37 | 2.49 | 2.59 | 0.53 | 0.17 |
| ครั้งที่ 8 | 0.52 | 3.85 | 0.91 | 1.96 | 3.758 | 2.29 | 6.2 | 8.21 | 2.18 | 2.21 | 0.67 | 0.31 |
| ครั้งที่ 9 | 0.55 | 3.58 | 0.47 | 1.92 | 3.818 | 2.66 | 6 | 8.25 | 2.2 | 2.88 | 0.62 | 0.23 |
| ครั้งที่ 10 | 0.79 | 2.7 | 0.45 | 2.41 | 3.158 | 2.27 | 6.22 | 8.29 | 2.4 | 2.73 | 0.77 | 0.17 |
| ครั้งที่ 11 | 0.57 | 2.06 | 0.63 | 2.17 | 3.208 | 1.95 | 6.13 | 8.01 | 2.05 | 2.9 | 0.44 | 0.34 |
| ครั้งที่ 12 | 0.44 | 1.81 | 0.37 | 2.12 | 3.528 | 2.57 | 6.23 | 7.66 | 2.17 | 2.67 | 0.73 | 0.41 |
| ครั้งที่ 13 | 0.56 | 1.6 | 0.51 | 1.8 | 3.578 | 3.26 | 6.2 | 7.83 | 2.84 | 2.93 | 0.84 | 0.51 |
| ครั้งที่ 14 | 0.77 | 1.9 | 1.34 | 1.93 | 3.538 | 3.75 | 6.21 | 8.26 | 2.42 | 2.45 | 0.95 | 0.28 |
| ครั้งที่ 15 | 0.69 | 1.83 | 1.03 | 1.98 | 3.778 | 3.22 | 6.06 | 7.9 | 2.65 | 2.61 | 0.87 | 0.31 |
| ครั้งที่ 16 | 0.48 | 1.02 | 1.18 | 1.83 | 3.828 | 4.16 | 6.19 | 8.26 | 2.49 | 2.24 | 0.9 | 0.46 |
| ครั้งที่ 17 | 0.711 | 2.04 | 0.27 | 1.59 | 3.278 | 3.12 | 6.18 | 8.07 | 2.86 | 3.4 | 1.08 | 0.09 |
| ครั้งที่ 18 | 1.18 | 2.24 | 1.18 | 1.86 | 4.548 | 2.6 | 6.24 | 8.61 | 2.866 | 2.61 | 1.11 | 0.35 |
| ครั้งที่ 19 | 0.97 | 2.1 | 0.25 | 1.75 | 4.158 | 2.18 | 6.03 | 8.53 | 2.49 | 2.55 | 1.17 | 0.31 |
| ครั้งที่ 20 | 1.33 | 1.73 | 0.43 | 2.07 | 3.338 | 0.79 | 5.96 | 8.59 | 2.55 | 2.73 | 0.94 | 0.07 |



รูปที่ 6.24 แสดงระยะมุม Error ในแนวรอบแกน X จากการจัดเก็บค่า 20 ครั้ง หลังปรับปรุง



รูปที่ 6.25 แสดงระยะมุม Error ในแนวรอบแกน Y จากการจัดเก็บค่า 20 ครั้ง หลังปรับปรุง

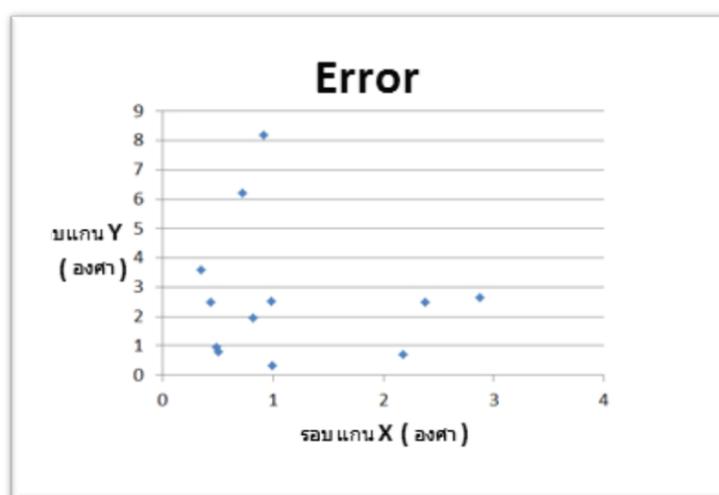
สรุปผลการทดลองหาค่า Error แนวรอบแกน x, y หลังปรับปรุงอุปกรณ์ควบคุม

ทางผู้วิจัยได้ทำการเก็บค่า Error รอบแกนของปลายแขนหุ่นยนต์ได้ค่าตาม ตารางที่ 6.23

ตารางที่ 6.23 ค่าเฉลี่ย Error ปลายแกนแขนหุ่นยนต์หลังปรับปรุง ในระนาบรอบแกน X และแกน Y

| ตำแหน่งที่ | Error เฉลี่ย รอบ แกน X (องศา) | Error เฉลี่ย รอบ แกน Y (องศา) |
|------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 2.179 | 0.70705 |
| 2 | 0.9865 | 2.5355 |
| 3 | 0.4855 | 0.938 |
| 4 | 0.8235 | 1.9615 |
| 5 | 0.352 | 3.598 |
| 6 | 2.3815 | 2.48 |
| 7 | 0.724 | 6.209 |
| 8 | 0.914 | 8.196 |
| 9 | 0.438 | 2.5033 |
| 10 | 2.878 | 2.66 |
| 11 | 0.5105 | 0.794 |
| 12 | 0.9925 | 0.3075 |

นำค่า Error ในแนวรอบแกน x และ y มาวาดกราฟได้ดัง รูปที่ 6.26



รูปที่ 6.26 แสดงค่าเฉลี่ย Error สมบูรณ์หลังปรับปรุงในแนวมุม รอบแกน X,Y จากตำแหน่งทั้ง 12 จุด

ตารางที่ 6.24 ค่า Repeatability ปลายแกนแขนหุ่นยนต์ ในระนาบมุมรอบแกน X และ แกน Y หลัง
ปรับปรุง

| ตำแหน่ง | Repeatability | |
|---------|----------------|----------------|
| | รอบแกน X(องศา) | รอบแกน Y(องศา) |
| 1 | 0.381 | 0.239 |
| 2 | 0.946 | 0.702 |
| 3 | 0.485 | 0.464 |
| 4 | 0.229 | 0.153 |
| 5 | 0.25 | 0.302 |
| 6 | 0.38 | 0.627 |
| 7 | 0.21 | 0.158 |
| 8 | 0.21 | 0.176 |
| 9 | 0.147 | 0.227 |
| 10 | 0.124 | 0.229 |
| 11 | 0.147 | 0.175 |
| 12 | 0.183 | 0.142 |
| เฉลี่ย | 0.309 | 0.299 |

จากตารางค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ทั้งในรอบแกน X และ Y เท่ากับ 0.969 องศา และ 3.27 องศา และมีค่าสูงสุดที่ 5.3 องศาตามลำดับ ซึ่งมีขนาดที่ไม่มากเกินไปที่จะทำให้การติดเพชรผิดพลาด โดยมีค่า Repeatability ในแกน X และ แกน Y เท่ากับ 0.309 และ 0.299 ค่า Repeatability มีค่าต่ำเกินไป จึงต้องทำการแก้ไขระบบเพื่อเพิ่มค่า Repeatability ให้เข้าใกล้ 1

สรุปผลการเปรียบเทียบค่า Error , Repeatability ก่อนและหลังการปรับปรุง Motor Controller Board

ทางผู้วิจัยได้ทำการสรุปผลการเปรียบเทียบค่า Error และ Repeatability ดังตารางที่ 6.25

ตารางที่ 6.25 เปรียบเทียบ ค่าเฉลี่ย Error สัมบูรณ์ ก่อนและหลังการเปลี่ยนแผงวงจรควบคุมมอเตอร์

| ค่าสัมบูรณ์ Error | Error ก่อน เปลี่ยนบอร์ด Motor Control | Error หลังเปลี่ยน บอร์ด Motor Control | ส่วนต่าง (Error ก่อน – Error หลัง) | ส่วนต่าง คิดเป็น % (Error ก่อน – Error หลัง/Error หลัง/ Error ก่อน *100) |
|-------------------|---|---|--|---|
| ตำแหน่งแกน X | 1.42 | 1.182 | 0.23 | 16.72 |
| ตำแหน่งแกน Y | 0.53 | 0.61 | -0.08 | -15.84 |
| ตำแหน่งรอบแกน X | 3.41 | 0.96 | 2.36 | 71.63 |
| ตำแหน่งรอบแกน Y | 1.25 | 3.27 | -1.89 | -160.55 |

จาก ตารางที่ 6.25 ค่า Error หลังจากปรับปรุงมีค่าดีขึ้นในแนวแกนและแนวรอบแกนเท่ากับ 0.1535 มิล และ 0.474 องศา ตามลำดับ

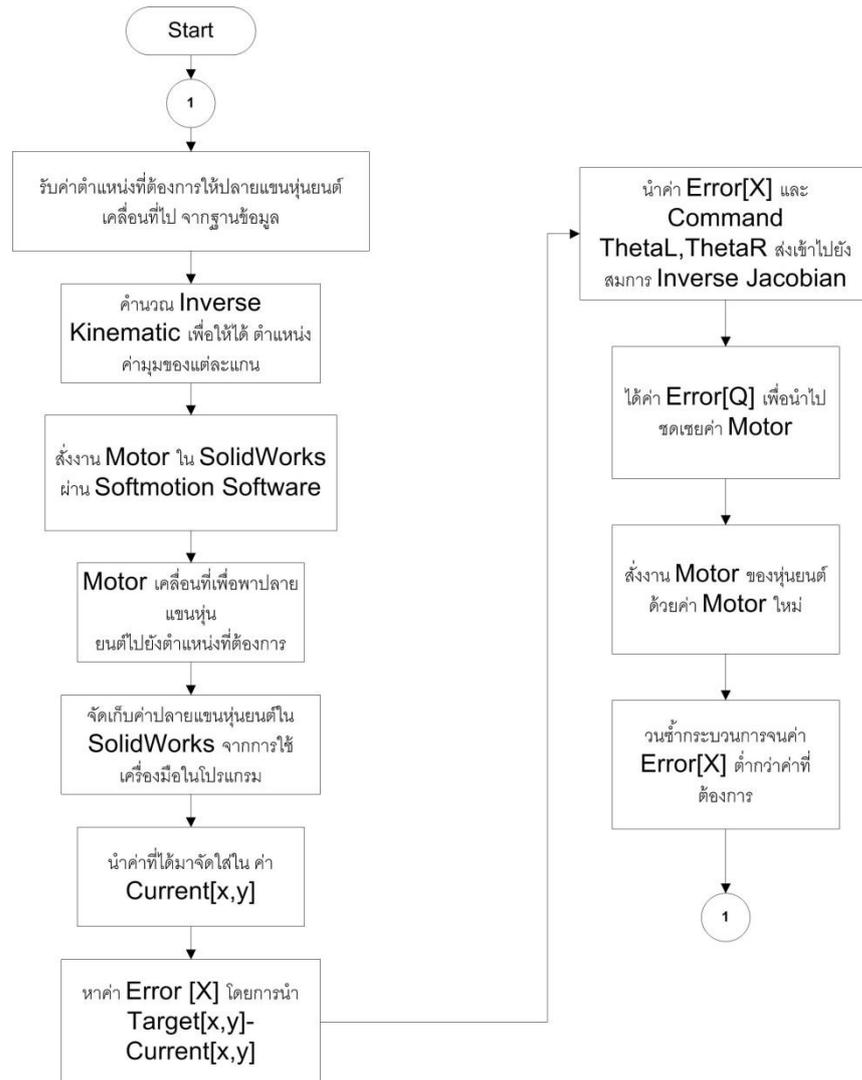
ตารางที่ 6.26 เปรียบเทียบ ค่าเฉลี่ย Repeatability ก่อนและหลังการเปลี่ยน Motor Controller Board

| ค่าเฉลี่ย Repeatability Error | Repeatability Error ก่อนเปลี่ยนบอร์ด Motor Control | Repeatability Error หลังเปลี่ยนบอร์ด Motor Control | ส่วนต่าง (Repeatability Error ก่อน – Repeatability หลัง) | ส่วนต่าง คิดเป็น % (Repeatability Error ก่อน – Repeatability หลัง/ Repeatability Error ก่อน *100) |
|-------------------------------|--|--|--|---|
| ตำแหน่งแกน X | 0.26 | 0.14 | 0.11 | 44.44 |
| ตำแหน่งแกน Y | 0.26 | 0.15 | 0.10 | 39.08 |
| ตำแหน่งรอบแกน X | 0.47 | 0.30 | 0.16 | 34.39 |
| ตำแหน่งรอบแกน Y | 0.36 | 0.29 | 0.06 | 18.75 |

จากตารางที่ 6.26 ค่า Repeatability Error หลังจากปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยในแนวแกนและแนวรอบแกน เท่ากับ 0.218 และ 0.231 ตามลำดับ

6.2.4 การประยุกต์ใช้หลักการ อินเวอร์ส จาโคเบียน เพื่อการลด Error ปลายแขนกล

จากค่า Error ซึ่งยังคงมีค่า Error ที่สูงกว่าที่ระบุไว้ใน ที่ ± 0.3 mm. ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการชดเชยค่า ความผิดพลาดของปลายตำแหน่งแขนกลด้วยหลักการ 3.4.4 การวิเคราะห์ โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 6.27



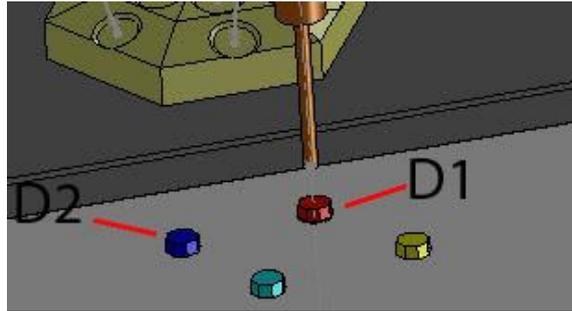
รูปที่ 6.27 ขั้นตอนการหา อินเวอร์ส จาโคเบียน และการนำค่าไปชดเชยมุมต้นก้ำล้ง

การทดลอง อินเวอร์ส จาโคเบียน

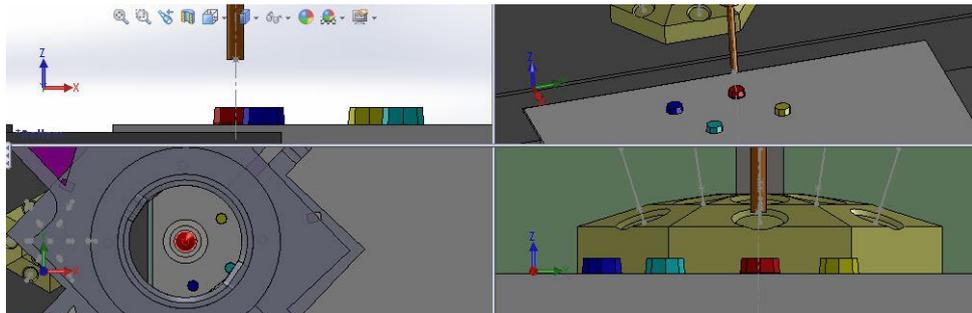
ทางผู้วิจัยได้ทำการทดลอง จำลองสถานการณ์ การทำงานของสมการทดสอบความถูกต้องของสมการ ซึ่งผู้วิจัยสามารถกำหนดค่าได้ต่างๆที่เป็นตัวแปรได้ แบบแม่นยำตรง (Exactly) เช่น กำหนดมุมต้นก้ำล้ง ได้ตามค่าที่กำหนดได้แม่นยำ แต่ทางปฏิบัติผู้วิจัยต้องนำสมการ อินเวอร์ส จาโคเบียน ไปใช้จริงกับ หุ่นยนต์เท่านั้น ซึ่งจะเป็นกรณีที่ผู้วิจัยไม่สามารถกำหนดมุมของต้นก้ำล้งได้แม่นยำ เช่น ผู้วิจัยสั่ง มอเตอร์ต้นก้ำล้งตามมุมที่ต้องการได้แต่ทางปฏิบัติปลายแขนหุ่นยนต์อาจจะไม่เป็นไปตามที่คำนวณ ไว้ เช่น เกิดจากการโก่งงอของแขนหุ่นยนต์ เป็นต้น

การออกแบบการทดลอง อินเวอร์ส จาโคเบียน

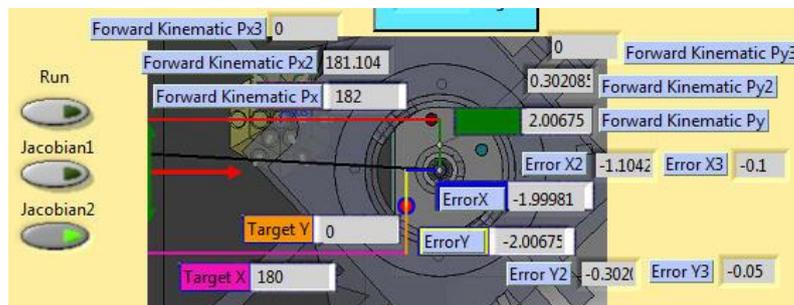
หลังจากหัวข้อ การเขียน โปรแกรมเพื่อส่ง ชุดคำสั่ง ในบทที่ 5 ซึ่งได้ออกแบบ โปรแกรมให้เคลื่อนที่ เข้าหาตำแหน่ง $X = 180$ $Y = 10$ จำนวน 20 ครั้งแล้วหาค่า Error เฉลี่ย และ % การลดลงของ Error



รูปที่ 6.28 ตำแหน่งเป้าหมายการเคลื่อนที่ D1,D2



รูปที่ 6.29 แสดงการเคลื่อนที่ที่ผู้เข้าหาค่าที่ถูกต้องในแต่ละครั้งที่ Run คำสั่ง อินเวอร์ส จาโคเบียน



รูปที่ 6.30 หน้าจอส่วนติดต่อผู้ใช้ และตรวจสอบ ค่า Error ของการ Run อินเวอร์ส จาโคเบียน

วิธีการเก็บผลการทดลอง อินเวอร์ส จาโคเบียน

ผู้วิจัยใช้เครื่องมือใน โปรแกรม Solidworks ทำการจัดเก็บค่าตำแหน่งในแกน X,Y ในแต่ละรอบของการส่งคำสั่ง อินเวอร์ส จาโคเบียน แล้วนำมาบันทึกใน ตารางที่ 6.28

ผลการทดลอง อินเวอร์ส จาโคเบียน

ผู้วิจัยได้ทำการส่ง Run ชุดคำสั่งการเคลื่อนที่ที่แขนกลด้วย อินเวอร์ส จาโคเบียน ดังมีผลดัง ตารางที่ 6.27 และ ตารางที่ 6.28

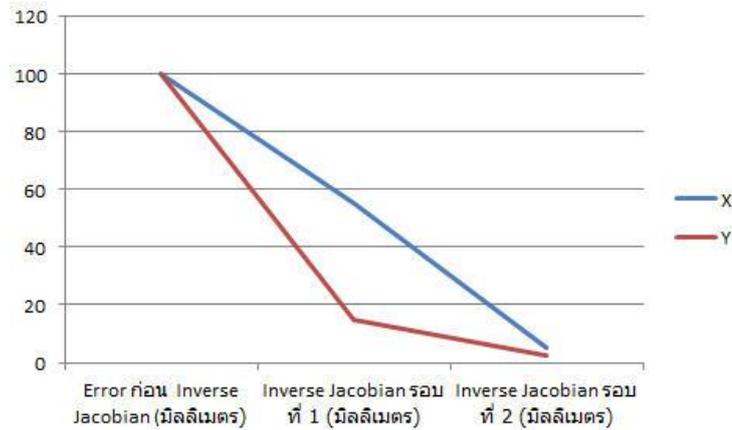
ตารางที่ 6.27 แสดงจังหวะการเคลื่อนที่ของแต่ละรอบการ Run อินเวอร์ต จาโคเบียน

| รอบ | แกน X | แกน Y |
|--------------|-------|-------|
| ก่อน Run | | |
| Run รอบที่ 1 | | |
| Run รอบที่ 2 | | |

ตารางที่ 6.28 ค่า Error และหลังการใช้ อินเวอร์ส จาโคเบียน ที่ตำแหน่งเป้าหมาย ตำแหน่ง X = 180, Y = 10

| รอบ | Error ก่อน อินเวอร์ส จาโคเบียน (มิลลิเมตร) | | อินเวอร์ส จาโคเบียน รอบที่ 1 (มิลลิเมตร) | | อินเวอร์ส จาโคเบียน รอบที่ 2 (มิลลิเมตร) | |
|--------------------|--|----------|--|----------|--|---------|
| | X | Y | X | Y | X | Y |
| 1 | -1.9998 | -2.006 | -1.10 | -0.30 | -0.1 | -0.05 |
| 2 | -1.9998 | -2.0067 | -1.104 | -0.302 | -0.102 | -0.051 |
| 3 | -1.9998 | -2.006 | -1.102 | -0.3 | -0.101 | -0.05 |
| 4 | -1.9998 | -2.005 | -1.102 | -0.301 | -0.102 | -0.05 |
| 5 | -1.9999 | -2.0065 | -1.103 | -0.302 | -0.102 | -0.051 |
| 6 | -1.9998 | -2.006 | -1.102 | -0.3 | -0.1 | -0.05 |
| 7 | -1.9999 | -2.006 | -1.104 | -0.302 | -0.101 | -0.05 |
| 8 | -1.9999 | -2.0065 | -1.103 | -0.302 | -0.102 | -0.051 |
| 9 | -1.9998 | -2.0067 | -1.104 | -0.302 | -0.102 | -0.051 |
| 10 | -1.9998 | -2.006 | -1.10 | -0.30 | -0.1 | -0.05 |
| 11 | -1.9999 | -2.0065 | -1.103 | -0.302 | -0.102 | -0.051 |
| 12 | -1.9998 | -2.0067 | -1.104 | -0.302 | -0.102 | -0.051 |
| 13 | -1.9999 | -2.0065 | -1.103 | -0.302 | -0.102 | -0.051 |
| 14 | -1.9998 | -2.006 | -1.10 | -0.30 | -0.1 | -0.05 |
| 15 | -1.9999 | -2.0065 | -1.103 | -0.302 | -0.102 | -0.051 |
| 16 | -1.9998 | -2.006 | -1.10 | -0.30 | -0.1 | -0.05 |
| 17 | -1.9998 | -2.006 | -1.10 | -0.30 | -0.1 | -0.05 |
| 18 | -1.9998 | -2.0067 | -1.104 | -0.302 | -0.102 | -0.051 |
| 19 | -1.9999 | -2.0065 | -1.104 | -0.302 | -0.1 | -0.05 |
| 20 | -1.9998 | -2.006 | -1.103 | -0.302 | -0.102 | -0.051 |
| ค่าเฉลี่ย | -1.99984 | -2.00624 | -1.1024 | -0.30125 | -0.1012 | -0.0505 |
| % การลดลงของ Error | 100 | 100 | 55.124 | 15.015 | 5.060 | 2.517 |

เมื่อผู้วิจัยนำค่า Error จาก ตารางที่ 6.28 มาวาดกราฟจะได้ดังรูปที่ 6.31



รูปที่ 6.31 แสดงแนวโน้มการลดลงของ Error หลังจาก Run อินเวอร์ส จาโคเบียน

สรุปผลการทดลอง อินเวอร์ส จาโคเบียน

จากรูปที่ 6.31 ค่า Error X,Y ลดลงในทุกกรอบที่ Run สมการ อินเวอร์ส จาโคเบียน แปลว่าสมการสามารถช่วยลด Error ได้อย่างดี

6.3 บทสรุป

ความถูกต้องแม่นยำตำแหน่งเป็นสิ่งที่สำคัญของหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ ในส่วนการทดลองเชิงตำแหน่งด้วยแบบจำลอง ได้ผลลัพธ์ออกมา ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ Error แกน X = 0.063 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ Error แกน Y = 0.0284 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ Error แกน Z = 0.1707 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ Error แกน Alpha = 0 องศา และ ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ Error แกน Delta = 0 องศา ซึ่งค่าออกมา น้อยมากแปลว่า สมการจลนศาสตร์ผกผัน มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้กับหุ่นยนต์ต้นแบบได้

- การทดลองความเร็ว ได้ค่าความออกมาอยู่ที่ 130 mm/s ซึ่งช้ากว่าเป้าหมายอยู่ 20 mm/s และความเร็วไม่ค่อยคงที่
- การทดลองด้วยสมการ Helix Smooth Curve และ Frenet-Serret ที่ความเร็วเชิงมุม $c = 1^\circ$ ผลการทดลองปรากฏว่า แขนหุ่นยนต์เคลื่อนไหวไปตามเส้นโค้ง เป้าหมายถูกต้อง แต่มีการกระตุ่นขณะเข้าใกล้จุด Via Point ต่างๆ เนื่องจากปัญหาการกำหนดความเร็วของแต่ละมอเตอร์ไม่เหมาะสม
- ค่า Error ทางตำแหน่งแนวแกนของหุ่นยนต์ต้นแบบ ได้ผลลัพธ์ ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ Error แนวแกน X = 1.42 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ Error แนวแกน Y = 0.53 มิลลิเมตร โดยมีค่า Repeatability Error แนวแกน x อยู่ที่ 0.261 และในแนวแกน y อยู่ที่ 0.261

- ค่า Error ทางตำแหน่งแนวมุมของหุ่นยนต์ต้นแบบ ได้ผลลัพธ์ Error แนวรอบแกน $x = 3.416$ องศาและในแนวแกน $y = 1.255$ องศา โดยมีค่า Repeatability Error แนวรอบแกน x อยู่ที่ 0.471 และรอบแกน y อยู่ที่ 0.368
- ค่า Error ทางตำแหน่งแนวแกนของหุ่นยนต์ต้นแบบหลังปรับปรุง ได้ผลลัพธ์ ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์แนวแกน $X = 1.1825$ มิลลิเมตร , ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์แนวแกน $Y = 0.614$ มิลลิเมตร โดยมีค่า Repeatability Error แนวแกน x อยู่ที่ 0.145 และในแนวแกน y อยู่ที่ 0.159
- ค่า Error ทางตำแหน่งแนวมุมของหุ่นยนต์ต้นแบบหลังปรับปรุง ได้ผลลัพธ์ Error แนวรอบแกน $x = 1.047$ องศาและในแนวแกน $y = 2.69$ องศา โดยมีค่า Repeatability Error แนวรอบแกน x อยู่ที่ 0.309 และรอบแกน y อยู่ที่ 0.299
- ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ Error เปรียบเทียบก่อนเปลี่ยนบอร์ดและหลังเปลี่ยนบอร์ด ได้ผลลัพธ์คือ Error แนวแกน x หลังเปลี่ยนบอร์ดลดลง 0.2375 mm. และ Error แนวแกน y หลังเปลี่ยนบอร์ดลดลง -0.084 mm. Error แนวรอบแกน x หลังเปลี่ยนบอร์ดลดลง 2.367 องศา และ Error แนวรอบแกน y หลังเปลี่ยนบอร์ดลดลง -1.893 องศา
- ค่าเฉลี่ย Repeatability Error เปรียบเทียบก่อนเปลี่ยนบอร์ดและหลังเปลี่ยนบอร์ด ได้ผลลัพธ์คือ Repeatability Error แนวแกน x หลังเปลี่ยนบอร์ดลดลง 0.116 และ Repeatability Error แนวแกน y หลังเปลี่ยนบอร์ดลดลง 0.102 Repeatability Error แนวรอบแกน x หลังเปลี่ยนบอร์ดลดลง 0.162 และ Repeatability Error แนวรอบแกน y หลังเปลี่ยนบอร์ดลดลง 0.069
- การนำ อินเวอร์ส จาโคเบียน มาใช้ลดค่า Error ปลายแขนหุ่นยนต์ ได้ผลคือ จาก Error รอบแรกที่คิดเป็น 100% เมื่อ Run อินเวอร์ส จาโคเบียน Function รอบที่ 1 ค่า Error จะลดลงในแกน x เหลือ 55.124 ในแกน y เหลือ 15.015 และเมื่อ Run ในรอบที่ 2 ค่า Error จะลดลงในแกน x เหลือ 5.060 ในแกน y เหลือ 2.517

บทที่ 7 สรุปข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

7.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาการออกแบบและสร้างต้นแบบแขนหุ่นยนต์สำหรับประกอบอัญมณีเทียม โดยเริ่มจากการศึกษาความต้องการของอุตสาหกรรม ศึกษาวิธีการทำงานปกติของช่าง แปลงความต้องการของอุตสาหกรรมเป็นข้อกำหนดทางเครื่องจักร ศึกษาออกแบบกลไกที่เหมาะสม ออกแบบโครงสร้างทางกล ควบคุมหุ่นยนต์ผ่านการเขียนโปรแกรม สร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่เพื่อพิสูจน์แนวคิดและค่าการคำนวณต่างๆ และได้ทำการสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบขึ้นจริง อันจะเป็นต้นแบบให้กับนักวิจัยในการศึกษาพัฒนาต่อไป

แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากติดข้อจำกัดด้านงบประมาณและการสร้างหุ่นยนต์ต้องอาศัยขอบเขตความรู้ที่กว้างจึงทำให้ผลงานออกมายังไม่สามารถนำไปใช้ได้จริงในเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะปัญหาด้านประสิทธิภาพของมอเตอร์ ซึ่งทางผู้วิจัยได้ใช้มอเตอร์ที่มีความละเอียดต่ำ แรงบิดน้อย 5 ตัวในการทำงานจึงยังไม่สามารถเข้าถึง ค่าความละเอียดที่ต้องการ ได้แม้การคำนวณและการจำลองในคอมพิวเตอร์จะสามารถให้ค่าที่ถูกต้องได้ก็ตาม ปัญหาอีกด้านคือ ด้านความไม่แข็งแรงของโครงสร้างที่ทางผู้วิจัยใช้โครงสร้างแบบโลหะแผ่นที่มีข้อเสียคือ มีอัตราการโก่งตัวสูง แต่อย่างไรก็ตามทางผู้วิจัยได้เสนอแบบปรับปรุงทางโครงสร้างและส่วนมอเตอร์เอาไว้ที่ภาคผนวก

7.2 สำหรับข้อแนะนำและแนวทางการปรับปรุงและพัฒนา มีรายละเอียดดังนี้

1. ในการออกแบบแขนหุ่นยนต์ควรคำนึงถึงความแข็งแรง การโก่งงอ น้ำหนัก เนื่องจากถ้าออกแบบให้เล็กเกินไปแขนหุ่นยนต์ย่อมไม่แข็งแรง จึงทำให้ความแม่นยำต่ำลง
2. ควรใช้ มอเตอร์ ที่มีความละเอียดกว่านี้ เพราะว่าถ้า มอเตอร์ ไม่ละเอียดเพียงพอ สมการอินเวอร์ส จาโคเบียน จะไม่สามารถนำมาใช้ได้เพราะค่าที่คำนวณได้จะเล็กกว่า ค่าความละเอียดที่ มอเตอร์ และ Actuator ทำได้ และไม่ควรรู้เกียร์เป็นอุปกรณ์ทดความละเอียด เพราะจะเกิดปัญหา Back lack
3. ไม่ควรใช้ Bearing ทั่วไปในการทำเป็นข้อต่อของหุ่นยนต์เนื่องจากจะเกิด Repeatability Error ที่สูง

7.3 แนวทางในการพัฒนา

7.3.1 ปรับปรุงโครงสร้างทางกล

จากผลการทดลองปรากฏว่าค่า Repeatability Error ยังคงสูงอยู่ไม่สามารถลดลงได้จากการเขียนโปรแกรมหรือใช้ Sensor ช่วย ดังนั้นจำเป็นต้องออกแบบหุ่นยนต์ใหม่ โดยให้มีความแข็งแรงและใช้ Part ที่เป็นมาตรฐานมากยิ่งขึ้น และ ใช้ High Precision Bearing เพื่อลด Repeatability Error ลง

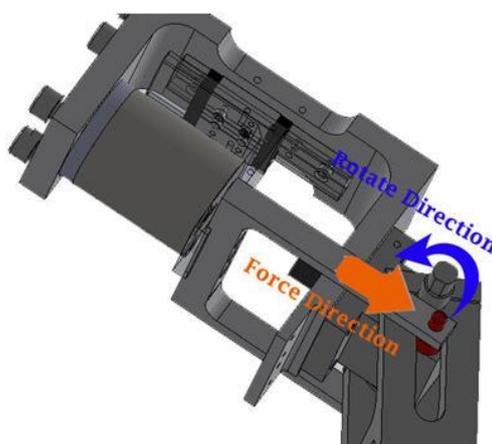
ข้อปัญหาของหุ่นยนต์ต้นแบบ

จากข้อสรุปทางโครงสร้างหุ่นยนต์ตัวต้นแบบ ประกอบด้วยข้อเสียดังนี้

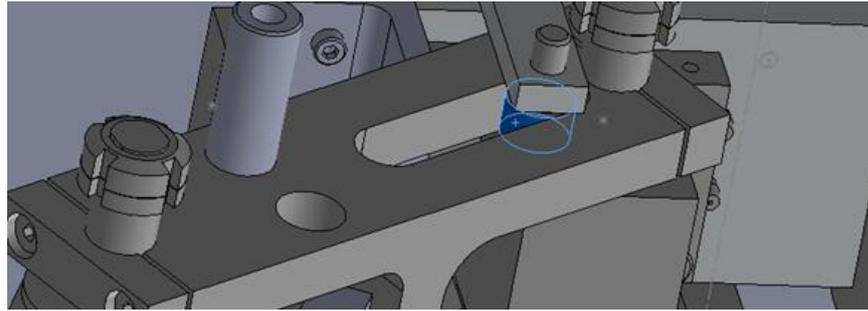
1. ใช้โครงสร้างโลหะแผ่นทำให้ต้นทุนต่ำแต่ไม่แข็งแรง
2. ไม่มีการควบคุม Alignment ทำให้การประกอบหุ่นยนต์ไม่ Precision
3. ให้มุมเอียงได้น้อย
4. การยึดกันของแกนต่างๆไม่แข็งแรง
5. เกิดการยึดของแกนที่ 5 เนื่องจากแรงจาก Sling
6. ใช้ Bearing ที่มีคุณภาพไม่ดี จึงทำให้เกิด Repeatability Error สูง
7. ใช้วัสดุคืบไม่แข็งแรงเท่าที่ควร
8. มอเตอร์ ไม่ละเอียด

แนวทางการแก้ไข

1. Direct Drive เพื่อลดการทดเฟืองและลดการเกิด Backlash ดัง รูปที่ 7.1 และ รูปที่ 7.2

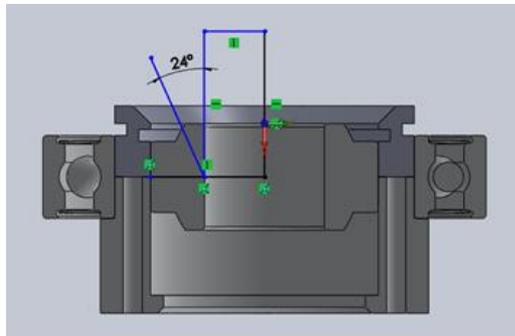


รูปที่ 7.1 การใช้แกน Slide เพื่อผลักให้เกิดการหมุน โดยไม่ผ่านอุปกรณ์แปลงหรือทอรอบ



รูปที่ 7.2 แสดงให้เห็นส่วนการ Slide โดยผ่านการชุบ electro nickel

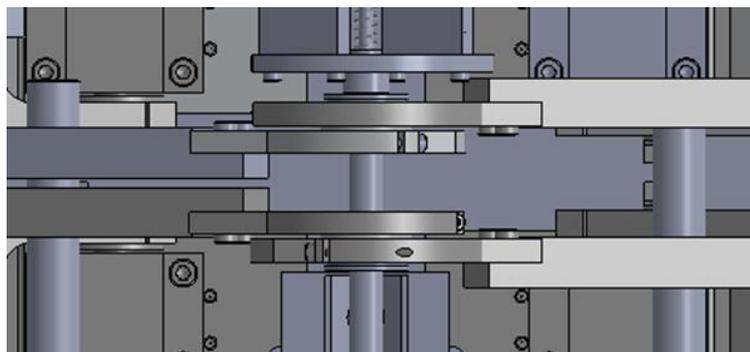
2. ปรับโครงสร้างส่วน ข้อแขน ให้ Precision มากขึ้น และสามารถให้มุมได้มากขึ้นจากเดิม 20 องศา เป็น 24 องศา ดังรูปที่ 7.3



24 degree in spec

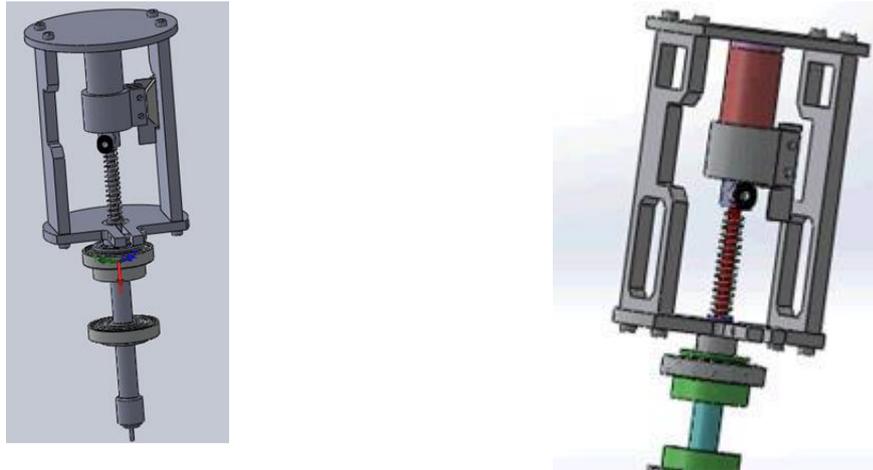
รูปที่ 7.3 โครงสร้างส่วนยึด Ball Bearing และ Roller Bearing

3. ออกแบบส่วนประสานระหว่างแกนทั้ง 5 ใหม่ให้แข็งแรงมากขึ้น



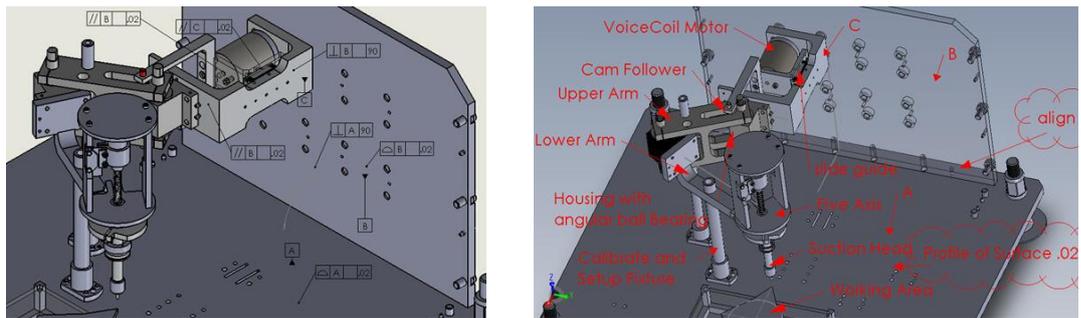
รูปที่ 7.4 แสดงส่วนของการเชื่อมกันของแกนทั้ง 5

4. ออกแบบแกนที่ 5 ใหม่เนื่องจากแบบเดิมใช้ Sling ทำให้เกิดแรงยึดขณะแกนทั้ง 4 เคลื่อนที่ไปแล้วทำให้แกนที่ 5 เอียงตามแรงยึดนั้นๆ จึงออกแบบใหม่ให้สามารถนำ Actuator ไปด้วยกับกลไกแกนที่ 5 ได้ดังรูปที่ 7.5



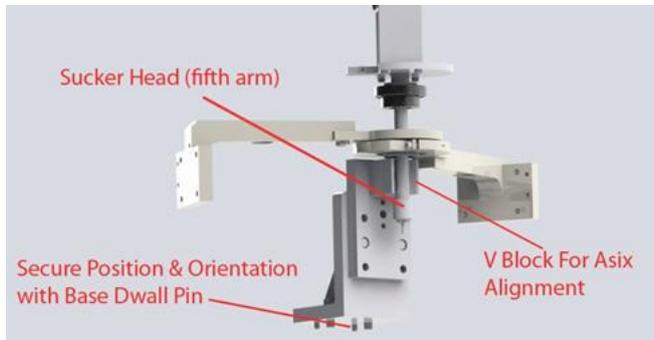
รูปที่ 7.5 การออกแบบ แกนที่ 5

- 5. สร้างการถ่ายระยะนาบเพื่อเพิ่ม Precision จากรูปที่ 7.6 ขวามือจะเป็นอธิบายว่าแต่ละระยะนาบจะส่งต่อความ Precision ระหว่างกันได้อย่างไรจนถึงส่วนปลายแขน ส่วนรูปซ้ายมือ จะเป็นการทำใบสั่งงานให้กับฝ่ายผลิต

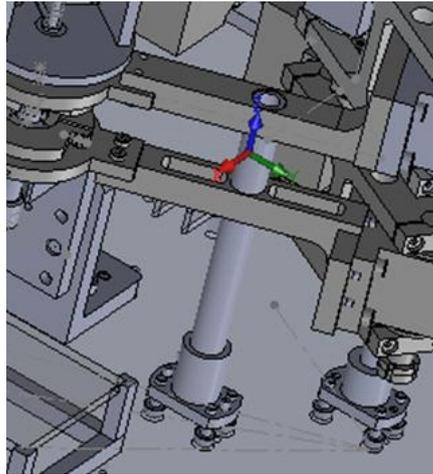


รูปที่ 7.6 ส่วนประกอบ การถ่ายระยะนาบ

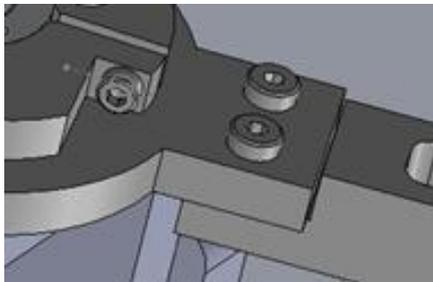
- 6. การออกแบบใช้ Fixture เข้าช่วย Alignment แขนกลในขณะประกอบจากโรงงานเพื่อเพิ่ม Precision และลดแรงเค้นภายใน ลดการโค้งงอ ดังรูปที่ 7.7 รูปที่ 7.8 และรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.7 แสดงการใช้ Fixture ที่ถ่ายระยะนาบจากพื้นขึ้นมา Alignment ปลายแขน

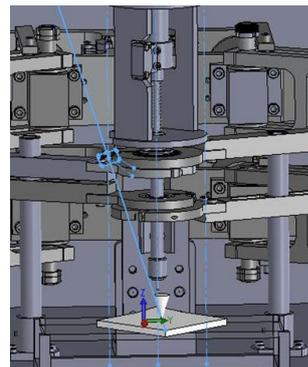
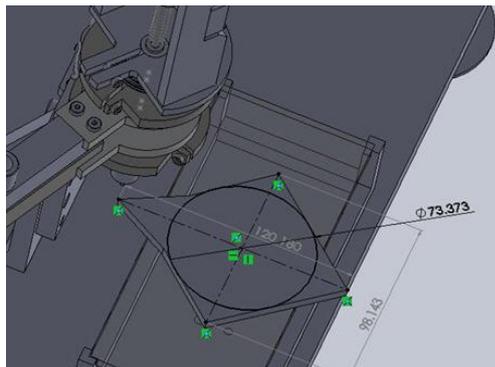


รูปที่ 7.8 การใช้แท่ง Precision ถ่ายระนาบจากพื้นจิ้นมายึดแกนทั้ง 2 ข้างบนล่างขณะประกอบ



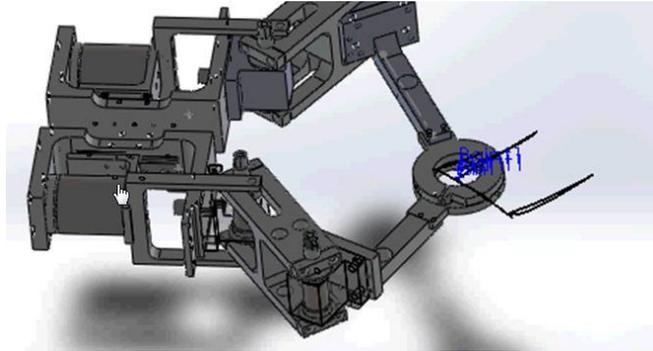
รูปที่ 7.9 การทำ Compliance ที่ข้อในขณะประกอบทำให้สามารถลดความเค้นได้

- 7. การประเมิน Working Area ใหม่หลังจากออกแบบใหม่ ปรากฏว่าได้ Working Area ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 73.4 mm.



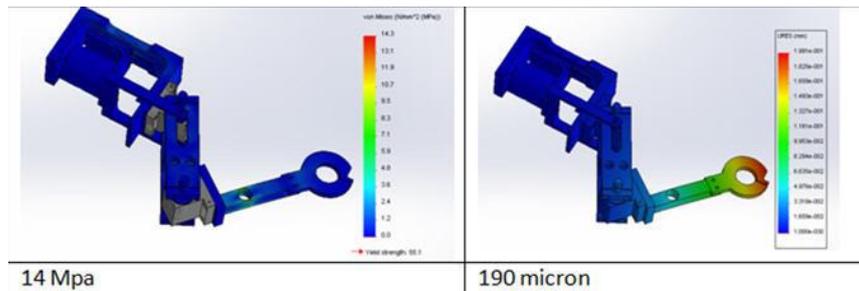
รูปที่ 7.10 ภาพด้านซ้ายคือ พื้นที่ทำงานใหม่ ภาพด้านขวาคือ มุมเอียงใหม่ที่ทำได้

8. ทดลองสั่งให้สร้าง Couple Curve ใหม่



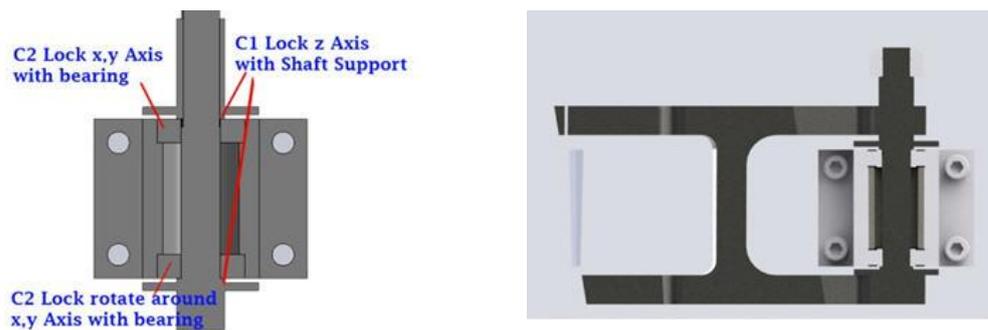
รูปที่ 7.11 แสดงรูปของ Couple Curve ได้เป็นรูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด

9. วิเคราะห์ความแข็งแรงด้วย Finite Element ปรากฏว่าไม่เกิดปัญหาการโก่งตัวและความไม่แข็งแรง



รูปที่ 7.12 หลังจากปรับปรุงโครงสร้างหลายรอบ ค่า Stress = 14 Mpa, Displacement = 190 micron

10. การใช้เบริ่งที่ High Precision



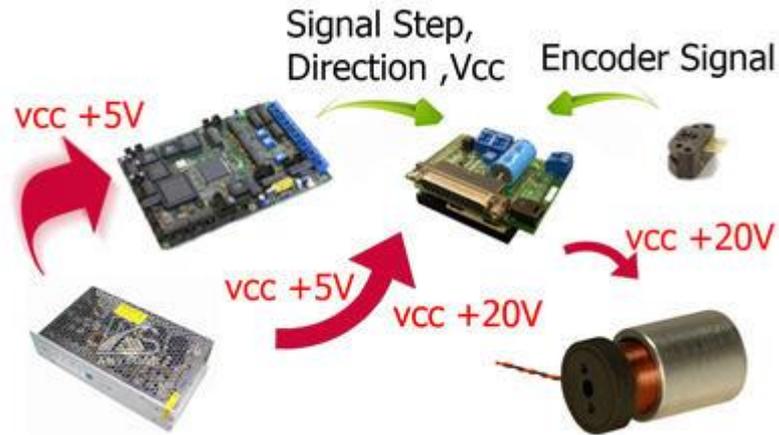
รูปที่ 7.13 เปลี่ยน Bearing เป็นแบบ High Precision และยึดแบบ Bearing คู่

11. การเลือกใช้วัสดุคืบที่มีคุณภาพมากขึ้น

ทางผู้วิจัยเลือกใช้วัสดุ Aluminum AISI 6061 ที่มีส่วนประสมหลักเป็น Magnesium and Silicon / Mg-Si ซึ่งมีคุณสมบัติดีกว่า AISI 5xxx ซึ่งมีราคาสูงกว่า คุณสมบัติของ AISI 6061 คือ มีความเบา สามารถนำไปตัดเฉือนและขึ้นรูปได้ง่าย ความแข็งของอลูมิเนียมมีค่าต่ำ คือ 15-25 HB(Brinell Hardness

10mm load 3000kg Standard ball) ค่าความต้านแรงดึงมีค่า 40-124 Mpa ค่าความเค้นราก 10-80 MPa ค่ายังโมดูลัส 69000 Mpa (1/3 ของเหล็ก) ราคาปานกลาง มีผิวเรียบ และสามารถนำไป Finishing ผิวเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและทนต่อการเสียดสีได้

12. การปรับเปลี่ยน มอเตอร์ เป็นแบบ Voice Coil ความละเอียดสูง



รูปที่ 7.14 ระบบ Voice Coil Control & Motor

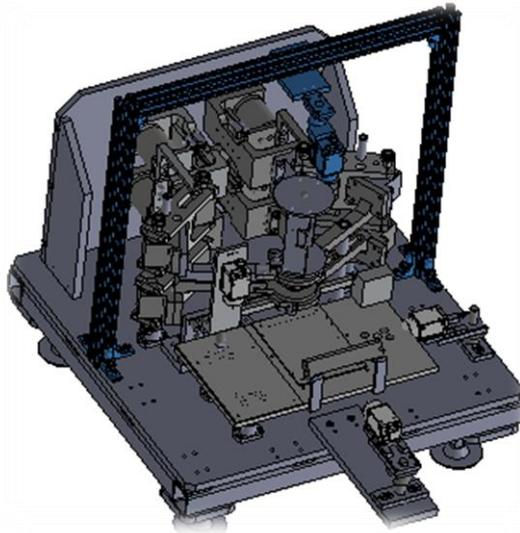
ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติของอลูมิเนียม 6063

| คุณสมบัติ | ค่า | หน่วย |
|---------------------------------|-----------|------------|
| Elastic Modulus (Stress/Strain) | 6.90E+010 | N / m^2 |
| Poissons Ratio (เท่ากับเหล็ก) | 0.33 | N/A |
| Shear Modulus | 2.58E+04 | N / m^2 |
| Density | 2700 | Kg / m^3 |
| Tensile Strength | 90000000 | N / m^2 |
| Yield Strength | 50000000 | N / m^2 |
| Thermal Expansion Coefficient | 2.34E-05 | /K |
| Thermal Conductivity | 218 | W/(m·K) |
| Specific Heat | 900 | J/(kg·K) |

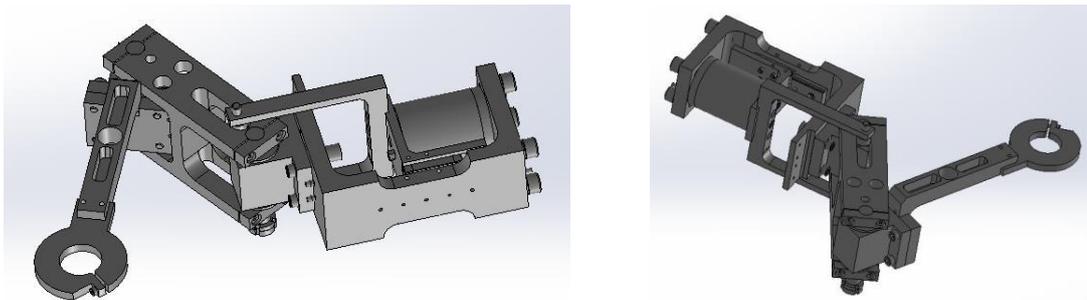
7.4 รายละเอียดการพัฒนา

7.4.1 การออกแบบหุ่นยนต์ใหม่

จากรูปที่ 7.15 เป็นแบบหุ่นยนต์ที่ออกแบบใหม่หมดตามวิธีทางอุตสาหกรรม มีการใช้ Dwell Pin ,Fixture แนวคิดการถ่ายระนาบ ใช้ Part สำเร็จอุตสาหกรรม และ ใช้โรงงานผลิตที่ได้มาตรฐานเหมาะสมกับงาน Precision

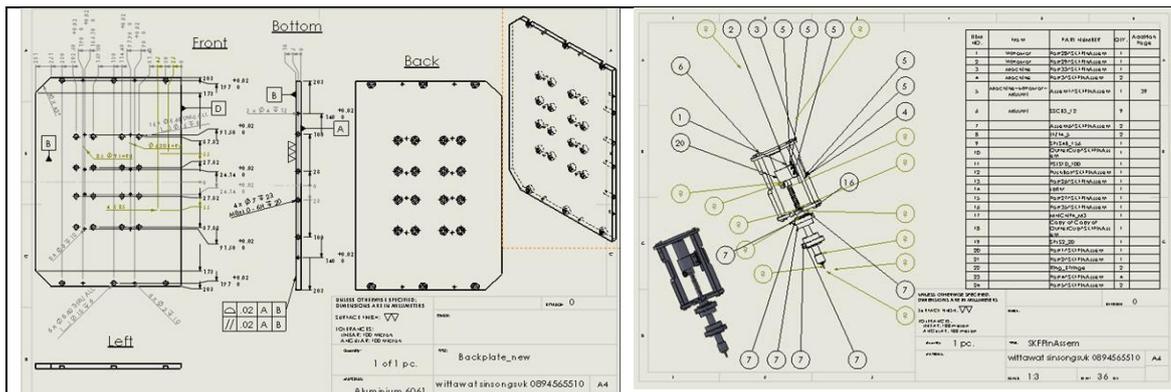


รูปที่ 7.15 การออกแบบหุ่นยนต์ใหม่เพื่อให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง แม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 7.16 การออกแบบส่วนแขน โดยแนวคิดสร้างจุดยึดเป็นคู่ระนาบ

โดยมีตัวอย่างการออกแบบ Drawing ส่วนประกอบดังรูปที่ 7.17 และ รูปที่ 7.18



รูปที่ 7.17 ตัวอย่างการออกแบบ Drawing



รูปที่ 7.18 แบบของหุ่นยนต์ทั้งหมด 58 แบบ เตรียมพร้อมในการผลิต

เอกสารอ้างอิง

1. ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์, 2553, **สถานการณ์การค้าสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับปี 2552**, หน้า 1 - 3
2. JiangPing Mei, Xueman Zhao, Panfeng Wang and Youyu Wang Liangan Zhang, 2007., "Reformation of the Transfusion Bags Secondary Packaging Line Using Parallel Robot.", **International Conference on Mechatronics and Automation.**, pp. 2043 - 2048.
3. L.E. Bruzzone, R.M. Molfino and M Zoppi, 2002., "Cost-effective approach to PKM.", **NCG Application Conference on Parallel Kinematic Machines.**, pp. 429 - 440.
4. Atsushi Konno, Masaru U and chiyama Hee-Byoung Choi., 2003., " Closed-Form Solutions for the Forward Kinematics of a 4-DOFs Parallel Robot H4.", **Conference on Intelligent Robots and Systems Las Vegas, Nevada, 2003.**
5. Cheung, J.W.F., Yunjiang Lou. Shibo Sun., 2007., "A Study on Five-Bar Manipulators for Semiconductor Packaging Applications.", **Mechatronics and Automation ICMA 2007.** , pp.1811 - 1816.
6. Domingos Mbomba Massala., 2010., **Analysis and Simulation of Parallel Robots for Sun Tracking Using a CAD-Based Approach.**, [online], Available: [https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/713615/1/My Dissertation \(IST final version\).pdf](https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/713615/1/My%20Dissertation%20(IST%20final%20version).pdf) [2012,December,15]
7. Sebastien Briot and Ilian A.Bonev., 2007., "Are Parallel Robots More Accurate Than Serial Robots.", **Department de genie de la production automatisee.**
8. Robert L. Norton., 2004., **Fundamentals Of Machine Design.**, McGraw-Hill.
9. J.Craig, John, 1989., **Introduction to Robotics Mechanical and Control.**, Second Edition., Addison-Wesley.
10. Adrian Down., 2006., **The Frenet-Serret Theorem.**, [online], Available: <http://people.duke.edu/~ad159/files/m140/4.pdf> [2012,December,15]
11. วิทยา ไพเราะห้, 2552, **หุ่นยนต์สี่แกนแบบกลไกขนาน**

12. Dong-Hyeok Kim, Sung-Rak Kim, Hee-Jun Kang and Hyun-Kyu Lim., 2009., "A Practical Approach to Enhance Positioning Accuracy for Industrial Robots.", **ICROS-SICE International Joint Conference.**
13. สำนักงานพัฒนาระบบสาธารณสุข 3 กรุงเทพฯ, 2555, **โรคจากการทำงาน...ภัยใกล้ตัวที่คุณอาจคาดไม่ถึง.**
14. ABB Inc.,2013., **Irb-360 specification.**, [online], Available:
www.new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-360. [2012,June,10]
15. ABB Inc.,2013., **Irb-120 specification.**, [online], Available:
www.new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-120. [2012,June,10]
16. ทวีศักดิ์ แก้วเขตรการ, 2553, **การประดับอัญมณี**
17. แก้วเขตรการ ทวีศักดิ์, 2547, **มาตรฐานอาชีพสาขาอัญมณีและเครื่องประดับ**
18. ทาเคชิ โยเนะยามะ, 2548, "แนวคิดและวิธีการออกแบบเครื่องจักรกล", **สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)**
19. Hong-Rui Wang, Qing-Quan Wang and Malikov Alexander., 2010., "The Inverse kinematics analysis of the novel 6-DOF parallel mechanism.", **Machine Learning and Cybernetics (ICMLC).**, pp.2015 - 2020.
20. K., Fitzgerald, J.M., Lewis and F.L. Liu., 1993., "Kinematic Analysis of a Stewart Platform Manipulator.", **International Conference on Mechatronics and Automation.**, pp. 282 - 293.
21. Jianyi Kong, Hanyuan Liao and Li Jia., 2010., "The Basic Structure of Planar Five-Bar Mechanism and its Degeneration Mechanism.", **Industrial and Information Systems (IIS) 2010 2nd International Conference.**, pp. 495 - 498.
22. Shenshun HU, Jun XU, Dewei YAN, Jiawen BI and Tingjun WANG., 2009., "Simulation Design and Application of Music Playing Robot Based on SolidWorks.", **International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation ICMTMA'09 Conference.**, pp. 339 - 342.
23. J.A. BGarnett., 1990., "A System Engineering Approach to Automated.", **International Conference on Mechatronics and Automation.**, pp. 387 - 390.

24. Kevin CLEARY, Taisuya Nakamura, Hironori Adachi, Keiko Homma and Taisuo ARAI., 2010., "Design, Analysis and Construction of A Prototype Parallel Link Manipulator.", **IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'90.**, p. 205.
25. Jim Kring Jeffrey Travis., 2006., **LabView For Everyone.**, Prentice Hall.
26. กิจไพบูลย์ ชิวพันธุ์ศรี, 2550, การออกแบบระบบแอปพลิเคชันในระบบกราฟิกด้วย LabVIEW., ซีเอ็ดยูเคชั่น
27. ศถาพร ลักษณะเจริญ, 2545, วิศวกรรมหุ่นยนต์ **Robotics Engineering.**, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
28. พวงแก้ว กิจธรรม, 2548, การศึกษาสำหรับคนที่มีความบกพร่องทางร่างกายหรือสุขภาพ, [Online], Available: <http://www.tddf.or.th/tddf/library> [2012,December,15]

ภาคผนวก ก.

การออกแบบหุ่นยนต์แบบขนานใหม่

ก.1 การหาสมการ Inverse Velocity ของ $Dt[\theta IL1]$ ด้วยโปรแกรม Mathematica

`SetAttributes[LIL1, Constant];`

`SetAttributes[LEL1, Constant];`

$$\text{Solve}\left[\begin{matrix} Dt[X] \\ Dt[Y] \\ 0 \\ 0 \end{matrix}\right] = \left[\begin{matrix} -LIL1Dt[\theta IL1]\text{Sin}[\theta IL1] - LEL1(Dt[\theta EL1] + Dt[\theta IL1])\text{Sin}[\theta EL1 + \theta IL1] \\ LIL1\text{Cos}[\theta IL1]Dt[\theta IL1] + LEL1\text{Cos}[\theta EL1 + \theta IL1](Dt[\theta EL1] + Dt[\theta IL1]) \\ 0 \\ 0 \end{matrix}\right], Dt[\theta IL1], Dt[\theta EL1] \tag{ก.1}$$

ก.2 การหาสมการจลนศาสตร์พิกัดของ $THETA1L$ ด้วยโปรแกรม Mathematica

`Px=400;Py=0;` (ก.2)

`UpperArm = 98; LowerArm = 134.5; MotorSpace = 55;`
`"LeftLimb";` (ก.3)

`"LEFTSIDE";`
`UpperArmCos[THETA1L] Cos[THETA2L] -Sin[THETA2L] 0 LowerArm`
`(* (UpperArmSin[THETA1L]) + (Sin[THETA2L] Cos[THETA2L] 0).(0) // N // MatrixForm*)` (ก.4)

$$\begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{matrix}$$

`UpperArmCos[THETA1L] + LowerArmCos[THETA2L]`
`(* (UpperArmSin[THETA1L] + LowerArmSin[THETA2L]) // MatrixForm*)`
`1` (ก.5)

`MysolveLeftLimb = Solve[(Py - MotorSpace) == (UpperArmSin[THETA1L] + LowerArmSin[THETA2L]), THETA1L, THETA2L]` (ก.6)

$$\begin{matrix} Px & UpperArmCos[THETA1L] + LowerArmCos[THETA2L] \\ 1 & 1 \end{matrix}$$

THETA1L →

$$\begin{aligned}
 & \text{ArcCos}\left[\frac{1}{\text{UpperArm}} \cdot 2.231445530414602 \times 10^{-7} (5.02073649 \times 10^8 - 10000 \cdot \text{LowerArm}^2 + 10000 \cdot \text{MotorSpace}^2 - \right. \\
 & \frac{2.008294596 \times 10^{17} \text{MotorSpace}^2}{2.008294596 \times 10^{13} + 4. \times 10^8 \text{MotorSpace}^2} + \frac{4. \times 10^{12} \text{LowerArm}^2 \text{MotorSpace}^2}{2.008294596 \times 10^{13} + 4. \times 10^8 \text{MotorSpace}^2} - \\
 & \left. \frac{4. \times 10^{12} \text{MotorSpace}^4}{2.008294596 \times 10^{13} + 4. \times 10^8 \text{MotorSpace}^2} + 10000 \cdot \text{UpperArm}^2 - \frac{4. \times 10^{12} \text{MotorSpace}^2 \text{UpperArm}^2}{2.008294596 \times 10^{13} + 4. \times 10^8 \text{MotorSpace}^2} + \right. \\
 & (8.9628 \times 10^{14} \text{MotorSpace} \sqrt{(-2.520779490201752 \times 10^9 \text{UpperArm}^2 + 100414.7298 \text{LowerArm}^2 \text{UpperArm}^2 - \\
 & 1 \cdot \text{LowerArm}^4 \text{UpperArm}^2 - 100414.7298 \text{MotorSpace}^2 \text{UpperArm}^2 + 2 \cdot \text{LowerArm}^2 \text{MotorSpace}^2 \text{UpperArm}^2 - \\
 & 1 \cdot \text{MotorSpace}^4 \text{UpperArm}^2 + 100414.7298 \text{UpperArm}^4 + 2 \cdot \text{LowerArm}^2 \text{UpperArm}^4 + 2 \cdot \text{MotorSpace}^2 \text{UpperArm}^4 - \\
 & \left. 1 \cdot \text{UpperArm}^6) / ((2.008294596 \times 10^{13} + 4. \times 10^8 \text{MotorSpace}^2) \text{UpperArm}) \right]
 \end{aligned} \tag{ก.9}$$

THETA1L →

$$\begin{aligned}
 & -1 \cdot \text{ArcCos}\left[\frac{1}{\text{UpperArm}} \cdot 2.231445530414602 \times 10^{-7} (5.02073649 \times 10^8 - 10000 \cdot \text{LowerArm}^2 + 10000 \cdot \text{MotorSpace}^2 - \right. \\
 & \frac{2.008294596 \times 10^{17} \text{MotorSpace}^2}{2.008294596 \times 10^{13} + 4. \times 10^8 \text{MotorSpace}^2} + \frac{4. \times 10^{12} \text{LowerArm}^2 \text{MotorSpace}^2}{2.008294596 \times 10^{13} + 4. \times 10^8 \text{MotorSpace}^2} - \\
 & \left. \frac{4. \times 10^{12} \text{MotorSpace}^4}{2.008294596 \times 10^{13} + 4. \times 10^8 \text{MotorSpace}^2} + 10000 \cdot \text{UpperArm}^2 - \frac{4. \times 10^{12} \text{MotorSpace}^2 \text{UpperArm}^2}{2.008294596 \times 10^{13} + 4. \times 10^8 \text{MotorSpace}^2} + \right. \\
 & (8.9628 \times 10^{14} \text{MotorSpace} \sqrt{(-2.520779490201752 \times 10^9 \text{UpperArm}^2 + 100414.7298 \text{LowerArm}^2 \text{UpperArm}^2 - \\
 & 1 \cdot \text{LowerArm}^4 \text{UpperArm}^2 - 100414.7298 \text{MotorSpace}^2 \text{UpperArm}^2 + 2 \cdot \text{LowerArm}^2 \text{MotorSpace}^2 \text{UpperArm}^2 - \\
 & 1 \cdot \text{MotorSpace}^4 \text{UpperArm}^2 + 100414.7298 \text{UpperArm}^4 + 2 \cdot \text{LowerArm}^2 \text{UpperArm}^4 + 2 \cdot \text{MotorSpace}^2 \text{UpperArm}^4 - \\
 & \left. 1 \cdot \text{UpperArm}^6) / ((2.008294596 \times 10^{13} + 4. \times 10^8 \text{MotorSpace}^2) \text{UpperArm}) \right]
 \end{aligned} \tag{ก.10}$$

ก.3 การหาสมการ Differential Kinematics ด้วยโปรแกรม Mathematica

- สมการด้านขวา

SetAttributes [L1L1, Constant];

SetAttributes [L1L1, Constant];

$$\text{Ldot} = \text{Dt} \begin{bmatrix} \text{Cos}[q\text{EL1} + q\text{IL1}] & -\text{Sin}[q\text{EL1} + q\text{IL1}] & 0 & \text{Cos}[q\text{EL1} + q\text{IL1}]\text{LEL1} + \text{Cos}[q\text{IL1}]\text{L1L1} \\ \text{Sin}[q\text{EL1} + q\text{IL1}] & \text{Cos}[q\text{EL1} + q\text{IL1}] & 0 & \text{Sin}[q\text{EL1} + q\text{IL1}]\text{LEL1} + \text{Sin}[q\text{IL1}]\text{L1L1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{ก.11}$$

ซึ่งจะได้

$$\begin{bmatrix} -(Dt[qEL1]+Dt[qIL1]) \sin[qEL1 + qIL1] & -\cos[qEL1 + qIL1](Dt[qEL1]+Dt[qIL1]) & 0 & -LIL1 Dt[qIL1]\sin[qIL1]-LEL1 (Dt[qEL1]+Dt[qIL1]) \sin[qEL1+qIL1] \\ \cos[qEL1 + qIL1] Dt[qEL1]+Dt[qIL1] & -(Dt[qEL1]+Dt[qIL1])\sin[qEL1 + qIL1] & 0 & LIL1 \cos[qIL1]Dt[qIL1]+LEL1 \cos[qEL1 + qIL1](Dt[qEL1]+Dt[qIL1]) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(ก.12)

● สมการด้านซ้าย

SetAttributes[IbaseL1, Constant];

$$Ldot = Dt \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & IbaseL1 + Y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix};$$

(ก.13)

ซึ่งจะได้

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & Dt[X] \\ 0 & 0 & 0 & Dt[Y] \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(ก.14)

จากนั้นแบ่งสมการเฉพาะส่วน $\begin{bmatrix} Dt[x] \\ Dt[y] \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ ของทั้งสองข้างของสมการมาทำการหาค่า Dt[qIL1] ซึ่งเป็น

ต้นกำลัง โดย

SetAttributes[LIL1, Constant];

SetAttributes[LEL1, Constant];

$$\text{Solve} \left[\begin{bmatrix} Dt[X] \\ Dt[Y] \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} == \begin{bmatrix} -LIL1Dt[\theta IL1]\sin[\theta IL1]-LEL1(Dt[\theta EL1]+Dt[\theta IL1])\sin[\theta EL1+\theta IL1] \\ LIL1\cos[\theta IL1]Dt[\theta IL1]+LEL1\cos[\theta EL1+\theta IL1](Dt[\theta EL1]+Dt[\theta IL1]) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, Dt[\theta IL1], Dt[\theta EL1] \right]$$

(ก.15)

ก.4 การหาสมการค่าแกน x ที่ทำให้เมื่อ $\det(J_x) = 0$ ด้วยโปรแกรม Mathematica

$$\text{Solve}[\text{Det}\left[\begin{array}{cc} -a+x-b2\text{Cos}[\theta 2] & y-b2\text{Sin}[\theta 2] \\ a+x-b1\text{Cos}[\theta 1] & y-b1\text{Sin}[\theta 1] \end{array}\right]=0], x, \theta_1] \quad (\text{ก.16})$$

ก.5 การหาสมการ อินเวอร์ส จาโคเบียน ด้วยโปรแกรม Mathematica

"Left"

UpperArm=97.5;

LowerArm=135;

MotorSpace=109.87/2;

$$\text{FPxL} = \text{Solve}\left[\left[\begin{array}{c} P_x \\ P_y - \text{MotorSpace} \\ 1 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} \text{UpperArm} * \text{Cos}(\theta_{1L}) + \text{LowerArm} * \text{Cos}(\theta_{2L}) \\ \text{UpperArm} * \text{Sin}(\theta_{1L}) + \text{LowerArm} * \text{Sin}(\theta_{2L}) \\ 1 \end{array}\right], P_x, \text{THETA2L}\right] \quad (\text{ก.17})$$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่า P_{xL} ที่ขึ้นกับ P_{yL} ซึ่งเป็นตัวแปรร่วมของแขนซ้ายและแขนขวาเข้ามาแทนที่ θ_{2L} ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีอยู่เฉพาะแขนซ้ายและไม่สามารถควบคุมกำหนดมุมได้ ดังสมการ

Error! Reference source not found.

$$P_x \rightarrow 0.125(784.\text{Cos}[\text{THETA1L}] + 8.\sqrt{(15065.25 + 110.P_y - 1.P_y^2 - 10780.\text{Sin}[\text{THETA1L}] + 196.P_y\text{Sin}[\text{THETA1L}] - 9604.\text{Sin}[\text{THETA1L}]^2})) \quad (\text{ก.18})$$

กระทำลักษณะเดียวกันเพื่อหา P_{yL}

"Right"

UpperArm=97.5;

LowerArm=135;

MotorSpace=109.87/2;

$$\text{FPyL} = \text{Solve}\left[\left[\begin{array}{c} P_x \\ P_y - \text{MotorSpace} \\ 1 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c} \text{UpperArm} * \text{Cos}(\theta_{1L}) + \text{LowerArm} * \text{Cos}(\theta_{2L}) \\ \text{UpperArm} * \text{Sin}(\theta_{1L}) + \text{LowerArm} * \text{Sin}(\theta_{2L}) \\ 1 \end{array}\right], P_y, \text{THETA2L}\right] \quad (\text{ก.19})$$

ซึ่งจะได้

$$P_y \rightarrow 0.125(440 - 8.\sqrt{18090.25 - 1.P_x^2 + 196.P_x\text{Cos}[\text{THETA1L}] - 9604.\text{Cos}[\text{THETA1L}]^2 + 784.\text{Sin}[\text{THETA1L}]}) \quad (\text{ก.20})$$

จากนั้นหา P_{xR} และ P_{yR} ในลักษณะเดียวกันในแขนขวา ซึ่งจะได้

$$P_x \rightarrow 0.125(784.\text{Cos}[\text{THETA1R}] + 8.\sqrt{(15065.25 - 110.P_y - 1.P_y^2 + 10780.\text{Sin}[\text{THETA1R}]$$

$$+ 196.P_y\text{Sin}[\text{THETA1R}] - 9604.\text{Sin}[\text{THETA1R}]^2})) \quad (\text{ก.21})$$

และ

$$P_y \rightarrow 0.125(-440. + 8.\sqrt{18090.25-1.P_x^2 + 196.P_x\text{Cos}[\text{THETA1R}] - 9604.\text{Cos}[\text{THETA1R}]^2} + 784.\text{Sin}[\text{THETA1R}]) \tag{ก.22}$$

จากนั้นทำการตัดตัวแปร P_y ที่อยู่ในสมการที่ใช้หา P_x และเช่นเดียวกันคือ การตัดตัวแปร P_x อยู่ในสมการที่ใช้หา P_y โดยการอาศัยการลดรูปสมการ 2 สมการ 2 ตัวแปร ดังสมการ

Error! Reference source not found.

$$\text{Solve}\left(\begin{matrix} P_x \\ P_y \end{matrix}\right) = \left(\begin{matrix} 0.125(784.\text{Cos}[\text{THETA1L}] + 8.\sqrt{15065.25+ 110.P_y - 1.P_y^2 - 10780.\text{Sin}[\text{THETA1L}] + 196.P_y\text{Sin}[\text{THETA1L}] - 9604.\text{Sin}[\text{THETA1L}]^2}) \\ 0.125(784.\text{Cos}[\text{THETA1R}] + 8.\sqrt{15065.25- 110.P_y - 1.P_y^2 + 10780.\text{Sin}[\text{THETA1R}] + 196.P_y\text{Sin}[\text{THETA1R}] - 9604.\text{Sin}[\text{THETA1R}]^2}) \end{matrix} \right), P_x, P_y \tag{ก.23}$$

โดยคำสั่งด้านบนจะเป็นการลดรูปสมการ P_{xL} และ P_{xR} ให้เป็นสมการเดียวพร้อมตัด P_y ออกจากสมการ ซึ่งผู้วิจัยจะได้สมการ P_x รวมทั้งมีเฉพาะตัวแปร θ_{1L} และ θ_{1R} เท่านั้น

ก.6 การใช้คำสั่ง Inverse เพื่อหา อินเวอร์ส จาโคเบียน Matrix ด้วยโปรแกรม Mathematica

$$\text{MyInverseJacobian} = \text{Inverse}\left[\begin{matrix} D[P_xJ, \text{THETA1L}] & D[P_xJ, \text{THETA1R}] \\ D[P_yJ, \text{THETA1L}] & D[P_yJ, \text{THETA1R}] \end{matrix}\right] \tag{ก.24}$$

ประวัติผู้วิจัย

| | |
|--------------------------|---|
| ชื่อ – สกุล | นาย วิทวัส สิ้นส่งสุข |
| วันเดือนปีเกิด | 2 มิถุนายน 2519 |
| ประวัติการศึกษา | |
| ระดับมัธยม | โรงเรียนตรอกจันทน์วิทยา พ.ศ.2537 |
| ระดับปริญญาตรี | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ พ.ศ.2552 |
| ระดับปริญญาโท | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2555 |
| ประวัติการทำงาน | ผู้จัดการทั่วไป บริษัท โลโก้โปรไฟล์ จำกัด พ.ศ. 2542 - 2550 กรรมการผู้จัดการ บริษัท เรสอินโนเวชั่น จำกัด พ.ศ. 2553 - 2555 |
| ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ | วิทวัส สิ้นส่งสุข พิเชิต ฤกษ์นันทน์ และ อาบทิพย์ ชีวงส์กิจ. “การออกแบบParallel Robot เพื่อการประกอบอัญมณีเทียมและ จำลองการทำงานด้วย Software Softmotion”, การประชุมวิชาการ ทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ ครั้งที่ 5, 26-27 พฤษภาคม 2554 |