

รายการอ้างอิง

- [1] Dong-Il Kim; Sungkwun Kim. An Iterative Learning Control Method with Application for CNC Machine Tools. Industry Applications, IEEE Transactions 32, 1 (Jan.-Feb, 1996) : 66 – 72.
- [2] Masood, T.; Mubashar, A.; Jawad Khan, M.A. Techniques used in the simulation and control of PROTEC computer numerically controlled (CNC) machine software. Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02. 2002 IEEE International Conference 1 (11-14 Dec. 2002) : 504 – 509.
- [3] Eun-Chan Park; Hyuk Lim; Chong-Ho Choi. Position control of X-Y table at velocity reversal using presliding friction characteristics. Control Systems Technology, IEEE Transactions , 11, 1 (Jan. 2003) :24 – 31.
- [4] Steve Krar, Arthur Gil. CNC : technology and programming. International editions New York : McGraw-Hill, 1990.
- [5] Robert D. Smith. Mathematics for machine technology. 4th edition Albany, N.Y. : Delmar Publishers, 1999.
- [6] Kate Gregory, Special Edition Using Visual C++ 6. USA : QUE, 1998.
- [7] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [8] อำนาจ ทองแสน. การเขียนโปรแกรม CNC สำหรับการควบคุมเครื่องจักรกลด้วย คอมพิวเตอร์. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2544.
- [9] ธเนศ เรืองธุรกิจ, วิบูลย์แสงวีระพันธุ์ศิริ. เทคนิคการควบคุมแบบคิติดอลสำหรับติดตาม คอนทัวร์ 3 มิติ. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 11, 2540.
- [10] วันชัย ชีรพัฒน์พร, วิบูลย์แสงวีระพันธุ์ศิริ. โปรแกรมถอดรหัสเอชพีจีแอลสำหรับโต๊ะเอ็กซ์ วายแซด. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 11, 2540.
- [11] ณวัชร พงศ์พานิช. การจำลองการทำงานของเครื่องกลึงซีเอ็นซีบนเครื่องคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [12] กฤษณ์นัท มะลิทอง. การพัฒนาโปรแกรมแปลรหัสเอ็นซีสำหรับตัวควบคุมซีเอ็นซีแบบ สถาปัตยกรรมเปิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

- [13] วรรณรัตน์ ชูประเสริฐ. การควบคุมแรงแบบฝังตัวสำหรับแขนกลลูกผสมแบบขนาน 5 แกน
ตระกูลเอช. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุุณศึกษิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550
- [14] ทวี งามวิไลกร. การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟของแขนกลแฮบติคหองศาอิสระแบบ
ใหม่ที่มีโครงสร้างแบบขนานสำหรับงานสร้างชิ้นงานต้นแบบ. วิทยานิพนธ์
ปริญญาคุุณศึกษิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
- [15] ประสิทธิ์พร พงศ์สิน. การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ของหุ่นยนต์สำหรับทำงานร่วมกับมนุษย์
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550
- [16] ณัฐคนัย ดันฑะวิรุฬห์. การออกแบบและวิเคราะห์แบบใหม่สำหรับแขนกลแบบขนานใน
ตระกูลเอช-4 พร้อมด้วยการควบคุมแรง. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุุณศึกษิต ภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ก.1 การ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุมและแปลงสัญญาณจากดิจิทัลไปเป็นอนาลอก (Counter Card and D/A Output Card)

ใช้ของยี่ห้อ Sensoray 626 ซึ่งสามารถต่อกับอุปกรณ์วัดมุมได้ทั้งหมด 6 ตัว สามารถส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณได้ 4 ตัว



รูปที่ ก.1 แสดงการ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุม

ก.2 ตัวขยายเพื่อขับมอเตอร์ (Amplifier)

ใช้ของยี่ห้อ Kollmorgen โดยสัญญาณแอนาลอกที่ใช้ในการควบคุมแขนกลในงานวิจัยนี้ดังแสดงในตาราง ก.1 คือ

ก.2.1 สัญญาณแอนาลอกที่ส่งไปควบคุมตัวขยายเพื่อขับมอเตอร์

รายละเอียดของพอร์ตของตัวขยายสัญญาณ Kollmorgen คู่มือใน SERVOSTAR S และ SERVOSTAR CD Installation manual 2002 (SDCInstall.pdf)

ตาราง ก.1 พอร์ตที่ใช้เชื่อมต่อสัญญาณแอนาล็อก

ชื่อพอร์ต		อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ	หน้าที่การทำงาน
Input	Output		
		ตัวขยายสัญญาณควบคุมมอเตอร์ Kollmorgen	ส่งสัญญาณแอนาล็อกควบคุมตัวขยายเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์
	DACH1	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 1	
	DACH2	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 2	
	DACH3	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 3	
	DACH4	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 4	

ก.2.2 พอร์ตรับสัญญาณเอนโคเดอร์

พอร์ตรับสัญญาณเอนโคเดอร์เพื่อวัดตำแหน่งการอุปกรณ์ขับทั้งสิ้นได้แสดงในตาราง ก.2

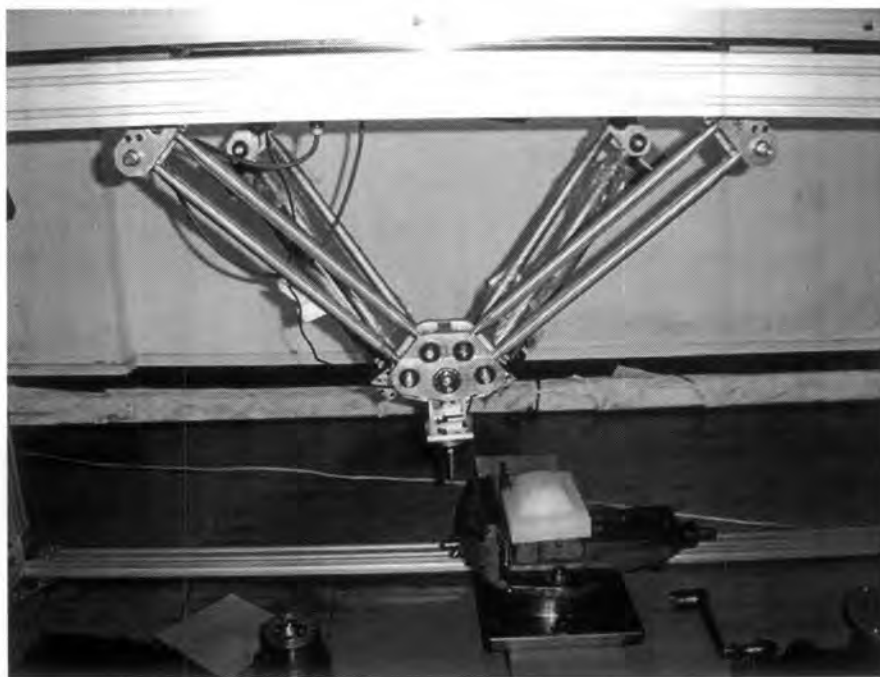
ตาราง ก.2 พอร์ตรับสัญญาณเอนโคเดอร์

ชื่อพอร์ต	อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ	หน้าที่การทำงาน
	ตัวขยายสัญญาณควบคุมมอเตอร์ Kollmorgen	รับสัญญาณเอนโคเดอร์จากตัวขยายสัญญาณ Kollmorgen เพื่อใช้หาตำแหน่งของแกนกล
ENCODER1 PHI0(1) PHI90(1) IDX(1)	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 1	
ENCODER2 PHI0(2) PHI90(2)	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 2	

ตาราง ก.2 (ต่อ)		
IDX(2)		
ENCODER3 PHI0(3) PHI90(3) IDX(3)	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 3	
ENCODER4 PHI0(4) PHI90(4) IDX(4)	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 4	

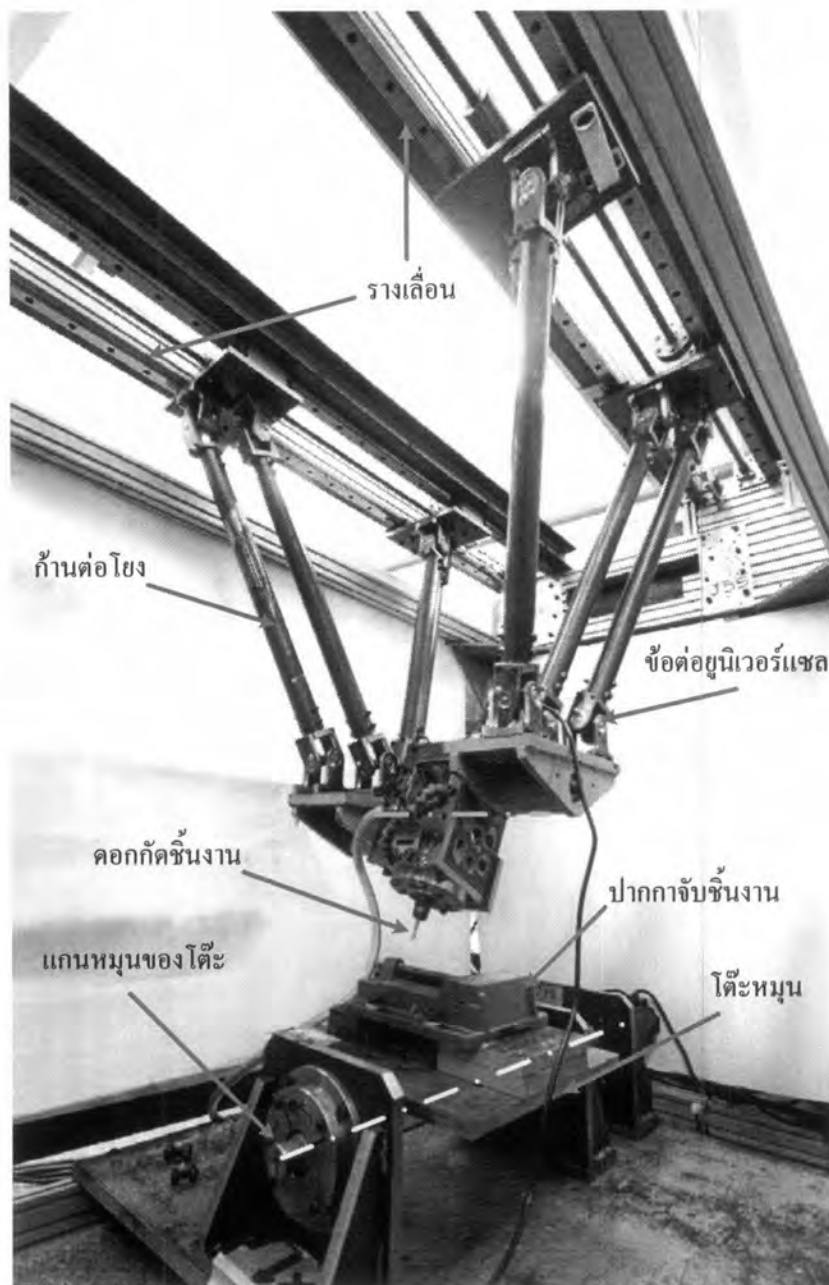
ก.3 แขนกลแบบขนานในตระกูลเอช 4

แขนกลเคลื่อนที่ตามแบบขนานในตระกูลเอช 4 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบและพัฒนาโดย Tantawiroon, N. [16] โดยในตอนแรกเป็นแขนกลแบบขนาน 4 องศาอิสระ วัสดุที่ใช้สร้างเป็นอลูมิเนียมทั้งหมดดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 แขนกลแบบขนานในตระกูลเอช 4

เพื่อให้แขนกลแบบขนานในตระกูลเอช 4 มีความสามารถในการกักเซาะชิ้นงานให้มีประสิทธิภาพ นั้นจำเป็นต้องปรับปรุง โดยการเพิ่มจำนวนองศาอิสระเป็น 5 องศาอิสระโดยองศาอิสระที่เพิ่มขึ้นจะทำให้หน้าที่เป็น โต๊ะหมุนซึ่งสามารถจับยึดชิ้นงานที่จะทำการกักเซาะ รูปแบบดังรูปที่ 2.2 โครงสร้างของแขนกลที่พัฒนาจะเปลี่ยนมาใช้เหล็กเป็นวัสดุหลักจากเดิมที่ใช้อลูมิเนียม ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ข้อต่อแบบหมุนที่ใช้มีการประกอบแบบสวมอัดเพื่อป้องกันความหลวมที่อาจจะเกิดขึ้นข้อต่อยูนิเวอร์แซล (Universal joint) ซึ่งมีสององศาอิสระดังรูปที่ ก.3 เป็นข้อต่อที่ใช้กับเพลาขับของรถยนต์จึงมีความแข็งแรงและไม่มีความหลวม




รูปที่ ก.3 รายละเอียดของแขนกลแบบเอช 4 ที่ปรับปรุงใหม่

ภาคผนวก ข

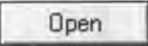
คู่มือการใช้โปรแกรม

1. การเปิดไฟล์ข้อมูลจีโค้ด


1. เมื่อเข้าสู่โปรแกรมแล้ว เลือกที่เมนู File ->Open หรือกดคีย์บอร์ด Ctrl+O หรือกดที่ปุ่ม  จะปรากฏหน้าต่างเพื่อให้ระบุชื่อไฟล์ที่ต้องการเปิด ดังรูป ข.1

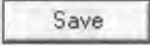


รูปที่ ข.1 หน้าต่าง Open







2. เลือกชื่อไฟล์ที่ต้องการ หรือพิมพ์ชื่อไฟล์ลงในช่อง File name แล้วกดปุ่ม 
3. โปรแกรมจะเปิดไฟล์ข้อมูลขึ้นมา พร้อมสำหรับการทำงานต่อไป
4. ผู้ใช้สามารถแก้ไขข้อมูลตัวอักษรได้ สามารถพิมพ์โค้ดเพิ่ม หรือลบโค้ดที่ไม่ต้องการได้

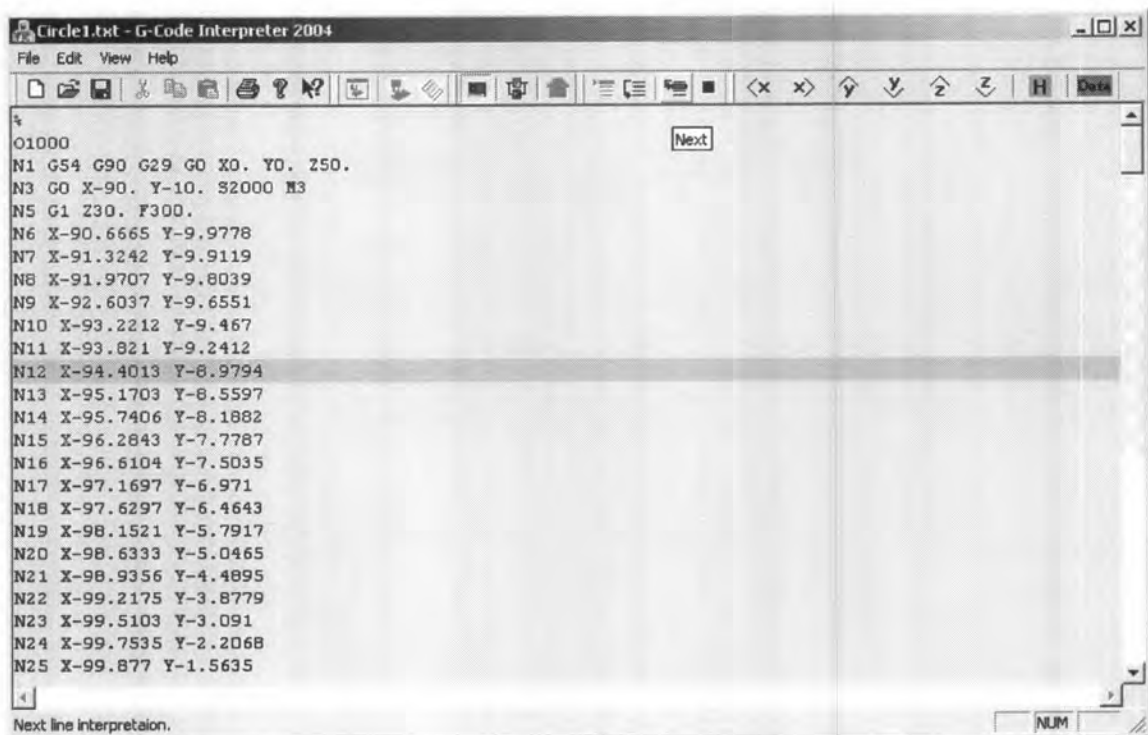
และยังสามารถใช้คำสั่ง Cut, Copy, Paste  ช่วยในการแก้ไขข้อมูล

5. หลังจากมีการแก้ไขข้อมูลในไฟล์แล้ว ควรทำการบันทึกไฟล์นั้นก่อนทำการแปลจีโค้ด
6. เมื่อต้องการบันทึกการแก้ไขโค้ดไว้ในไฟล์เดิม ให้เลือกที่เมนู File -> Save หรือกดคีย์บอร์ด Ctrl+S หรือกดที่ปุ่ม 

7. เมื่อต้องการบันทึกการแก้ไขโค้ด โดยเปลี่ยนชื่อไฟล์ ให้เลือกที่เมนู File -> Save As จะปรากฏหน้าต่างให้ป้อนชื่อ เลือกชื่อไฟล์ที่ต้องการ หรือพิมพ์ชื่อไฟล์ลงในช่อง File name แล้วกดปุ่ม 

2. การแปลจีโค้ด

1. สามารถทำการเริ่มแปลจีโค้ดโดยกดปุ่ม Step  ซึ่งจะทำการแปลจีโค้ดทีละบรรทัด หรือกดปุ่ม Continuous  ซึ่งจะทำการแปลจีโค้ดอย่างต่อเนื่อง
3. หากกดปุ่ม Step  เมื่อจบการทำงานในแต่ละบรรทัดแล้ว จะต้องกดปุ่ม F11 หรือกดปุ่ม Next  เพื่อทำการแปลจีโค้ดบรรทัดต่อไป ทีละบรรทัด แต่ถ้าหากต้องการแปลจีโค้ดอย่างต่อเนื่องไปเลย ก็สามารถกดปุ่ม Continuous 
4. ถ้าต้องการหยุดการแปลจีโค้ด สามารถทำได้โดยการกดปุ่ม Stop 



```

Circle1.txt - G-Code Interpreter 2004
File Edit View Help
O1000
N1 G54 G90 G29 G0 X0. Y0. Z50.
N3 G0 X-90. Y-10. S2000 M3
N5 G1 Z30. F300.
N6 X-90.6665 Y-9.9778
N7 X-91.3242 Y-9.9119
N8 X-91.9707 Y-9.8039
N9 X-92.6037 Y-9.6551
N10 X-93.2212 Y-9.467
N11 X-93.821 Y-9.2412
N12 X-94.4013 Y-8.9794
N13 X-95.1703 Y-8.5597
N14 X-95.7406 Y-8.1882
N15 X-96.2843 Y-7.7787
N16 X-96.6104 Y-7.5035
N17 X-97.1697 Y-6.971
N18 X-97.6297 Y-6.4643
N19 X-98.1521 Y-5.7917
N20 X-98.6333 Y-5.0465
N21 X-98.9356 Y-4.4895
N22 X-99.2175 Y-3.8779
N23 X-99.5103 Y-3.091
N24 X-99.7535 Y-2.2068
N25 X-99.877 Y-1.5635
Next line interpretation.
NUM
  
```

รูปที่ ข.2 หน้าต่าง โปรแกรมขณะทำการแปลจีโค้ด

ภาคผนวก ก
สมการที่เกี่ยวข้อง

ก.1 สมการอินเวิร์สคิเนแมติกส์

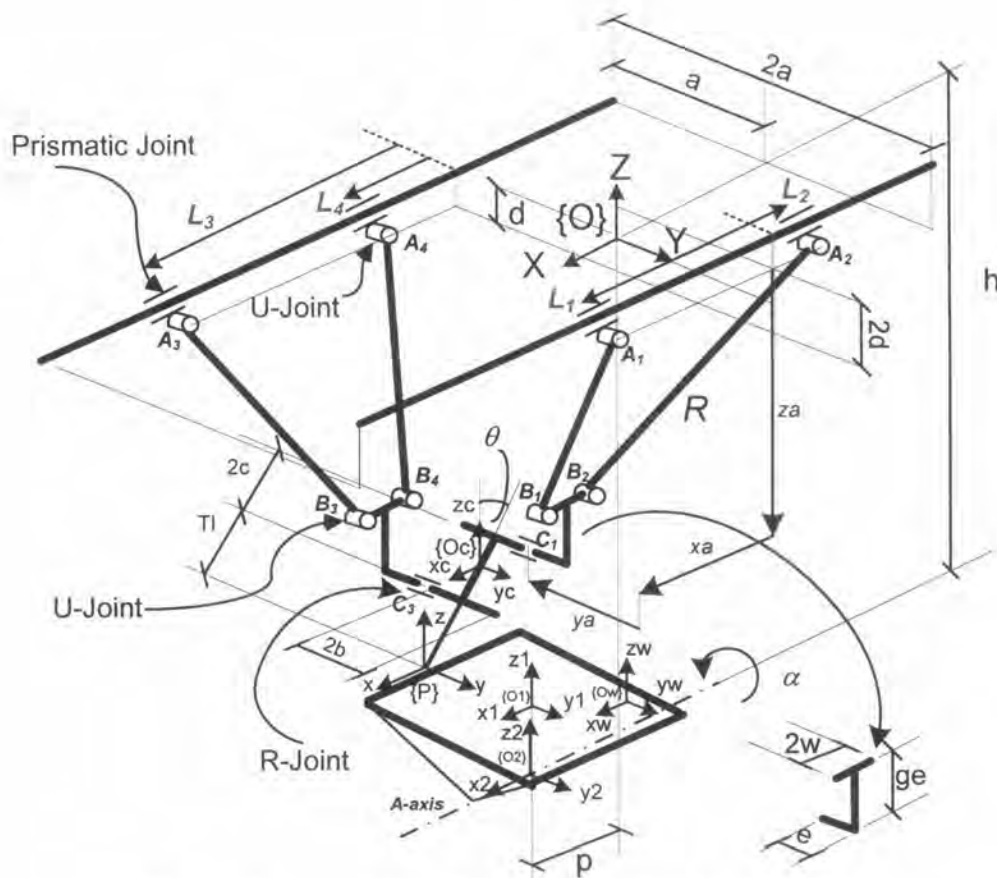
จากรูปที่ ก.1 เวกเตอร์ $C1B1 = C1B2$ สมมาตรบนระนาบ ZY และ เวกเตอร์ $OcC1 = -OcC3$ ดังนั้นสมการอินเวิร์สคิเนแมติกส์หาได้จาก รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ นายกรรมมันต์ ชูประเสริฐ

$$l_{1,2} = x_a + w \pm \sqrt{R^2 - (y_a - e)^2 - (z_a - ge)^2}$$

และจากลักษณะของแขนกลตามรูปที่ ก.1

$$l_1 = x_a + w + \sqrt{R^2 - (y_a - e)^2 - (z_a - ge)^2} \quad (1)$$

$$l_2 = x_a - w - \sqrt{R^2 - (y_a - e)^2 - (z_a - ge)^2} \quad (2)$$



รูปที่ ค.1 รูปแบบการกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกล

โดยที่ (x_a, y_a, z_a) คือตำแหน่งจุด C1 ของเวกเตอร์ตามรูปที่ ค.1 C1B1 และ C1B2 ส่วนของสี่เหลี่ยมคางหมูที่เกิดจากก้านต่อโยง A1B1 และ A2B2 ประกอบติดกับข้อต่อยูนิเวลแซลที่ตำแหน่ง B1 และ B2 ดังแสดงในรูปที่ ค.1 และ ค.2 ซึ่งทำให้

$$x_a = x_c + c \cdot \sin(\theta) = x + (T_L + 2c) \cdot \sin(\theta) \tag{3}$$

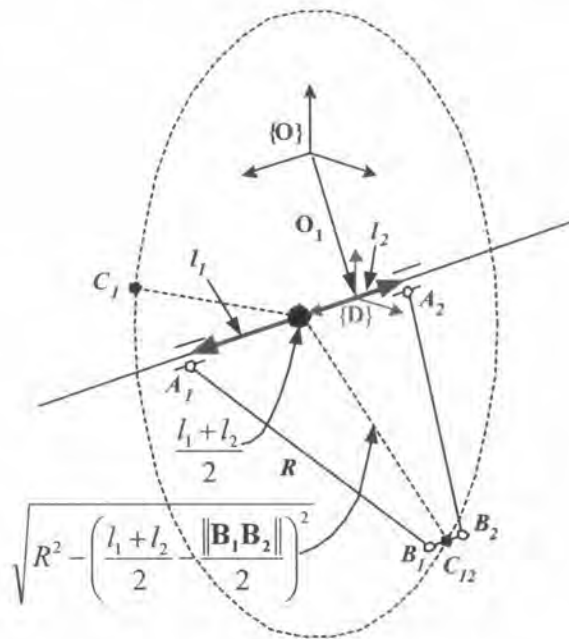
$$y_a = -y_c - b + a = -y - b + a \tag{4}$$

$$z_a = -z_c - c \cdot \cos(\theta) + d = -z - (T_L + 2c) \cdot \cos(\theta) + d \tag{5}$$

โดยที่ ค่า x_a, y_a และ z_a เป็นบวกเสมอ และค่า z_c, z เป็นค่าลบเสมอ ในทำนองเดียวกันนี้กับก้านต่อโยงอีกสองก้านที่เหลือทำให้สรุปได้ว่า

$$l_3 = x_b + w + \sqrt{R^2 - (y_b - e)^2 - (z_b - ge)^2} \tag{6}$$

$$l_4 = x_b - w - \sqrt{R^2 - (y_b - e)^2 - (z_b - ge)^2} \tag{7}$$



รูปที่ ค.2 แนวการเคลื่อนที่ของจุด B

โดยที่ (x_b, y_b, z_b) คือตำแหน่งจุด C3 ของเวกเตอร์ตามรูปที่ ค.1 และรูปที่ ค.2 ประกอบกัน ทำให้สรุปได้ว่า

$$x_b = x_c - c \cdot \sin(\theta) = x + T_L \cdot \sin(\theta) \tag{8}$$

$$y_b = y_c - b + a = y - b + a \tag{9}$$

$$z_b = -z_c + c \cdot \cos(\theta) - d = -z - T_L \cdot \cos(\theta) - d \tag{10}$$

โดยที่ ค่า x_b, y_b และ z_b เป็นบวกเสมอ และค่า z_c, z เป็นค่าลบเสมอ จากรูปที่ ค.3 ซึ่งแสดงการตั้งแกน (x_w, y_w, z_w) ซึ่งเป็นแกนของชิ้นงานกับแกนอ้างอิง (x, y, z) ซึ่งสามารถทำการย้ายแกนได้ดังนี้

$$\{O_w\} \xrightarrow{T} \{O_1\} \xrightarrow{T} \{O_2\} \xrightarrow{R} \{O_2\} \xrightarrow{T} \{O\}$$

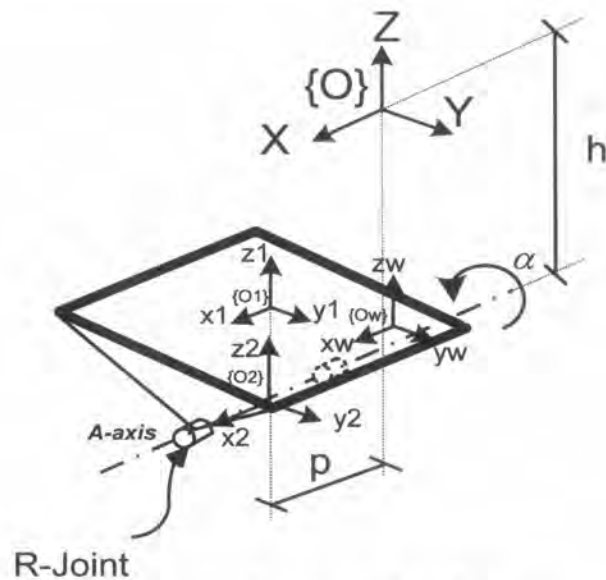
ทำให้ได้

$$X = x_w + x_{Ow}^{01} + p \tag{11}$$

$$Y = (y_w + y_{Ow}^{O1}) \cdot \cos \alpha - (z_w + z_{O1}^{O2}) \cdot \sin \alpha \quad (12)$$

$$Z = (y_w + y_{Ow}^{O1}) \cdot \sin \alpha + (z_w + z_{O1}^{O2}) \cdot \cos \alpha - h \quad (13)$$

โดยที่ $x_{Ow}^{O1} y_{Ow}^{O1} z_{Ow}^{O1}$ คือแกนของ Ow เทียบกับ $O1$ และ z_{O1}^{O2} คือแกนของ $O1$ เทียบกับ $O2$.



รูปที่ ค.3 การตั้งแกนบนโต๊ะจับชิ้นงาน

จากสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 5 และจากสมการที่ 11 ถึงสมการที่ 13 ทำให้สามารถหา $L1, L2$ ได้ดังนี้

$$l_1 = (x_w + x_{Ow}^{O1} + p) + (T_L + 2c) \sin(\theta) + w + \sqrt{R^2 - [-(y_w + y_{Ow}^{O1}) \cos \alpha + (z_w + z_{O1}^{O2}) \sin \alpha - b + a - e]^2 - [-(y_w + y_{Ow}^{O1}) \sin \alpha - (z_w + z_{O1}^{O2}) \cos \alpha + h - (T_L + 2c) \cos(\theta) + d - ge]^2} \quad (14)$$

$$l_2 = (x_w + x_{Ow}^{O1} + p) + (T_L + 2c) \sin(\theta) - w - \sqrt{R^2 - [-(y_w + y_{Ow}^{O1}) \cos \alpha + (z_w + z_{O1}^{O2}) \sin \alpha - b + a - e]^2 - [-(y_w + y_{Ow}^{O1}) \sin \alpha - (z_w + z_{O1}^{O2}) \cos \alpha + h - (T_L + 2c) \cos(\theta) + d - ge]^2} \quad (15)$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ 6 ถึง 13 ทำให้หาสมการ $L3, L4$ ได้

$$l_3 = (x_w + x_{Ow}^{O1} + p) + T_l \sin(\theta) + w + \sqrt{R^2 - [(y_w + y_{Ow}^{O1}) \cos \alpha - (z_w + z_{O1}^{O2}) \sin \alpha - b + a - e]^2 - [-(y_w + y_{Ow}^{O1}) \sin \alpha - (z_w + z_{O1}^{O2}) \cos \alpha + h - T_l \cos(\theta) - d - ge]^2} \quad (16)$$

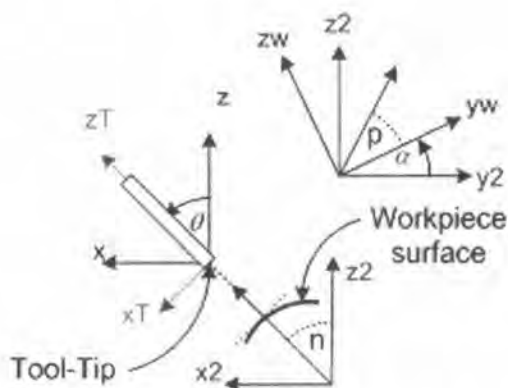
$$l_4 = (x_w + x_{Ow}^{O1} + p) + T_l \sin(\theta) - w - \sqrt{R^2 - [(y_w + y_{Ow}^{O1}) \cos \alpha - (z_w + z_{O1}^{O2}) \sin \alpha - b + a - e]^2 - [-(y_w + y_{Ow}^{O1}) \sin \alpha - (z_w + z_{O1}^{O2}) \cos \alpha + h - T_l \cos(\theta) - d - ge]^2} \quad (17)$$

สำหรับทิศทางของปลายแกนกลหาได้ดังนี้โดยพิจารณารูปที่ 2.6 ประกอบ

$$p = \arctan\left(\frac{K_w}{J_w}\right) \quad \text{โดยที่} \quad I_2 = I_w \quad (18)$$

$$J_2 = (\sqrt{J_w^2 + K_w^2}) \cos(\alpha + p) \quad (19)$$

$$K_2 = (\sqrt{J_w^2 + K_w^2}) \sin(\alpha + p) \quad (20)$$



รูปที่ ค.4 การตั้งแกนของปลายแกนกล

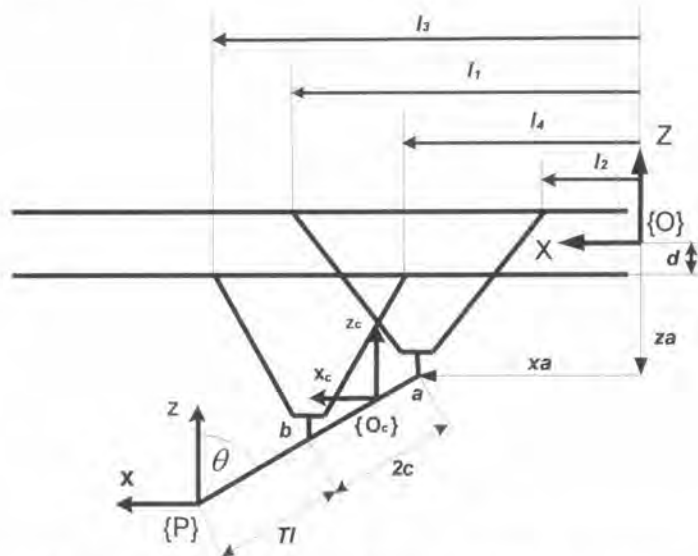
ทำให้สามารถหาค่าทิศทางของแกนกลตามได้ดังนี้

$$\alpha = \pm 90^\circ - \arctan\left(\frac{K_w}{J_w}\right) \quad \text{โดยที่} \quad -90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad (21)$$

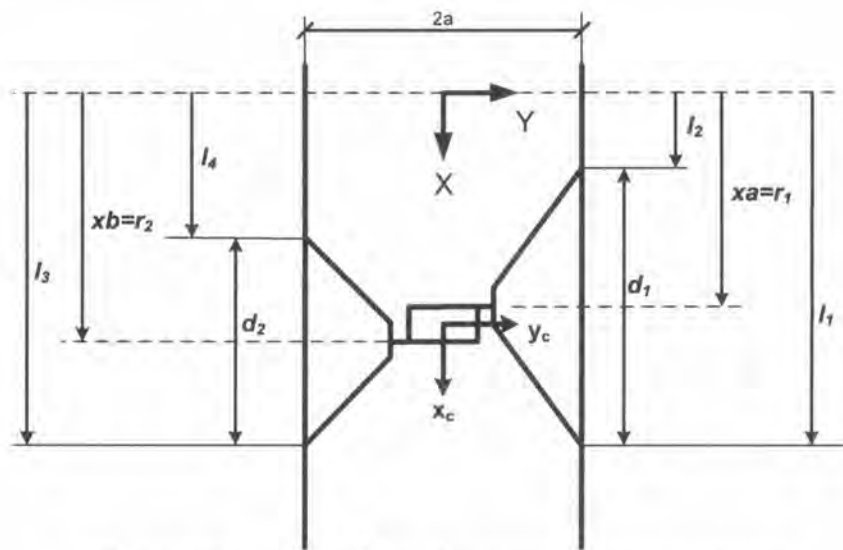
$$\theta = \arctan\left(\frac{I_w}{\sqrt{J_w^2 + K_w^2}}\right) \quad \text{โดยที่} \quad -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (22)$$

ค.2 สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์

ในทางกลับกันเมื่อกำหนดข้อมูลของตำแหน่งที่ข้อต่อต่างๆของแขนกลตามมาให้ เราสามารถหาสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ นายกรรมมันต์ ชูประเสริฐ ได้ดังนี้



รูปที่ ค.5 รูปร่างและการตั้งแกนเมื่อมองจากด้านข้างของแขนกล



รูปที่ ค.6 รูปร่างและการตั้งแกนเมื่อมองจากด้านบนของแขนกล

กำหนดให้ $r_1 = \frac{l_1 + l_2}{2}$, $r_2 = \frac{l_3 + l_4}{2}$, $d_1 = l_1 - l_2$, $d_2 = l_3 - l_4$

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{4c^2 - (r_2 - r_1)^2}}{2c} \quad (23)$$

จากสมการที่ 1 สมการที่ 2 และสมการที่ 6 และสมการที่ 7 จะได้

$$(l_1 - x_a - w)^2 + (l_3 - x_b - w)^2 = 2R^2 - 2y_c^2 - 2(b - a + e)^2 - 2(z_c + ge)^2 - 2(c \cdot \cos \theta - d)^2 \quad (24)$$

$$(l_2 - x_a - w)^2 - (l_4 - x_b - w)^2 = -4y_c(b - a - e) - 4(z_c + ge)(c \cdot \cos \theta - d) \quad (25)$$

จากรูปที่ ค.5 กำหนดให้

$$(l_2 - x_a)^2 = (l_1 - x_a)^2 = \frac{d_1^2}{4} \quad (26)$$

$$(l_4 - x_b)^2 = (l_3 - x_b)^2 = \frac{d_2^2}{4} \quad (27)$$

ดังนั้นการเคลื่อนที่ในแนวแกน X สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$x = \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) - (c + T_L) \sin \theta \quad (28)$$

การเคลื่อนที่ในแนวแกน Y สามารถหาได้ดังนี้

$$y = y_c = \frac{d_1^2 - d_2^2 - 4w(d_1 - d_2) - 16(d - c \cdot \cos \theta)(z_c + ge)}{16(a - b - e)} \quad (29)$$

จากสมการที่ 24 และ 25 สามารถหาสมการการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ได้ดังนี้

$$z_c = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (30)$$

โดยที่ $A = \left(\frac{16^2 (d - c \cos \theta)^2}{128(a - b - e)^2} + 2 \right)$

$$\begin{aligned}
B &= 4.ge + \frac{512.ge.(d - c \cos \theta)^2}{128(a - b - e)^2} \\
&\quad - \frac{32(d - c \cos \theta)(d_1^2 - d_2^2 - 4w(d_1 - d_2))}{128(a - b - e)^2} \\
C &= \frac{16^2(d - c \cos \theta)^2.ge^2}{128(a - b - e)^2} \\
&\quad - \frac{32.ge.(d - c \cos \theta)(d_1^2 - d_2^2 - 4w(d_1 - d_2))}{128(a - b - e)^2} \\
&\quad + \frac{(d_1^2 - d_2^2 - 4w(d_1 - d_2))^2}{128(a - b - e)^2} + 2w^2 - w(d_1 + d_2) + 2.ge^2 + 2e^2 \\
&\quad + \frac{(d_1^2 + d_2^2)}{4} - 2R^2 + 2(b - a)^2 - 4e(a - b) + 2(c \cdot \cos \theta - d)^2
\end{aligned}$$

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z คือ

$$z = z_c - (c + T_L) \cos \theta \quad (31)$$

เนื่องจากชิ้นงานต้องถูกวางที่โต๊ะจับยึดชิ้นงานดังนั้นต้องหาสมการการเคลื่อนที่เทียบกับแกนชิ้นงานที่วางอยู่บนโต๊ะโดยใช้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\{O\} \xrightarrow{T} \{O_2\} \xrightarrow{R} \{O_2\} \xrightarrow{T} \{O_1\} \xrightarrow{T} \{O_w\}$$

ทำให้ได้ $x_w = x + p + x_{O_1}^{O_w}$ (32)

$$y_w = y \cdot \cos(\alpha) + (z + h) \cdot \sin(\alpha) + y_{O_1}^{O_w} \quad (33)$$

$$z_w = (z + h) \cdot \cos(\alpha) - y \cdot \sin(\alpha) + z_{O_2}^{O_1} \quad (34)$$

ทิศทางของปลายแขนกลตามหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$I_w = \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2 \theta}}} \quad \text{โดยที่} \quad \text{sign}(I_w) = \text{sign}(\theta) \quad (35)$$

$$J_w = \pm \frac{1}{(\sqrt{1 + \tan^2 \theta}) \cdot (\sqrt{1 + \tan^2(90 - \alpha)})} \quad \text{โดยที่} \quad \text{sign}(J_w) = \text{sign}(\alpha) \quad (36)$$

$$K_w = \frac{\tan(90 - \alpha)}{(\sqrt{1 + \tan^2 \theta}) \cdot (\sqrt{1 + \tan^2(90 - \alpha)})} \text{ โดยที่ } \text{sign}(K_w) = + \quad (37)$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปิยะบุตร งามขมาภรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 15 มีนาคม 2515 ที่จังหวัดอุดรธานี สำเร็จ การศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล จังหวัดอุดรธานี หลังจากนั้นได้เข้าศึกษา ต่อในระดับปริญญาบัณฑิตในคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้สำเร็จหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเครื่องกลในปี การศึกษา 2537 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2547

