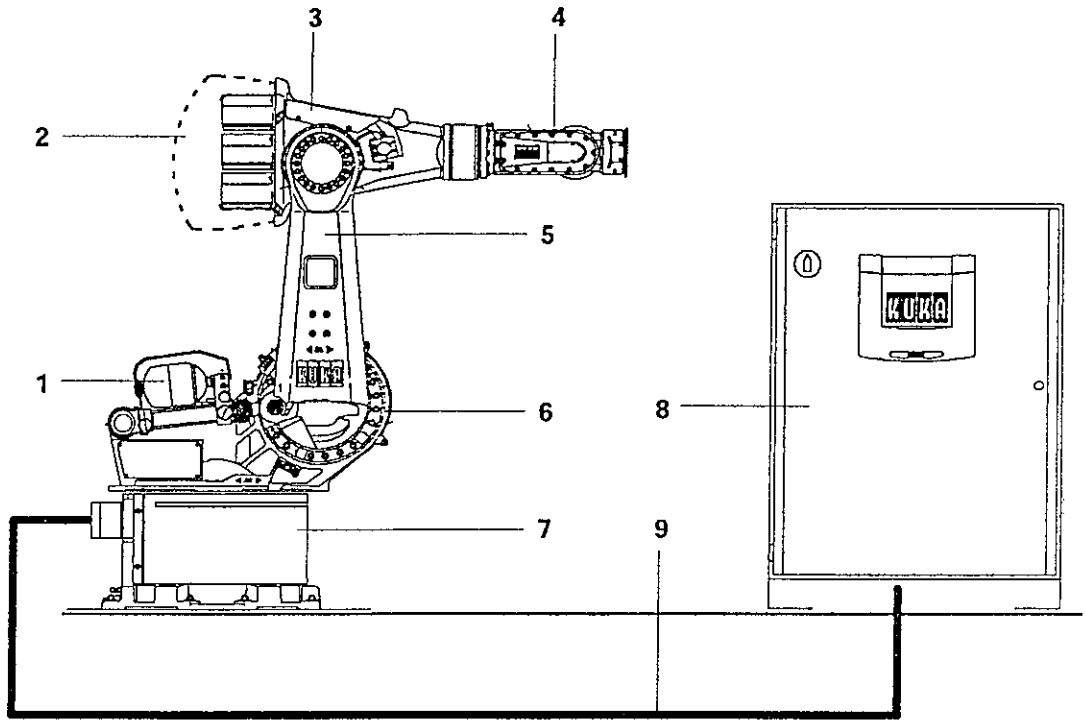
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ข้อมูลของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2

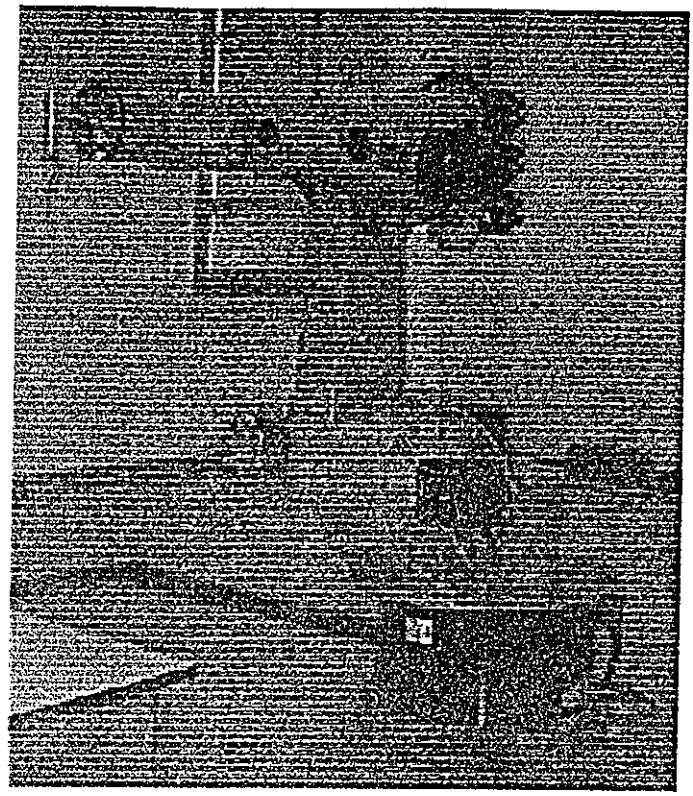
ก.1 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2

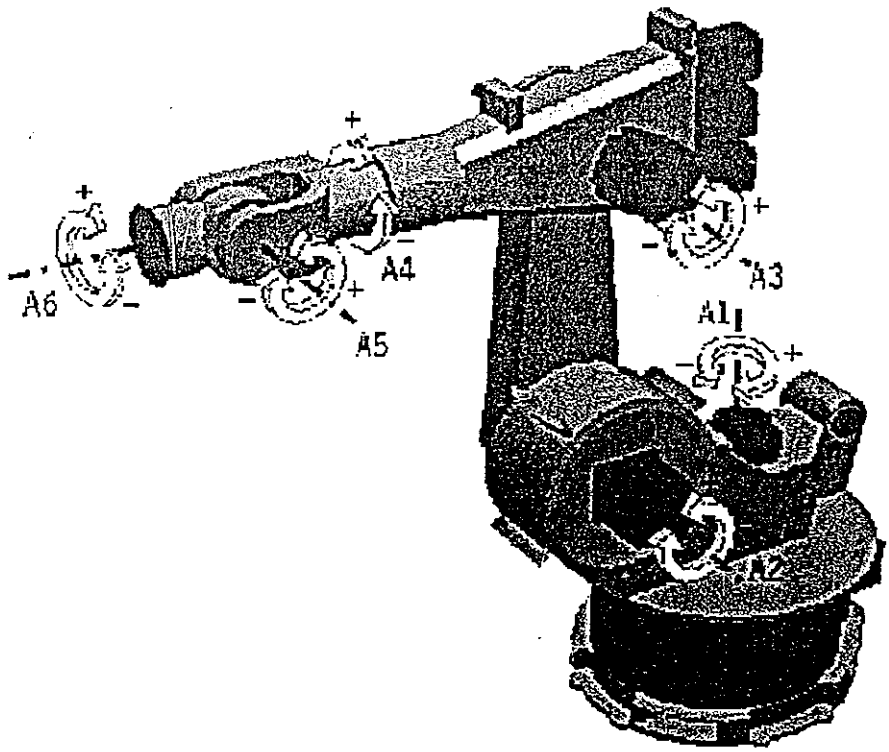
หุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2 เป็นหุ่นยนต์ 6 แนวแกน ซึ่งมีส่วนประกอบของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ดังต่อไปนี้



1 Hydropneumatic counterbalancing system
2 Counterweight A 3 (only on KR 150/2, KR 150 L150/2, KR 150 L120/2, KR 200/2)
3 Arm
4 In-line wrist
5 Link arm
6 Rotating column
7 Base frame
8 Control cabinet (see separate documentation)
9 Connecting cables

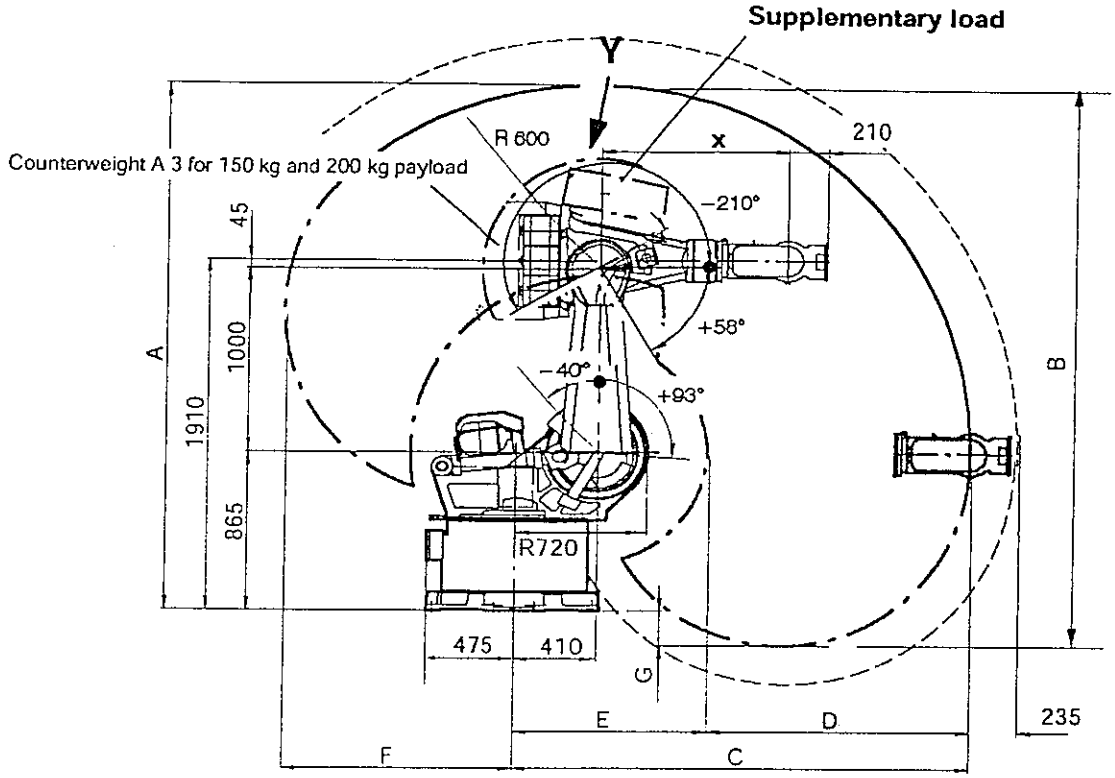
รูปที่ ก.1 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2

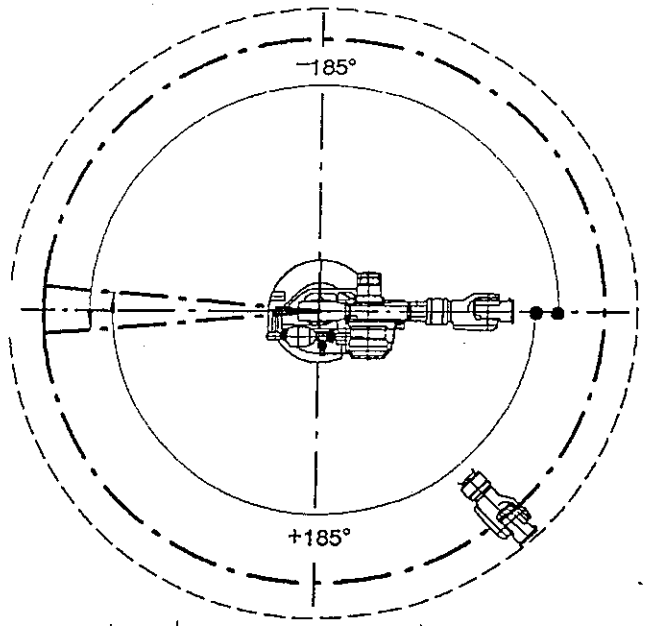




รูปที่ ก.2 แสดงรูปหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2

ก.2 ลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2





	A	B	C	D	E	F	G	X
KR 125/2	2866	3054	2410	1405	1005	1234	188	1000
KR 125 L100/2	3066	3454	2610	1525	1085	1434	388	1200
KR 125 L90/2	3266	3854	2810	1603	1207	1634	588	1400
KR 150/2	2866	3054	2410	1405	1005	1234	188	1000
KR 150 L150/2	3066	3454	2610	1525	1085	1434	388	1200
KR 150 L120/2	3266	3854	2810	1603	1207	1634	588	1400
KR 200/2	2866	3054	2410	1405	1005	1234	188	1000

รูปที่ ก.3 แสดงลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2

Axis	Range of motion software limited	Speed
1	±185°	100 °/s
2	+93° to -40°	100 °/s
3	+58° to -210°	100 °/s
4	±350°	154 °/s
5	±120°	167 °/s
6	±350°	251 °/s

ตารางที่ ก.1 แสดงตารางข้อมูลของแกน(Axis) ต่างๆ ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2

ก.3 ลักษณะการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งต่างๆ ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2

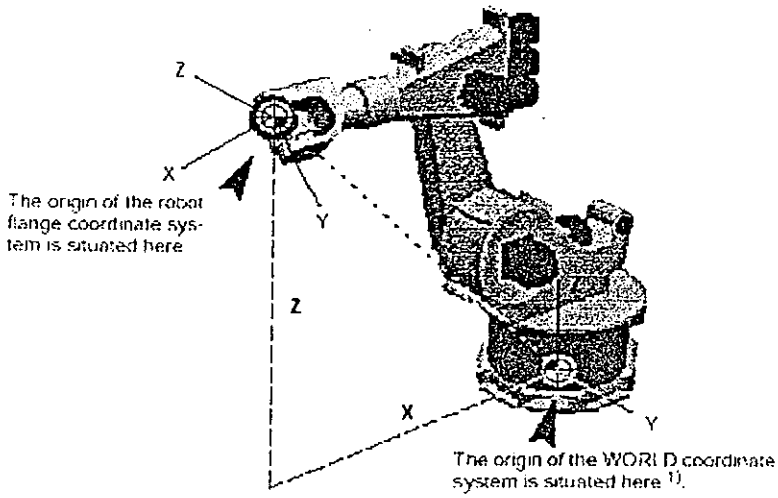
เพื่อให้เห็น ภาพการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมอย่างชัดเจน จะแสดงรูปภาพการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2 ที่ตำแหน่งต่างๆ เพียงบางส่วน ซึ่งแสดงดังรูปที่ ก.4 เมื่อตำแหน่งพิกัดเดิม (Home) ของหุ่นยนต์นี้แสดงดังรูปที่ ก.4.(a)

โดยที่ รูปที่ ก.4.(b) แสดงรูปแกนที่ 5 หมุนทำมุม 45 องศา เมื่อเทียบกับตำแหน่งพิกัดเดิม (Home) จากรูปที่ ก.4.(a) และแกนที่ 3 หมุนทำมุม 80 องศา เมื่อเทียบกับตำแหน่งพิกัดเดิม (Home) จากรูปที่ ก.4.(a)

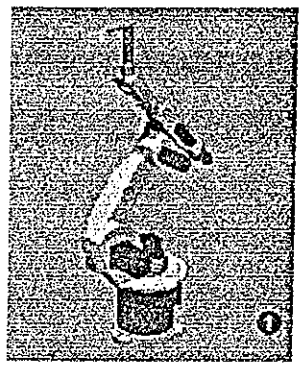
รูปที่ ก.4.(c) แสดงรูปแกนที่ 4 หมุนทำมุม 180 องศา เมื่อเทียบกับตำแหน่งพิกัดจากรูปที่ ก.4.(b) และแกนที่ 5 หมุนทำมุม –45 องศา เมื่อเทียบกับตำแหน่งพิกัดจุดเริ่มต้นจากรูปที่ ก.4.(b)

รูปที่ ก.4.(d) แสดงรูปแกนที่ 3 หมุนทำมุม -50 องศา เมื่อเทียบกับตำแหน่งพิกัดจากรูปที่ ก.4.(c)

รูปที่ ก.4.(e) แสดงรูปแกนที่ 1 หมุนทำมุม 180 องศา เมื่อเทียบกับตำแหน่งพิกัดจากรูปที่ ก.4.(d)



(a)



(b)

(c)

(d)

(e)

รูปที่ ก.4 แสดงลักษณะของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ KUKA KRC 125/2 ที่ตำแหน่งต่างๆ

ภาคผนวก ข. ขั้นตอนและภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมควบคุม และโปรแกรมแสดงผลการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2

ข.1 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2

1.Copyโฟลเดอร์ที่ชื่อ Pointer ลงในฮาร์ดดิสก์หลังจากนั้นเปิดโฟลเดอร์นี้ขึ้นมาแล้วดับเบิลคลิกที่ Icon Pointer เพื่อเปิดโปรแกรม

2. ในหน้าจอแรกจะมีหัวข้อให้เลือก 4 หัวข้อ ดังรูปที่ ข.1 ผู้ใช้สามารถเลือกหัวข้อได้ตามต้องการโดยคลิกที่ปุ่มหน้าหัวข้อนั้น โดยที่

หัวข้อที่ 1 จะเป็นส่วนของการแนะนำโปรแกรมโดยทั่วไป ดังรูปที่ ข.2

หัวข้อที่ 2 แสดงสมการหลักที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมและโปรแกรมแสดงผลการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ดังรูปที่ ข.3

หัวข้อที่ 3 แสดงกราฟและภาพการเคลื่อนของตำแหน่งปลายของหุ่นยนต์ รวมทั้งรูปแบบการเคลื่อนที่ ความเร็ว ความเร่งระหว่างมุมต่างๆของหุ่นยนต์ ซึ่งจะแสดงที่ละข้อต่อ ดังรูปที่ ข.4

หัวข้อที่ 4 เป็นส่วนที่ใช้เรียกโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ขึ้นมาโดยเมื่อผู้ใช้เลือกหัวข้อนี้แล้วจะเข้าสู่หน้าจอ Form เชื่อมต่อกับโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ แล้วให้ดับเบิลคลิกที่ Icon Robot_ik.exetเพื่อเข้าสู่โปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดังรูปที่ ข.5

หัวข้อที่ 5 เป็นรายละเอียดของคณะผู้จัดทำและอาจารย์ที่ปรึกษา ดังรูปที่ ข.6

เมื่อเข้าไปในแต่ละหัวข้อถ้าผู้ใช้ต้องการกลับสู่หน้าจอแรกก็ให้คลิกที่ปุ่ม “กลับสู่เมนูหลัก”

2. เลือกคลิกที่หัวข้อที่ 4 เพื่อเข้าสู่โปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ การใช้งานจะเริ่มจากการกรอกค่าตำแหน่งปลายของแขนกลตาม World Coordinate X, Y, Z ในกรอบพิกัดปลายที่ต้องการ หรือกดปุ่มเลื่อนพิกัดที่อยู่ทางด้านมุมล่างขวาของจอภาพ (Manual control) โดยค่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับการกดค่าในทิศทางบวกหรือลบตามพิกัดของแต่ละตัวซึ่งค่าพิกัดจะมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (พิกัด X , Z ที่กรอกต้องอยู่ระหว่าง (+-)2000 ส่วนพิกัด Y ต้องอยู่ระหว่าง(+2000)กับ(-450)เนื่องจากเป็นช่วงมากที่สุดที่แขนกลสามารถเคลื่อนไปถึง) แล้วกรอกค่าเวลาที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ระหว่างตำแหน่งหนึ่งไปสู่ตำแหน่งถัดไปด้วย ดังรูปที่ ข.7

3. กรอกค่ามุมในกรอบ มุมของการเข้าสู่จุดปลาย ซึ่งจะเป็นค่าที่การกำหนดลักษณะการวางตัวเข้าสู่เข้าสู่จุดปลายให้กับแขนกลซึ่งค่ามุมที่กรอกจะมีหน่วยเป็นองศา ดังรูปที่ ข.7

4. คลิกที่ปุ่ม OK จะเป็นการเก็บค่าพิกัดไว้ 1 ครั้ง ในโปรแกรมนี้ผู้ใช้สามารถกรอกค่าตำแหน่งที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ได้ครั้งละหลายๆตำแหน่งโดยการกรอกค่าพิกัดแล้วคลิก OK ทุกครั้งที่ต้องการเก็บค่าซึ่งจะมีการแสดงค่าที่กรอกไว้ในกรอบค่าพิกัดที่เก็บ โดยบรรทัดแรกจะเป็น

จุดเริ่มต้นของแขนกลและบรรทัดต่อๆไปจะเป็นจุดที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไป ตามลำดับ ดังรูปที่ ข.8 และ ข.9 (ถ้ากรอกค่าพิกัดผิดหรือต้องการ โปรแกรมเริ่มคำนวณค่าชุดใหม่ให้คลิกปุ่ม RESET ซึ่งจะเป็นการลบค่าในกรอบ ค่าพิกัดที่เก็บทั้งหมด)

5. ถ้าคลิกปุ่ม OK แล้วโปรแกรมฟ้องขึ้นมาว่า "ค่าพิกัดที่กรอกแขนกลไม่สามารถเคลื่อนที่ไปตำแหน่งนั้นได้" หรือ "ค่าพิกัดที่กรอกแขนกลไม่สามารถเคลื่อนที่ไปตำแหน่งนั้นได้เนื่องจากมีค่ามุมใดๆไม่อยู่ในช่วงของมุมนั้น" หมายความว่าพิกัดที่ต้องการนั้นแขนกลไม่สามารถเคลื่อนไปที่ตำแหน่งนั้นได้ เนื่องจากมุมและความยาวของแขนกลมีขนาดจำกัด ผู้ใช้จึงต้องกรอกค่าตำแหน่งปลายและมุมของการเข้าสู่จุดปลายใหม่ ดังรูปที่ ข.16

6. แล้วคลิก RUN เพื่อสั่งให้โปรแกรมคำนวณค่ามุมที่แขนกลแต่ละแขนต้องวางตัวเพื่อให้ได้ตำแหน่งปลายแขนกลตามที่กำหนดไว้สามารถดูค่ามุมที่คำนวณได้ในกรอบ มุมของแต่ละแกน

7. เมื่อคลิกปุ่ม RUN แล้วจะมีข้อความ "สิ้นสุดการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดHome" รูปที่ ข.10 ให้คลิก OK เพื่อให้โปรแกรมแสดงการตรวจสอบค่าตำแหน่งปลายจากค่ามุมที่คำนวณออกมาได้ โดยจะแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงขณะทำการคำนวณในกรอบ แสดงการตรวจสอบพิกัดจากมุมที่คำนวณได้ ซึ่งเมื่อแสดงการคำนวณเสร็จแล้วให้คลิกปุ่ม OK บนข้อความ "สิ้นสุดการเคลื่อนที่เข้าสู่จุดที่ 1" แล้วสังเกตที่ค่า X, Y, Z ว่าตรงกับที่กรอกไว้ตอนแรกหรือไม่ถ้าตรงกันหมายความว่าค่าที่ได้นั้นถูกต้อง ดังรูปที่ ข.11 แต่ถ้ามีตำแหน่งปลายหลายจุดโปรแกรมจะแสดงการตรวจสอบในตำแหน่งต่อๆไปด้วย ดังรูปที่ ข.12 (ถ้าต้องการเริ่มต้นคำนวณใหม่ให้คลิก RESET แล้วเริ่มทำตั้งแต่ ข้อ 2 ถึง ข้อ 7)

8. เมื่อต้องการ Save ค่าให้คลิกเครื่องหมาย Save บน Toolbars หรือ เลือกเมนู File>Save ดังรูปที่ ข.13 จะปรากฏหน้าต่างของการ Save ค่าพิกัด X, Y, Z ให้ตั้งชื่อ File แล้วคลิก Save ดังรูปที่ ข.14 หลังจากนั้นจะปรากฏหน้าต่างของการ Save ค่ามุม ให้ตั้งชื่อ File แล้วคลิก Save ดังรูปที่ ข.15

9. โปรแกรมนี้ผู้ใช้สามารถใช้ Menu Bar และ Toolbars ในการจัดการกับข้อมูลในกรอบค่าพิกัดที่เก็บและค่ามุมที่เก็บได้เหมือนกับการใช้ Window ทั่วไป

ข.2 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมแสดงผลการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2

1.Copy โฟลเดอร์ที่ชื่อ Pointer ลงในฮาร์ดดิสก์หลังจากนั้นเปิดโฟลเดอร์นี้ขึ้นมาแล้วดับเบิลคลิกที่ Icon Pointer เพื่อเปิดโปรแกรม

2. ในหน้าจอแรกจะมีหัวข้อให้เลือก 4 หัวข้อ ดังรูปที่ ข.1 ผู้ใช้สามารถเลือกหัวข้อได้ตามต้องการโดยคลิกที่ปุ่มหน้าหัวข้อนั้นโดย

หัวข้อที่ 1 จะเป็นส่วนของการแนะนำโปรแกรมโดยทั่วไป ดังรูปที่ ข.2

หัวข้อที่ 2 แสดงสมการหลักที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมทั้ง โปรแกรมควบคุม และ แบบจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกล ดังรูปที่ ข.3

หัวข้อที่ 3 แสดงกราฟและภาพการเคลื่อนของตำแหน่งปลายของแขนกล รวมทั้งรูปแบบการเคลื่อนที่ ความเร็ว ความเร่งระหว่างมุมต่างๆของแขนกลซึ่งจะแสดงที่ละข้อต่อ ดังรูปที่ ข.4

หัวข้อที่ 4 เป็นส่วนที่ใช้เรียกโปรแกรมควบคุมแขนกลขึ้นมาโดยเมื่อผู้ใช้เลือกหัวข้อนี้แล้วจะเข้าสู่หน้าจอForm เชื่อมต่อกับโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แล้วให้ผู้ใช้ดับเบิลคลิกที่ Icon Robot_Ik.exe เพื่อเข้าสู่โปรแกรมควบคุม ดังรูปที่ ข.5

หัวข้อที่ 5 เป็นรายละเอียดของคณะผู้จัดทำและอาจารย์ที่ปรึกษา ดังรูปที่ ข.6

เมื่อเข้าไปในแต่ละหัวข้อถ้าผู้ใช้ต้องการกลับสู่หน้าจอแรกก็ให้คลิกที่ปุ่ม "กลับสู่เมนูหลัก"

3. เมื่อคลิกหัวข้อที่ 3 จะเข้าสู่หน้าต่างของแบบจำลองการเคลื่อนไหวให้คลิกที่ปุ่มหน้าหัวข้อที่ 3 อีกครั้ง ดังรูปที่ ข.4

4. เมื่อเข้าสู่หน้าจอการแสดงแบบจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแล้ว ขั้นตอนการแสดงกราฟของการเคลื่อนที่ของแขนกลจะเริ่มโดยให้ผู้ใช้เปิด File มุมที่ได้ Save ไว้จากโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ดังรูปที่ ข.17 ซึ่งค่าที่เปิดออกมาจะไปปรากฏในกรอบ มุมที่ใช้ในการคำนวณ ดังรูปที่ ข.18 แต่ถ้าต้องการกรอกค่ามุมเองก็สามารถทำได้ โดยการกรอกค่าในกรอบ มุมที่ต้องการ (จะต้องค่ามุมให้อยู่ในช่วงที่แขนกลสามารถทำได้ซึ่งได้แสดงไว้ที่หน้ากรอบที่จะกรอกค่ามุม) พร้อมทั้งกรอกเวลาที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ด้วย แล้วคลิก OK เมื่อต้องการให้มีการแสดงการเคลื่อนที่หลายจุดก็สามารถกรอกได้หลายชุด

5. คลิก RUN แล้วจะมีกรอบแจ้งว่า"จบการเคลื่อนที่ครั้งที่ 1" ดังรูปที่ ข.19 ให้คลิก OK ไปจนกว่าจะหมดซึ่งโปรแกรมจะเริ่มคำนวณค่าจุดปลาย ดังรูปที่ ข.20 และ ข.21 (แสดงในกรอบพิกัด X, Y ,Z)พร้อมทั้งแสดงการเคลื่อนที่ของจุดปลายเป็นแบบ กราฟ 2 มิติในแต่ละระนาบ ตั้งแต่จุดแรกจนถึงจุดสุดท้าย

6. หลังจากนั้นผู้ใช้สามารถดูลักษณะการเคลื่อนที่ ความเร็ว ความเร่ง ระหว่างจุดของแต่ละข้อต่อได้โดยกรอกค่าจุดที่ต้องการดู (เช่นกรอกเลข 1 จะหมายถึงว่าต้องการให้แสดงค่าระหว่างบรรทัดที่ 1 และ 2 จากกรอบ มุมที่ใช้ในการคำนวณ) แล้วคลิกเลือกที่ ปุ่ม Trajectory, Velocity, Acceleration

7. เมื่อเข้าสู่หน้าจอ แบบจำลองการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อในระยะเวลาที่กำหนด แล้วให้คลิก OK เพื่อนำค่าที่เลือกไว้มาแสดง ซึ่งจะมีการบอกว่ากำลังแสดงระหว่างจุดต้นและจุดปลายใดในกรอบจุดเริ่มต้นของหุ่นยนต์(Initial Position)และจุดปลายของหุ่นยนต์(Goal Position)พร้อมเวลาที่ใช้

8. จะมีการแสดงกราฟซึ่งมี 6 ข้อต่อ สามารถเลือกดูแต่ละข้อต่อได้โดยคลิกที่แถบของมัน การแสดงกราฟในส่วนของลักษณะการเคลื่อนที่(Trajectory)ระหว่างจุดของแต่ละข้อต่อ เช่น ข้อต่อที่ 1 ในตอนแรกมุมอยู่ที่ 0 แล้วจะเคลื่อนที่ไปที่มุม 30 นั้นโปรแกรมจะแบ่งเวลาที่กำหนดในการเคลื่อนที่ระหว่าง 0 ถึง 30 เป็นออกเป็น 50 ช่วง แล้วจะแสดงให้เห็นว่าในแต่ละช่วงเวลานั้นมุมของแขนกลได้เคลื่อนที่ไปถึงมุมที่เท่าไรแล้ว ดังรูปที่ ข.22 ในส่วนของความเร็ว(Velocity) ความเร่ง นั้นก็จะมีความหมายเหมือนกันแต่เปลี่ยนไปแสดงถึงความเร็วและความเร่งแทนมุม ซึ่งสามารถคลิกเลือกได้จากข้างบนแถบเลือกข้อต่อแล้วคลิก OK ดังรูปที่ ข.23 และ ข.24

9. เมื่อย้อนกลับมาดูที่หน้าจอ การแสดงแบบจำลองการเคลื่อนของแขนกล จะเห็นว่ามีปุ่มแสดงภาพ เมื่อคลิกปุ่มนี้แล้วจะเข้าสู่หน้าจอ การแสดงรูปตัวอย่างการเคลื่อนไหวของแขนกลในแบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นรูปการเคลื่อนไหวของแขนกลแบบ 3 มิติ ผู้จัดทำได้กำหนดจุดตัวอย่างขึ้นมา 2 จุด คือ

ตัวอย่างของพิกัดที่ได้แสดงให้ดูในรูป 3 มิติ

X1000 Y200 Z1045 J30 S30 W30 T1 (พิกัด home)

X-200 Y1492.622 Z736.694 J30 S30 W30 T5 (พิกัดที่ 1,Position 1)

X478.707 Y-195.864 Z1083.990 J30 S30 W30 T5 (พิกัดที่ 2,Position 2)

แล้วให้แขนกลแสดงการเคลื่อนที่ให้จุดปลายของแขนกลไปอยู่ในจุดที่กำหนด ดังรูปที่ ข.25 , ข.26 และ ข.27 โดยค่ามุมจะได้มาจากการคำนวณในโปรแกรมนี้ การจะดูภาพเคลื่อนไหวให้คับคลิกที่รูป 3 มิติหรือคลิกขวาที่รูปแล้วเลือก Play แต่ถ้าต้องการดูภาพเคลื่อนไหวไปที่ละช่วงทำได้โดยคลิกขวาที่รูปแล้วเลือก open จะทำให้ผู้ใช้สามารถดูการไหวแบบวีดีโอได้

จากตัวอย่างที่แสดงให้ดูนี้ โปรแกรมจะแสดงค่ามุมดังนี้ คือ

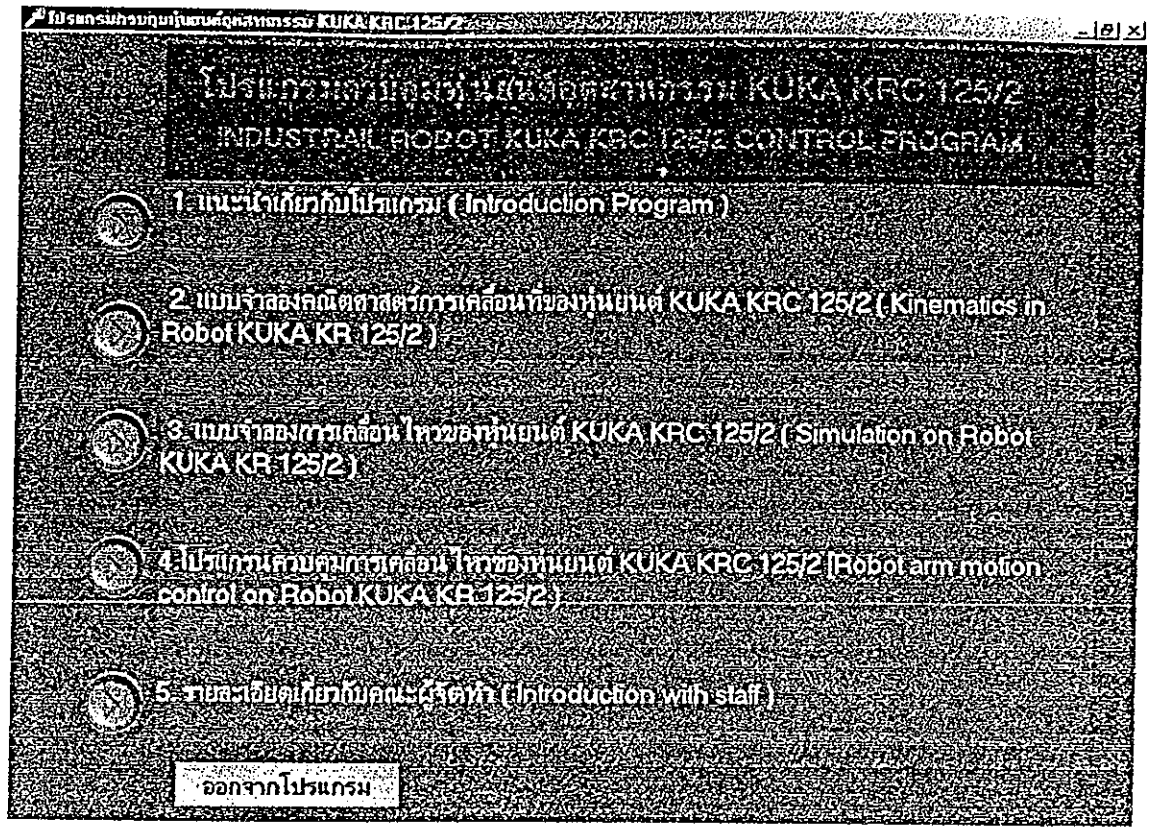
เมื่อหุ่นยนต์อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น (Home position) จะได้ค่ามุม คือ θ_1=0° , θ_2=0° , θ_3= 0° , θ_4=--117.24° , θ_5=91.39° , θ_6=-172.58°

เมื่อจุดปลายของหุ่นยนต์อยู่ในตำแหน่งที่ 1 (Position 1) จะได้ค่ามุม คือ θ_1=90.00°, θ_2=30.00°, θ_3= -20.00° , θ_4=--87.04° , θ_5=90.89° , θ_6=-168.80°

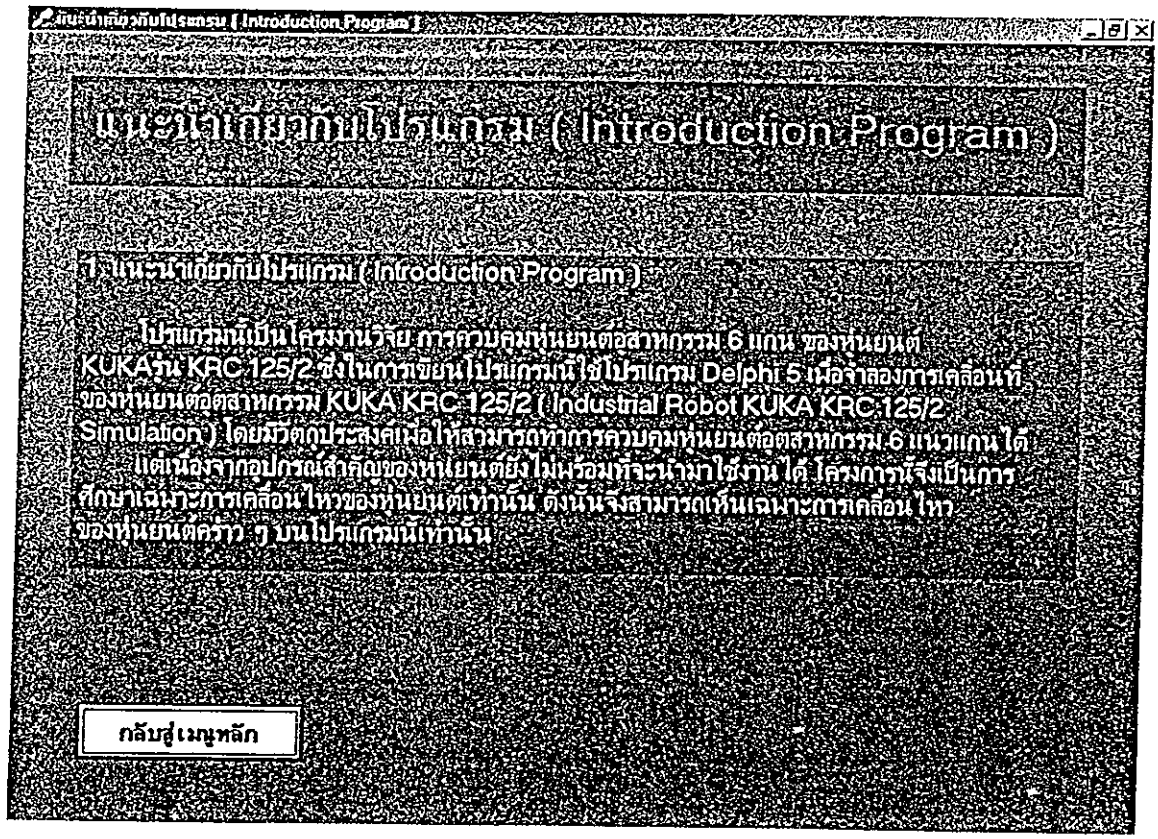
เมื่อจุดปลายของหุ่นยนต์อยู่ในตำแหน่งที่ 2 (Position 2) จะได้ค่ามุม คือ θ_1=-45.00°, θ_2=-30.00°, θ_3= 20.00° , θ_4=-137.49° , θ_5=83.99° , θ_6=--173.11°

10.การออกจากโปรแกรมให้ผู้ใช้คลิกปุ่ม"ย้อนกลับ"ไปจนถึงหน้าแรกแล้วคลิกปุ่ม"ออกจากโปรแกรม"แล้ว คลิก YES

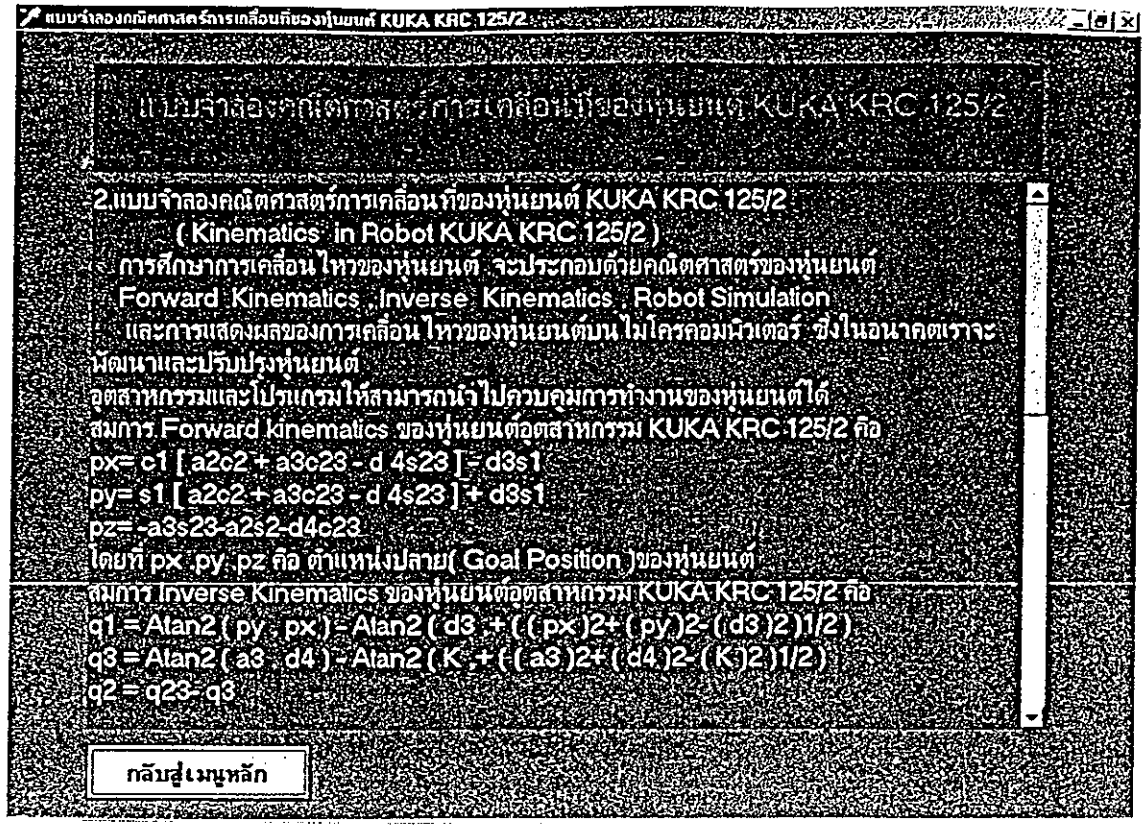
11.โปรแกรมนี้ผู้ใช้สามารถใช้ Menu Bar และ Toolbars ในการจัดการกับข้อมูลในกรอบค่าพิกัดที่เก็บและค่ามุมที่เก็บได้เหมือนกับการใช้ Window ทั่วไป



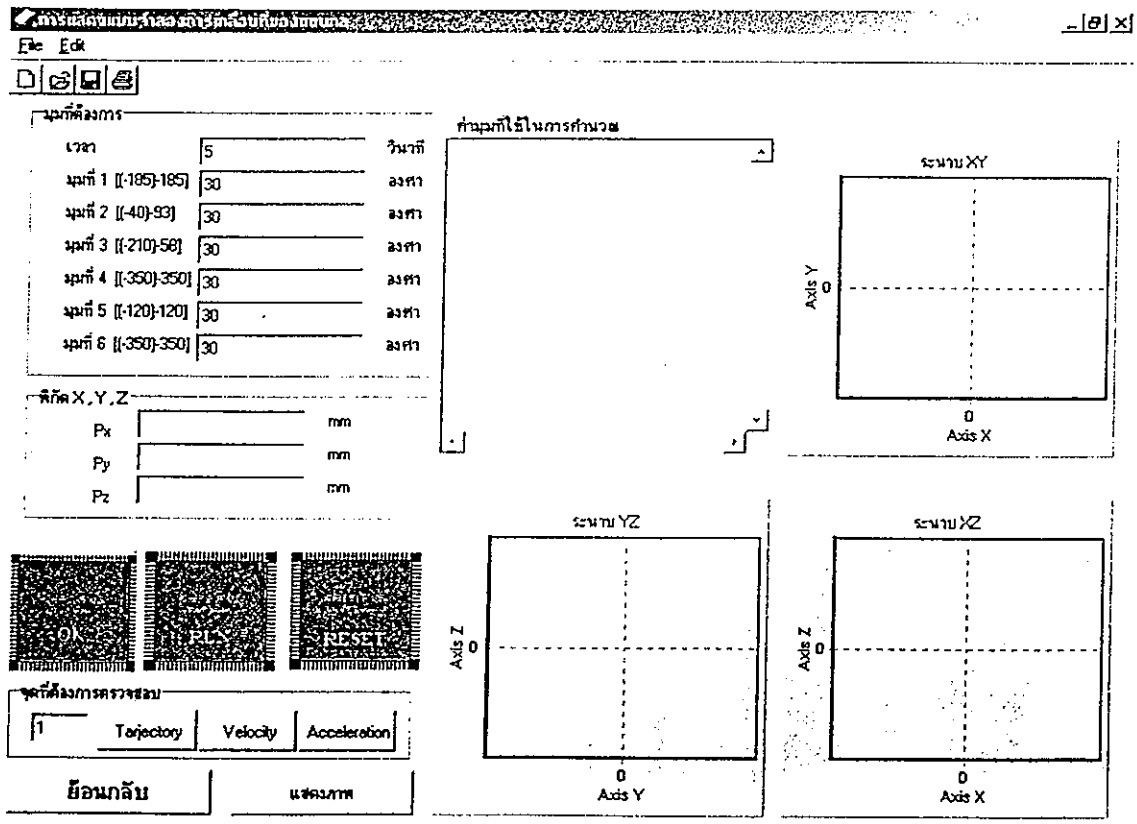
รูปที่ ข.1 แสดงหน้าต่างแรกของโปรแกรม



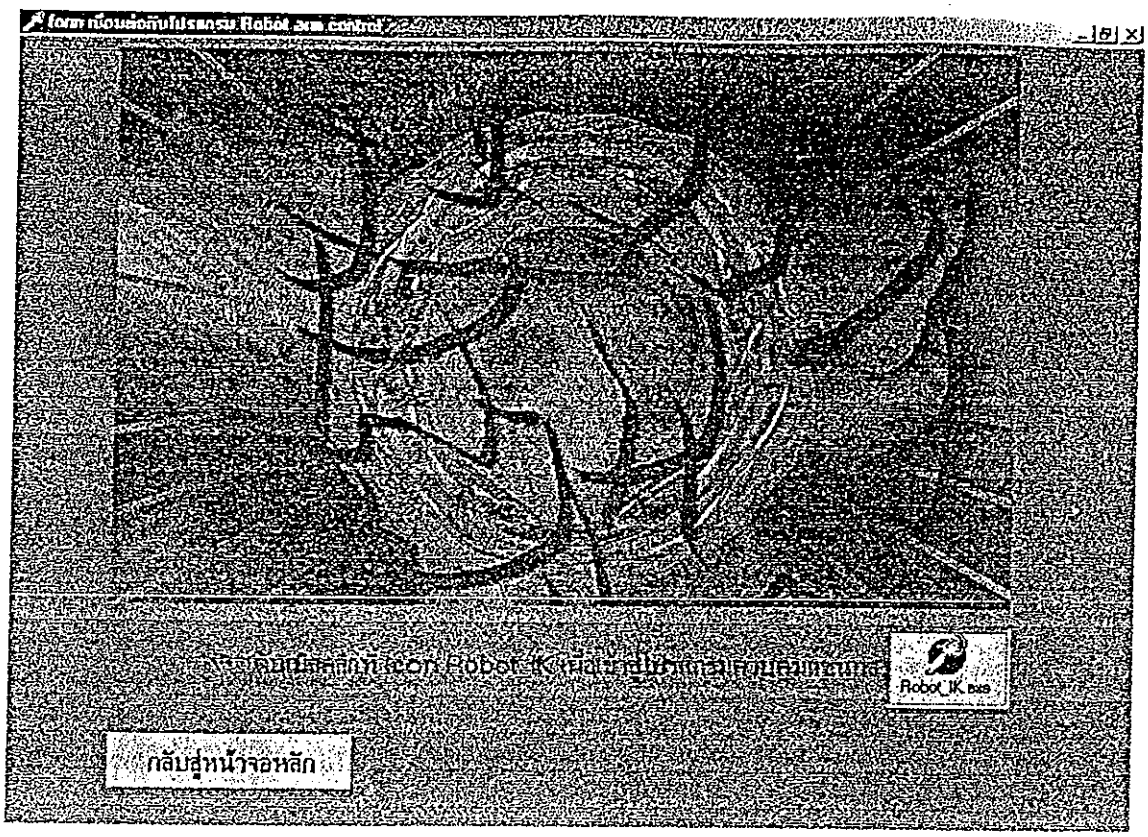
รูปที่ ข.2 แสดงหัวข้อที่ 1 แนะนำเกี่ยวกับโปรแกรม



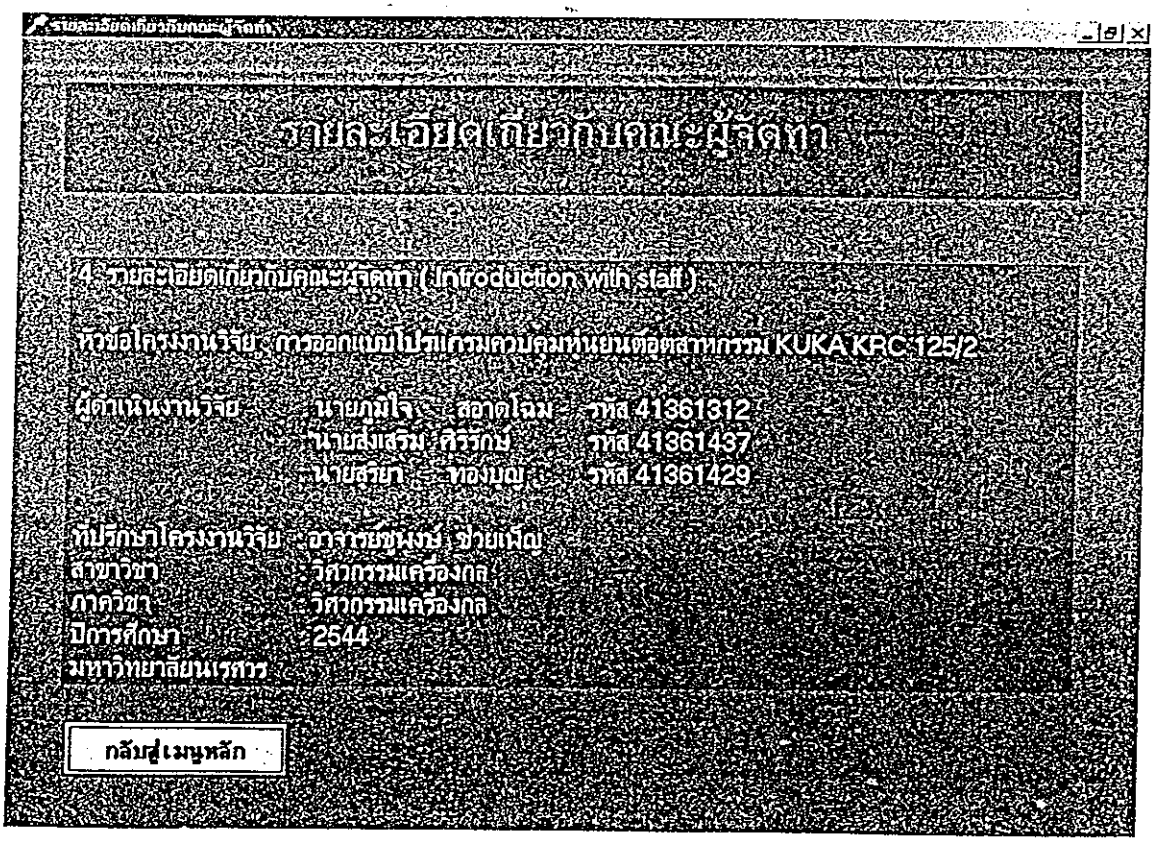
รูปที่ ข.3 แสดงหัวข้อที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์



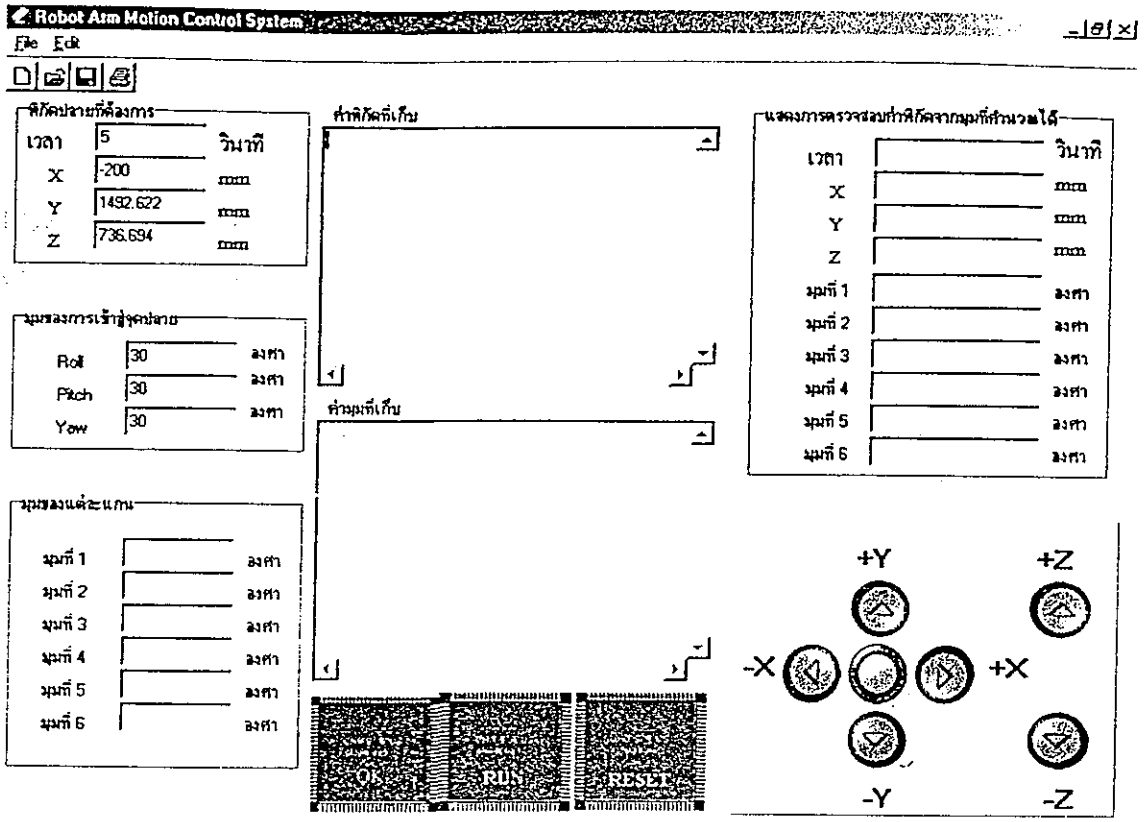
รูปที่ ข.4 แสดงหน้าต่างแรกของ หัวข้อที่ 3 แบบจำลองการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์



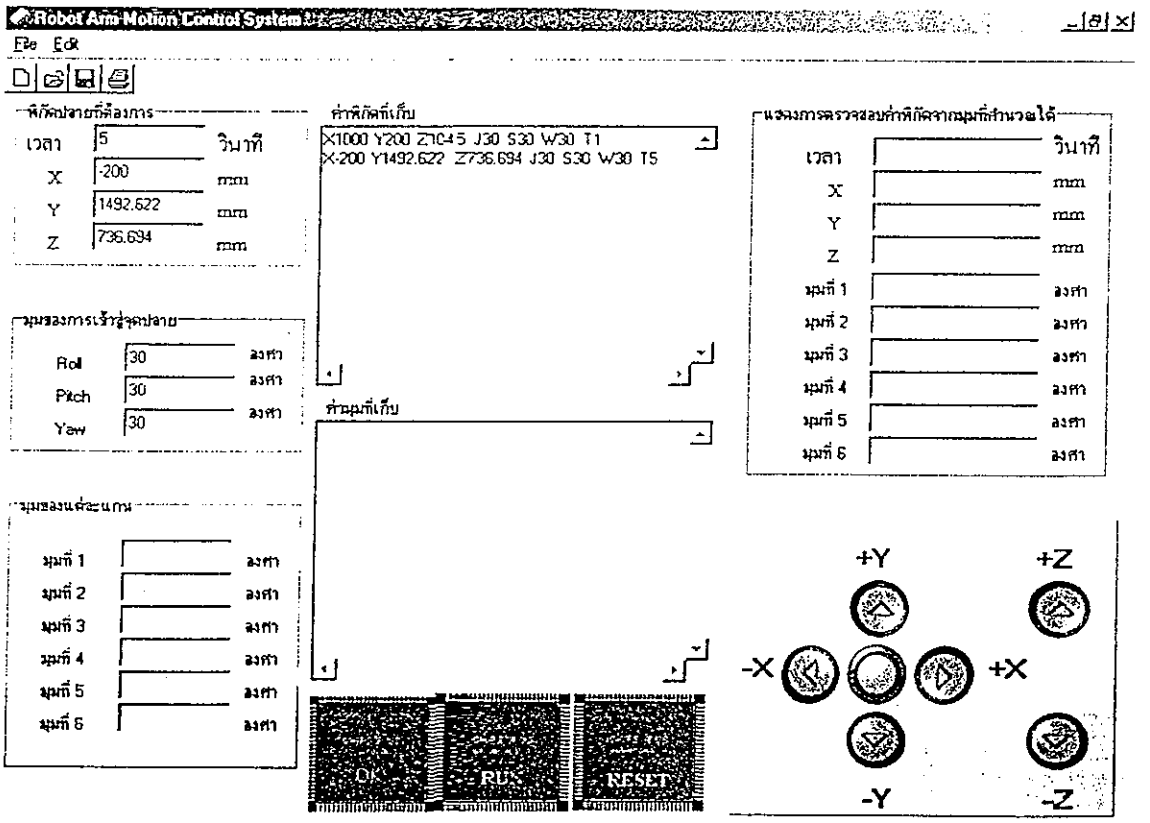
รูปที่ ข.5 แสดงหัวข้อที่ 4 การเข้าสู่โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์



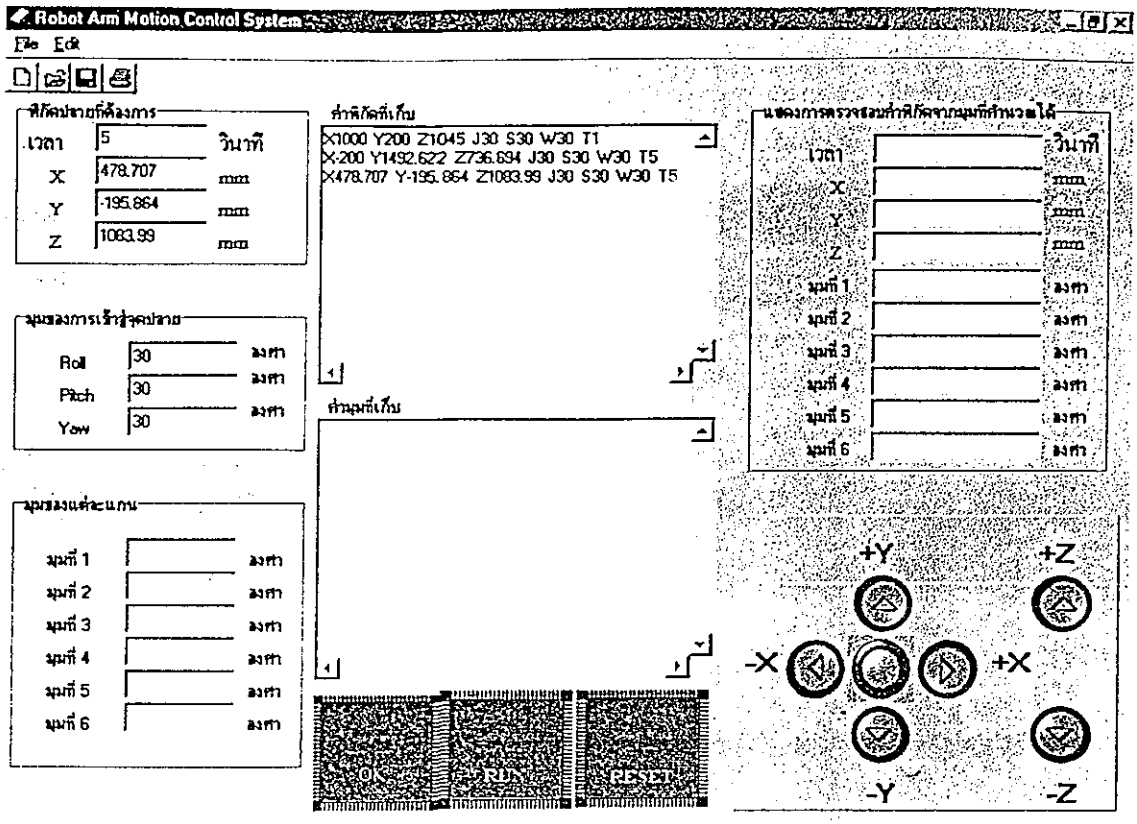
รูปที่ ข.6 แสดงหัวข้อที่ 4 รายละเอียดเกี่ยวกับผู้จัดทำ



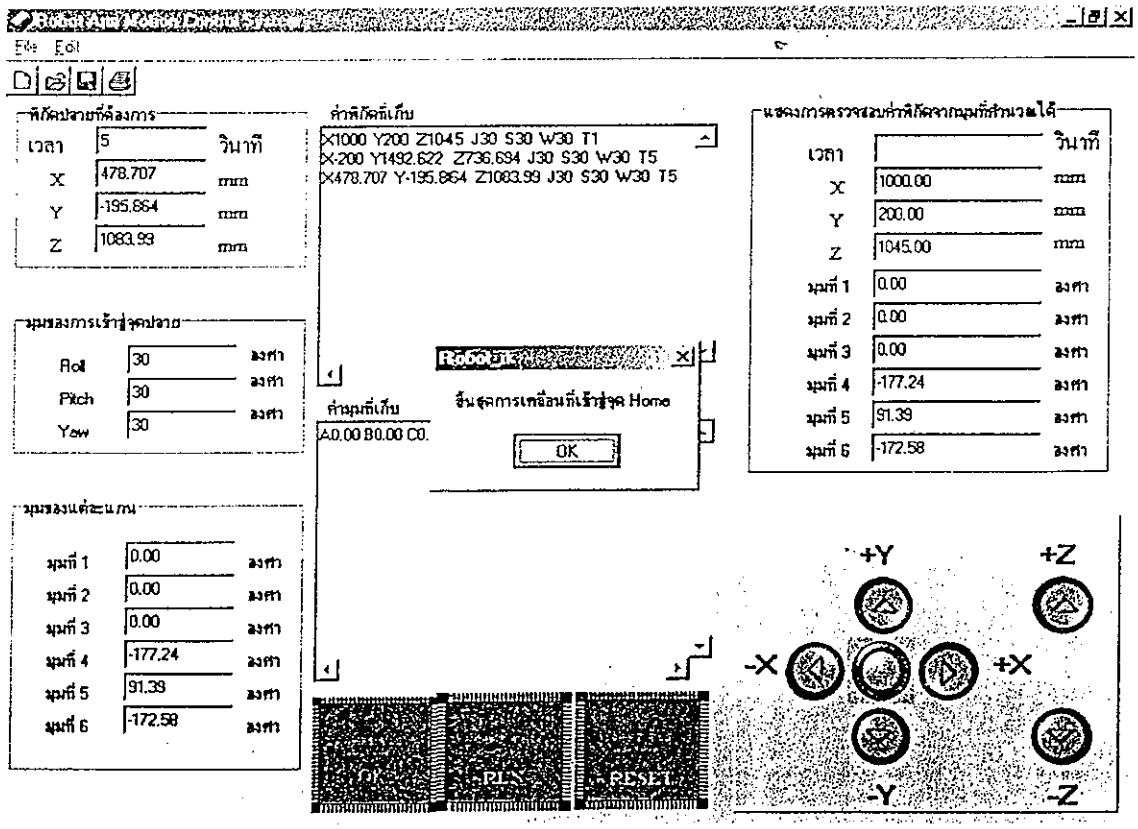
รูปที่ ข.7 แสดงการใส่ค่าตำแหน่งพิกัดและค่ามุมของปลายแขนหุ่นยนต์ ที่ต้องการ



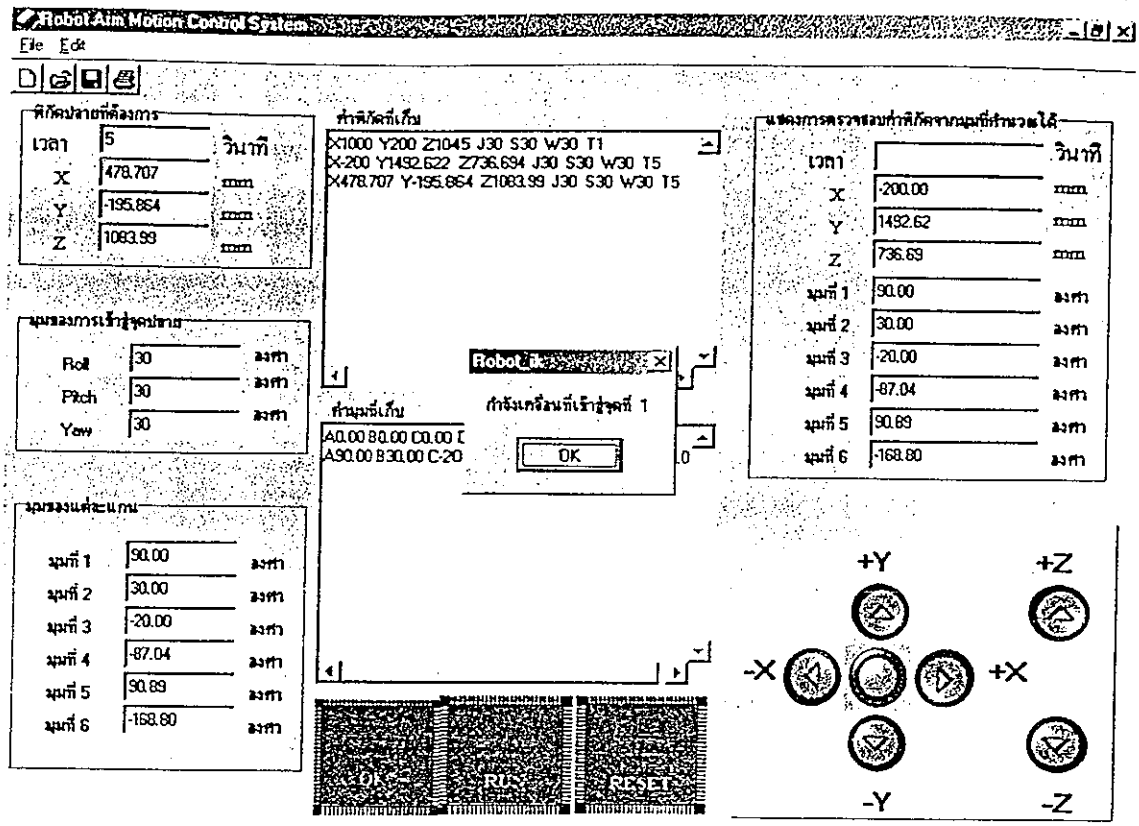
รูปที่ ข.8 แสดงผลพิกัดจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของปลายของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ในตำแหน่งที่ 1



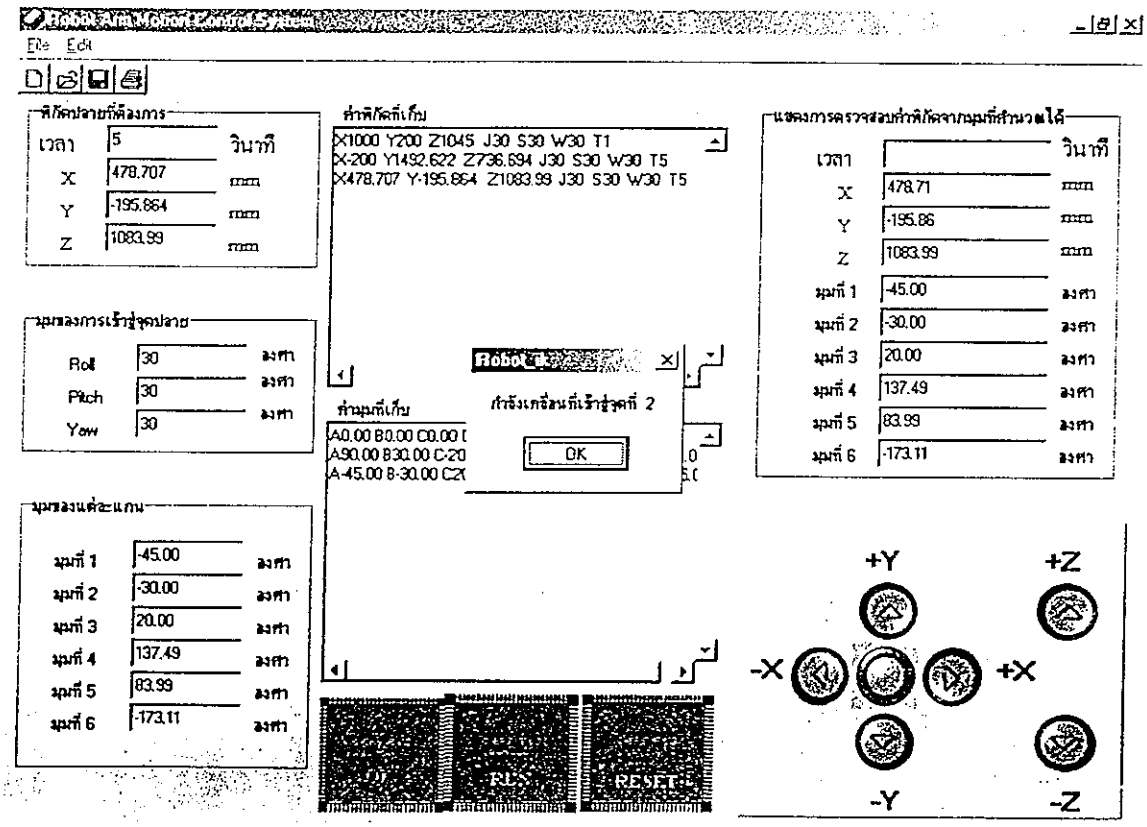
รูปที่ ข.9 เมื่อใส่ค่าพิกัดในตำแหน่งที่ 2 ที่ต้องการและแสดงผลพิกัดในตำแหน่งที่ 2 บนโปรแกรม



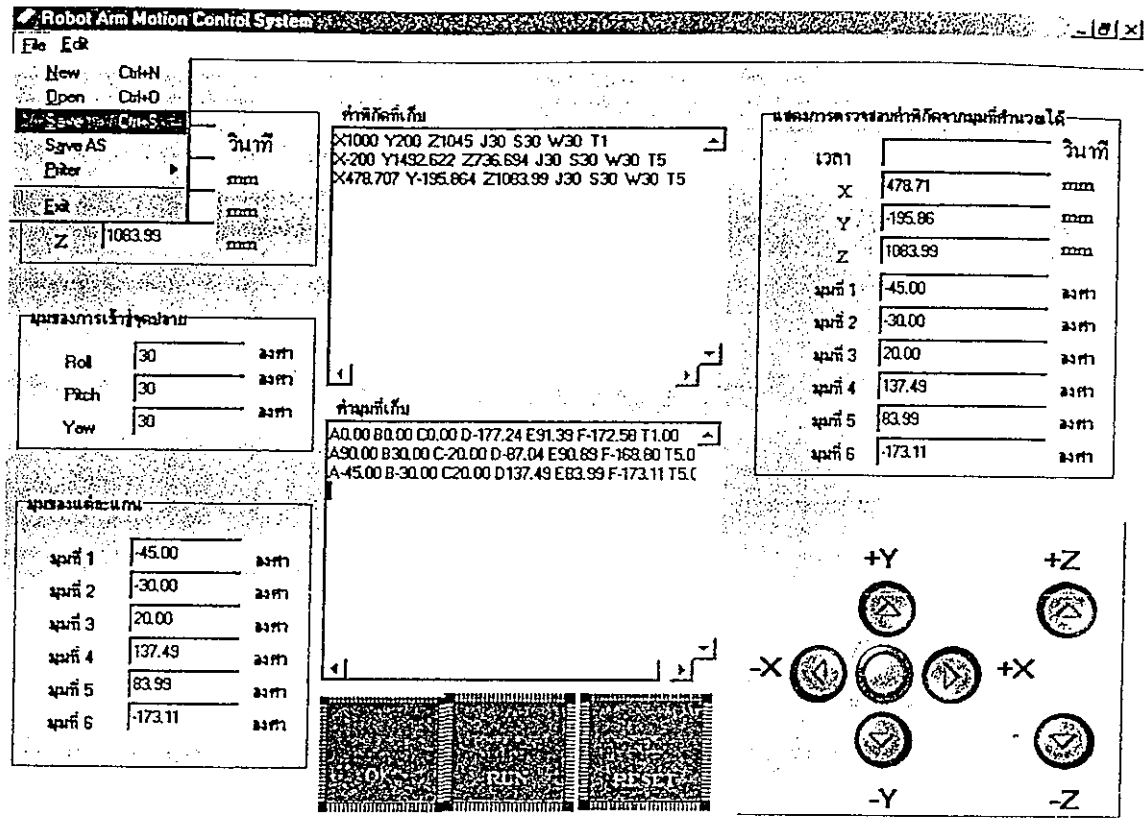
รูปที่ ข.10 โปรแกรมตรวจสอบค่าตำแหน่งปลายจากค่ามุมที่คำนวณของจุดปลายที่ตำแหน่งเริ่มต้น



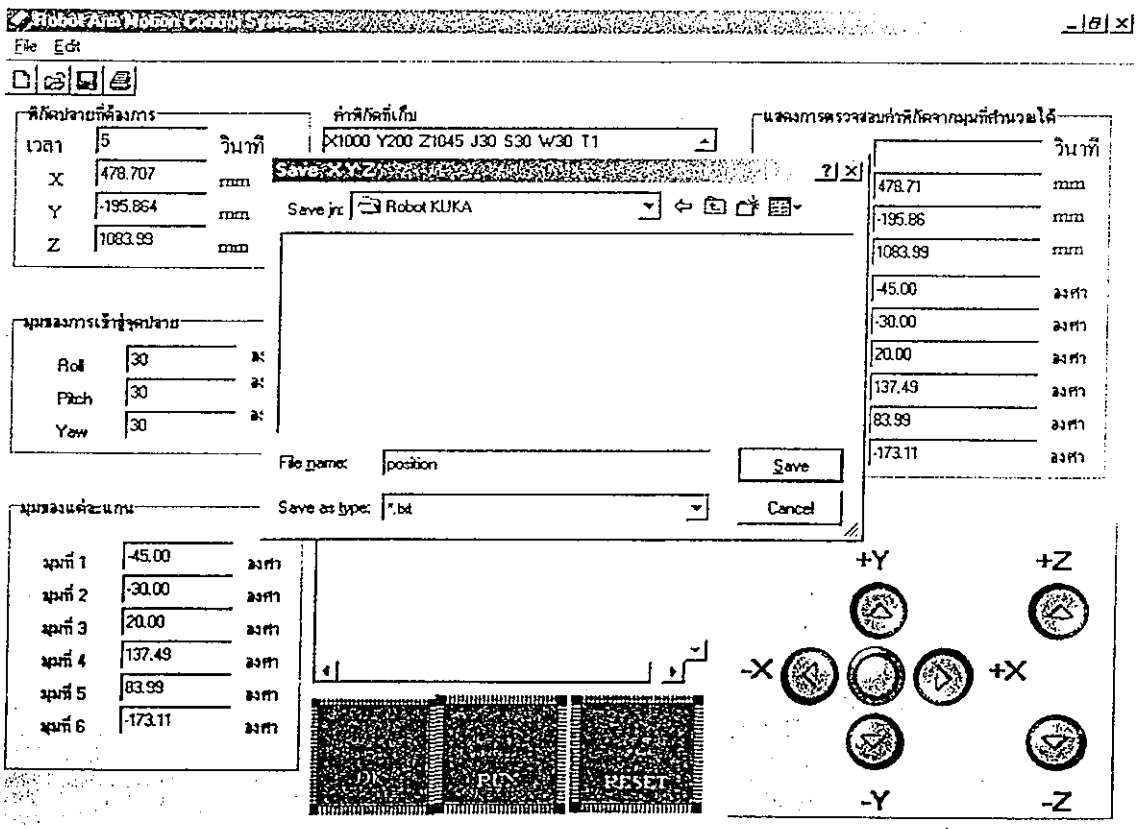
รูปที่ ข.11 โปรแกรมตรวจสอบค่าตำแหน่งปลายจากค่ามุมที่คำนวณได้ของจุดปลายที่ตำแหน่งที่ 1



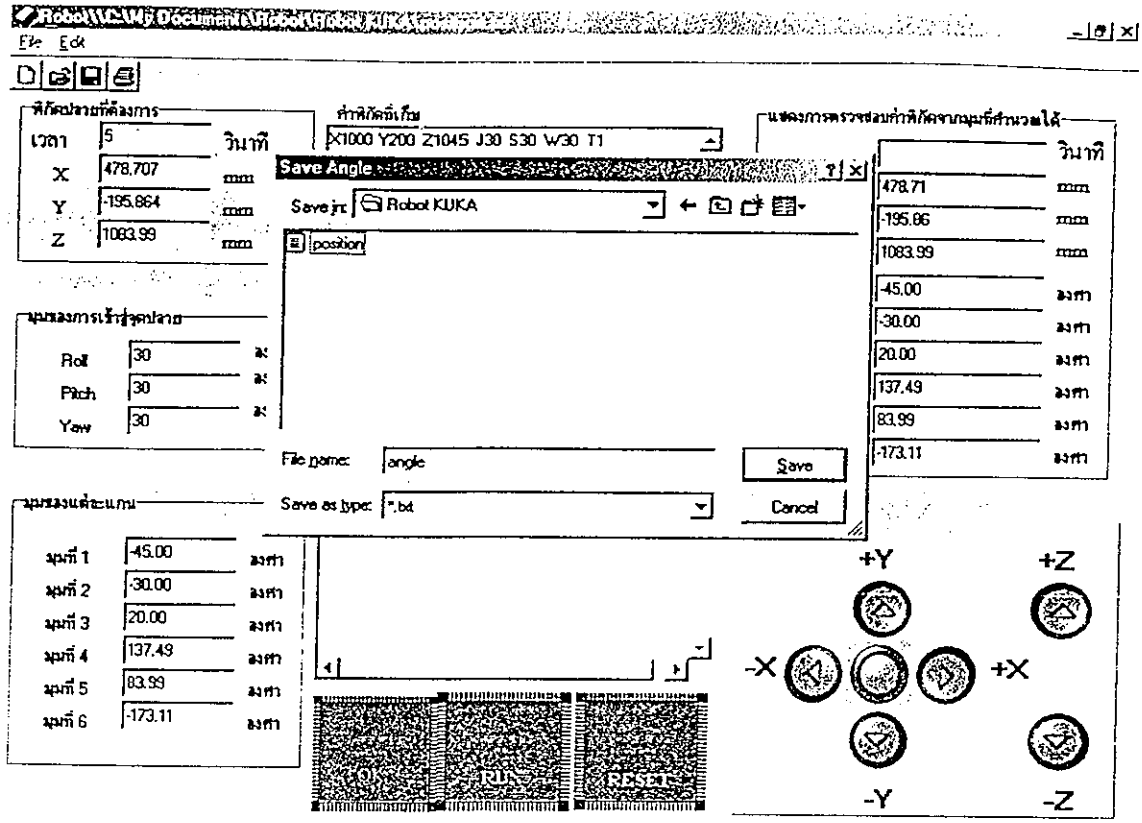
รูปที่ ข.12 โปรแกรมตรวจสอบค่าตำแหน่งปลายจากค่ามุมที่คำนวณได้ของจุดปลายที่ตำแหน่งที่ 2



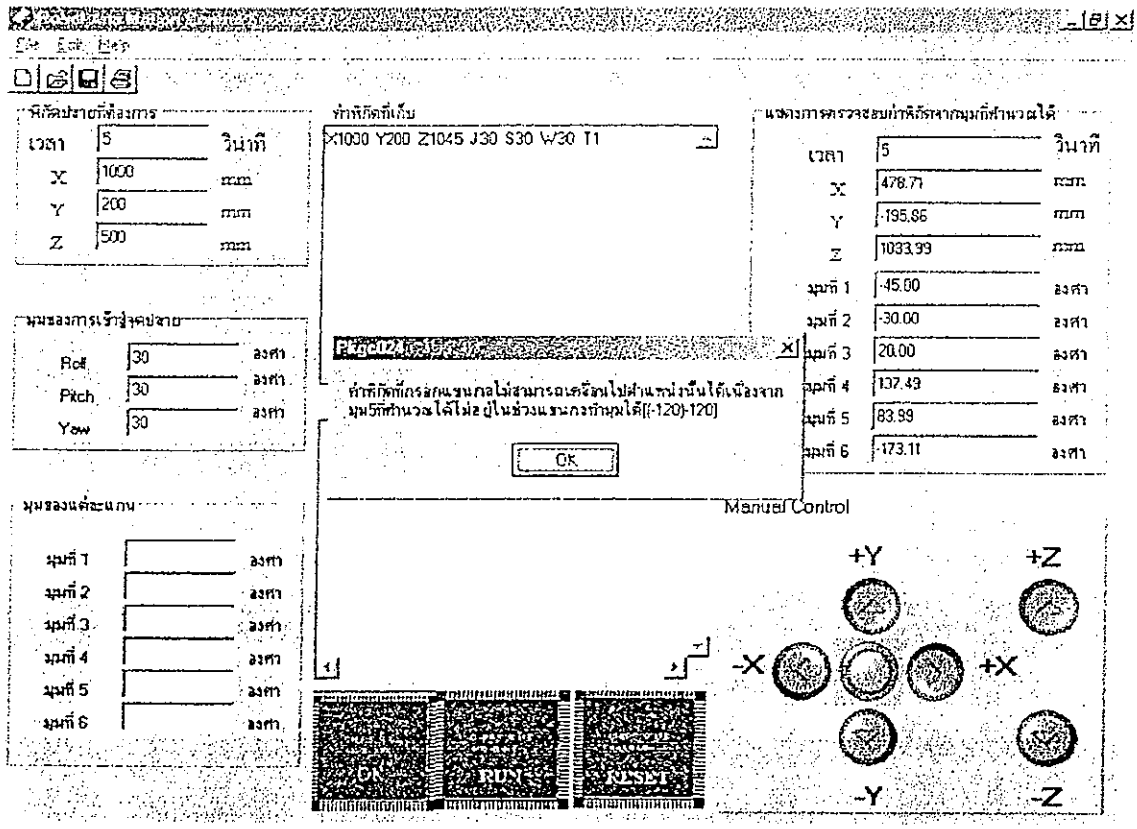
รูปที่ ข.13 แสดงการจัดเก็บค่าตำแหน่งพิกัดและมุมของจุดปลายของหุ่นยนต์บนเมนูไฟล์



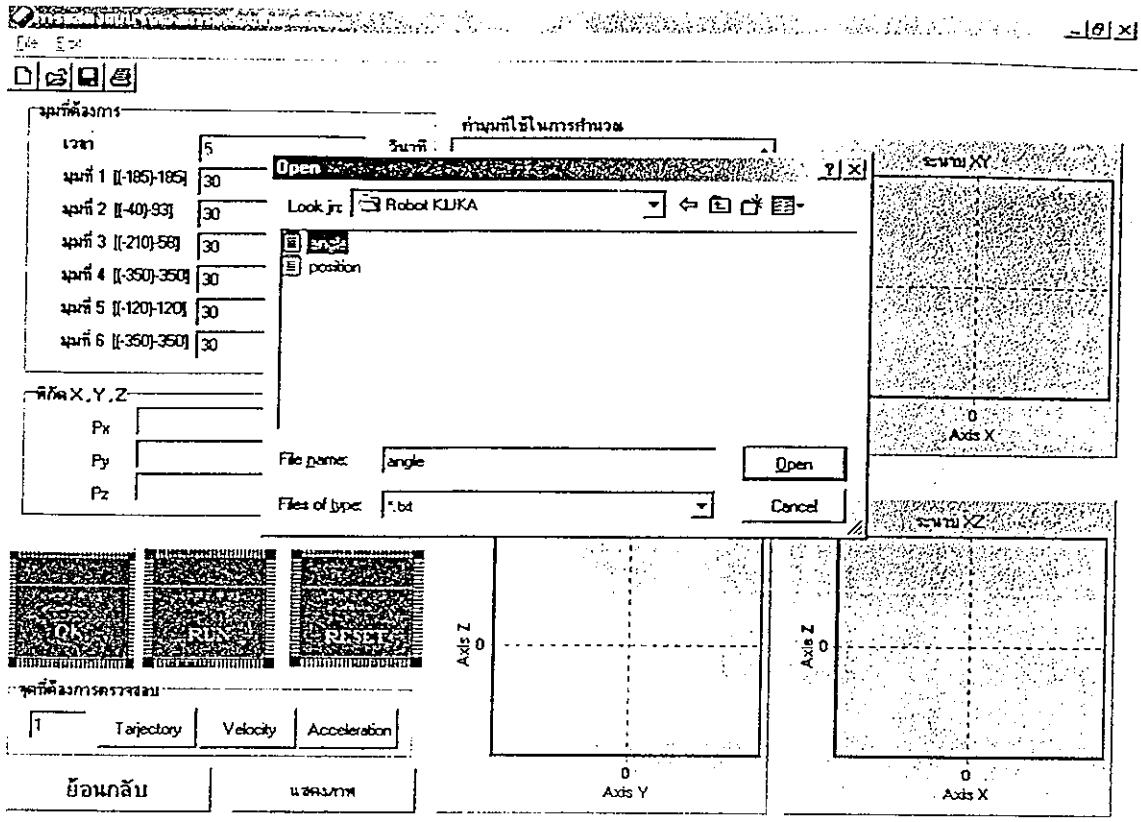
รูปที่ ข.14 แสดงการจัดเก็บค่าตำแหน่งพิกัดจุดปลายของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ในตำแหน่งต่างๆ



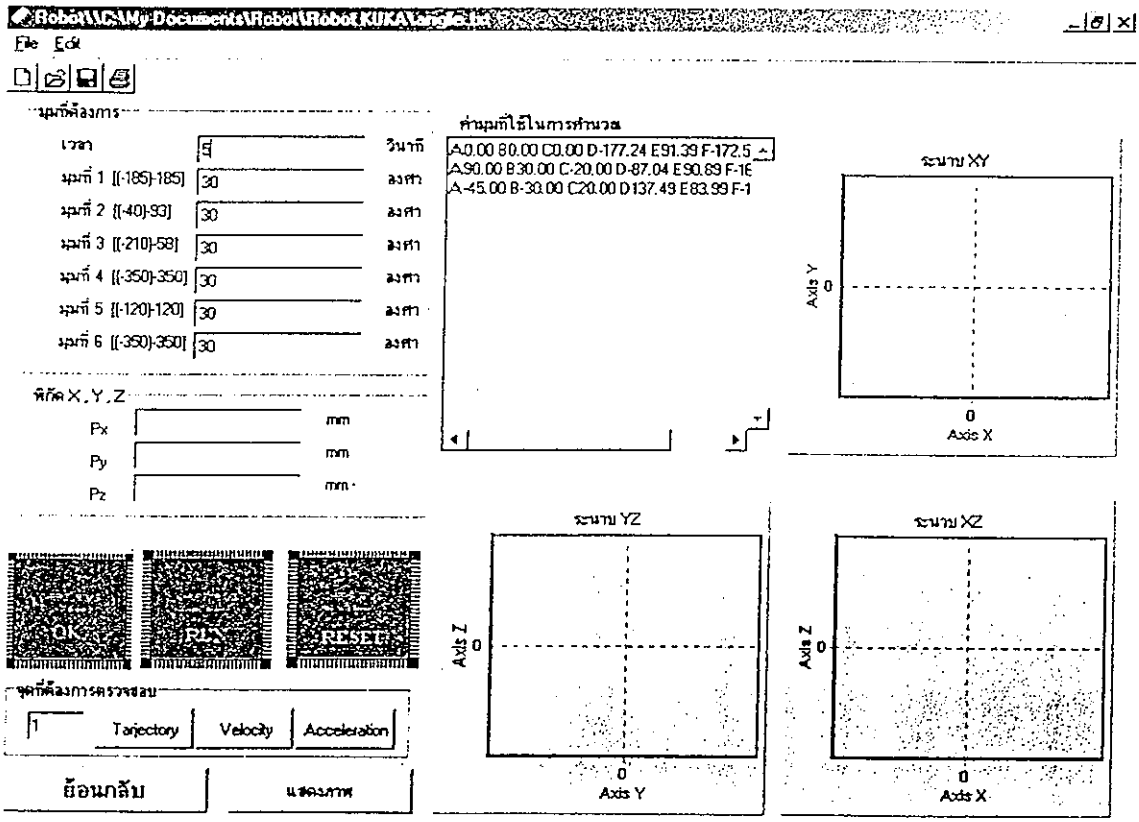
รูปที่ ข.15 แสดงการจัดเก็บค่ามุมของจุดปลายของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ในตำแหน่งต่างๆ



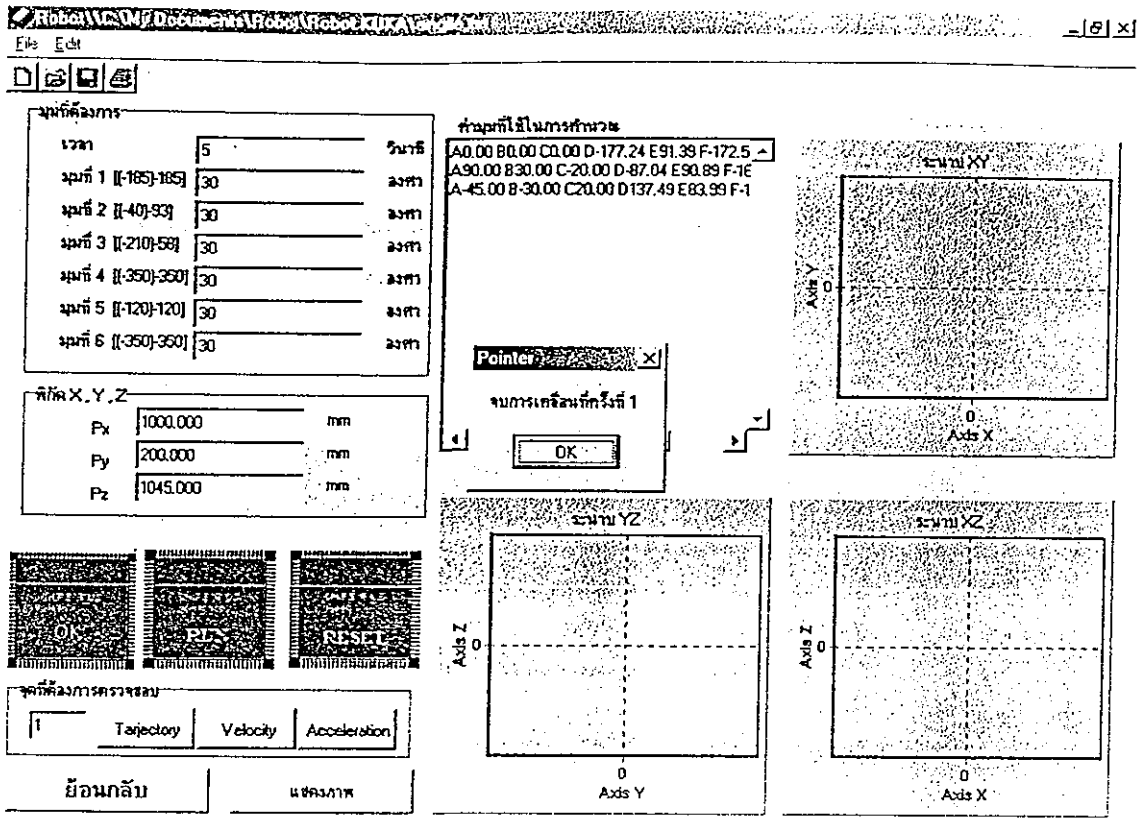
รูปที่ ข.16 แสดงการใส่พิกัดปลายที่แขนกลไม่สามารถเคลื่อนที่ไปตำแหน่งนั้นได้



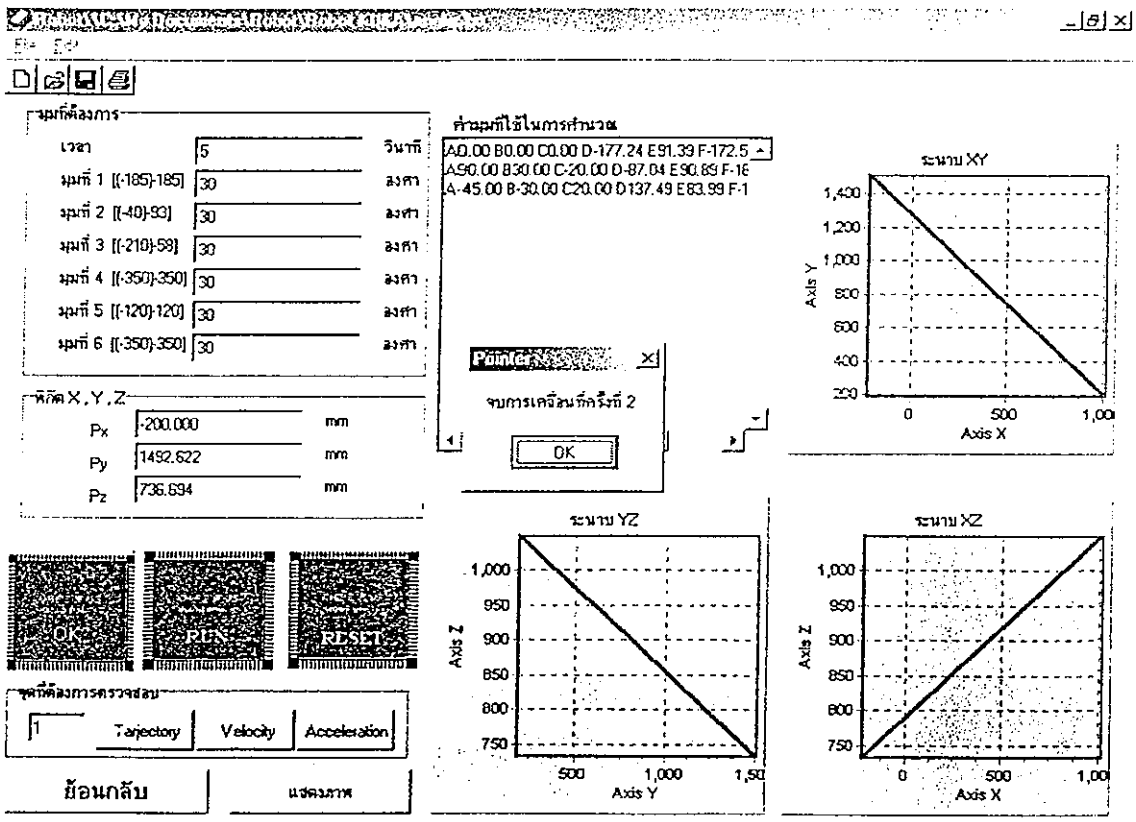
รูปที่ ข.17 แสดงการเปิดไฟล์ ค่ามุมที่บันทึกไว้ในขั้นตอนการใช้โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์



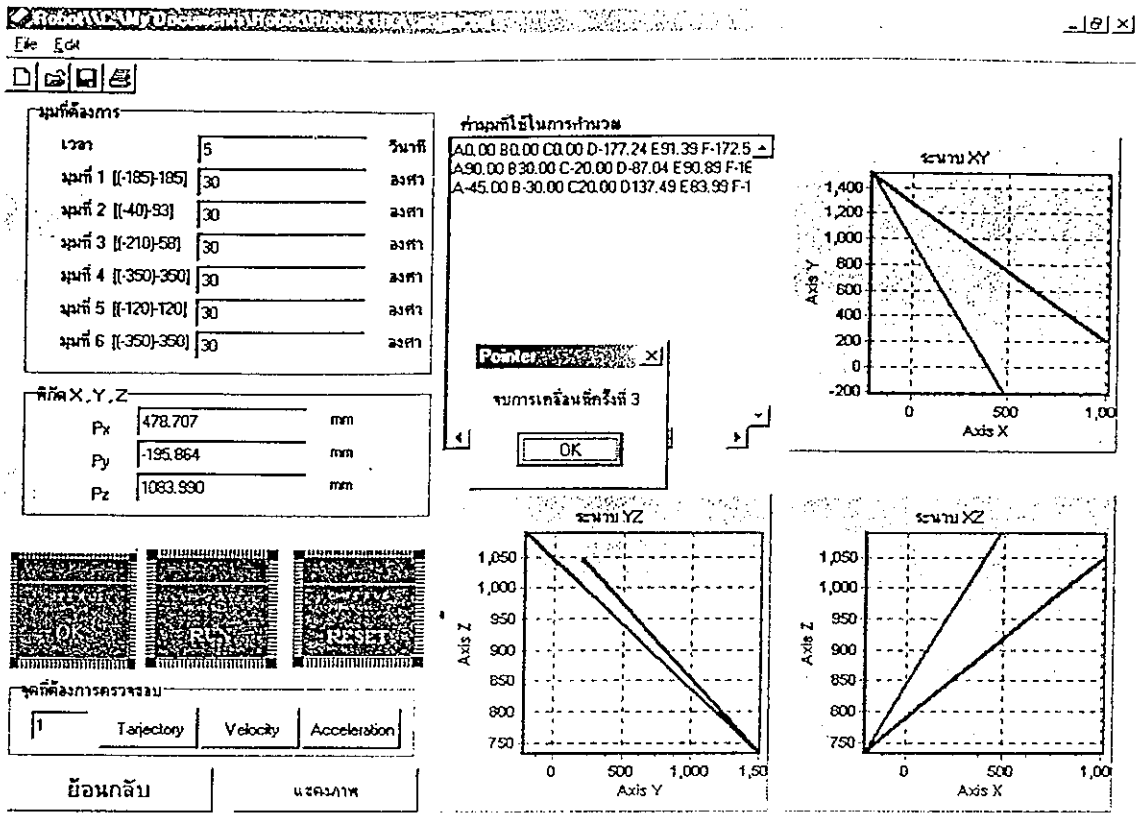
รูปที่ ข.18 แสดงค่ามุมที่ใช้ในการคำนวณ ที่เราได้เปิดไว้



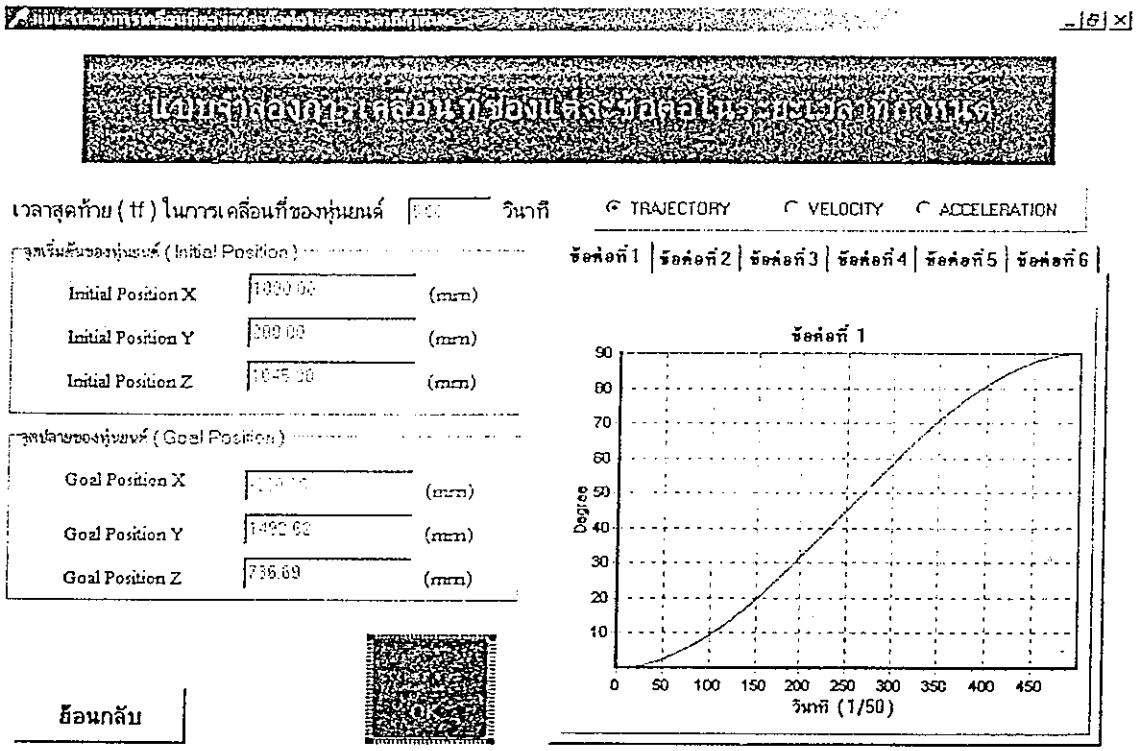
รูปที่ ข.19 การแสดงผลโปรแกรมแสดงพิกัด,ภาพการเคลื่อนที่ของจุดปลายในตำแหน่งจุดเริ่มต้น



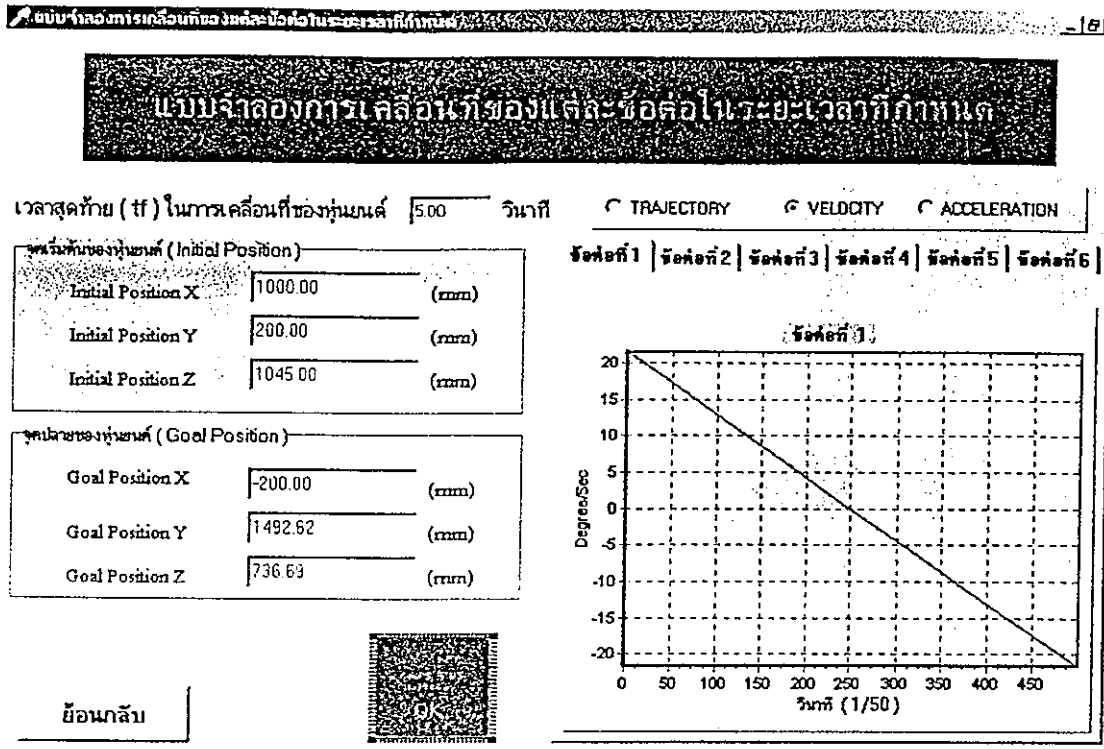
รูปที่ ข.20 แสดงการแสดงผลโปรแกรมแสดงพิกัด,ภาพการเคลื่อนที่ของจุดปลายในตำแหน่งที่ 1



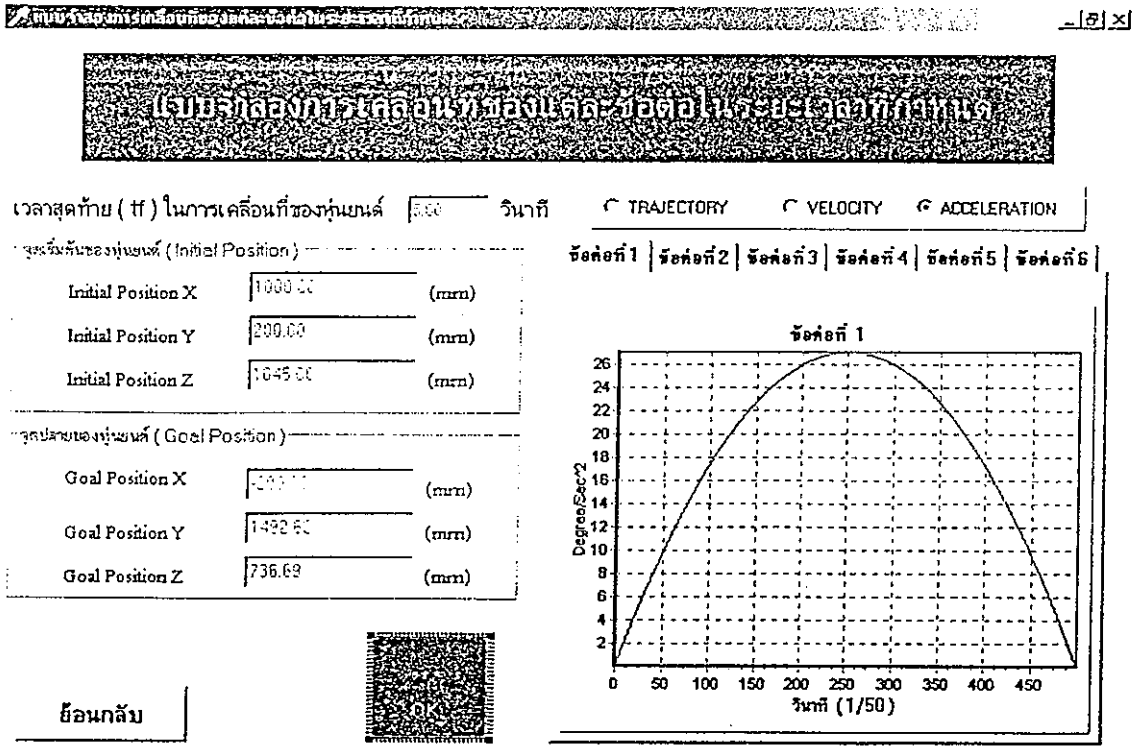
รูปที่ ข.21 แสดงการแสดงผลโปรแกรมแสดงพิกัด,ภาพการเคลื่อนที่ของจุดปลายในตำแหน่งที่ 2



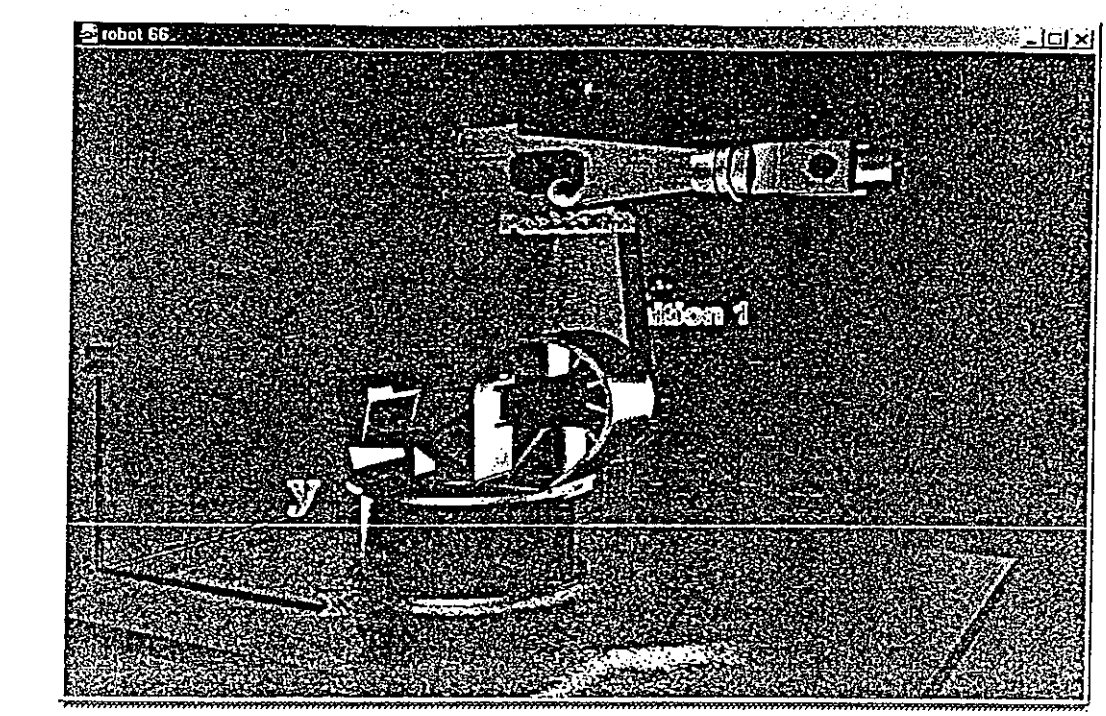
รูปที่ ข.22 แสดงพิกัด, ภาพการเคลื่อนที่ระหว่างจุดเริ่มต้นกับจุดปลายตำแหน่งที่ 1



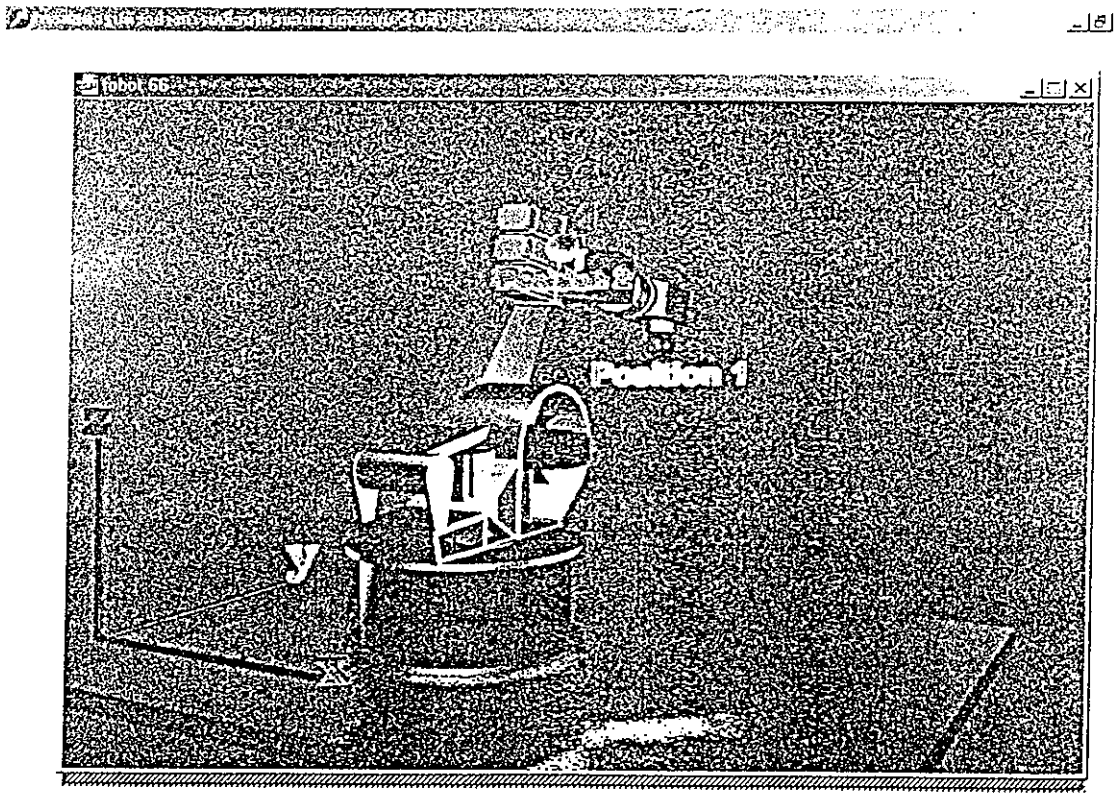
รูปที่ ข.23 แสดงพิกัด, ภาพความเร็วของการเคลื่อนที่ระหว่างจุดเริ่มต้นกับจุดปลายตำแหน่งที่ 1



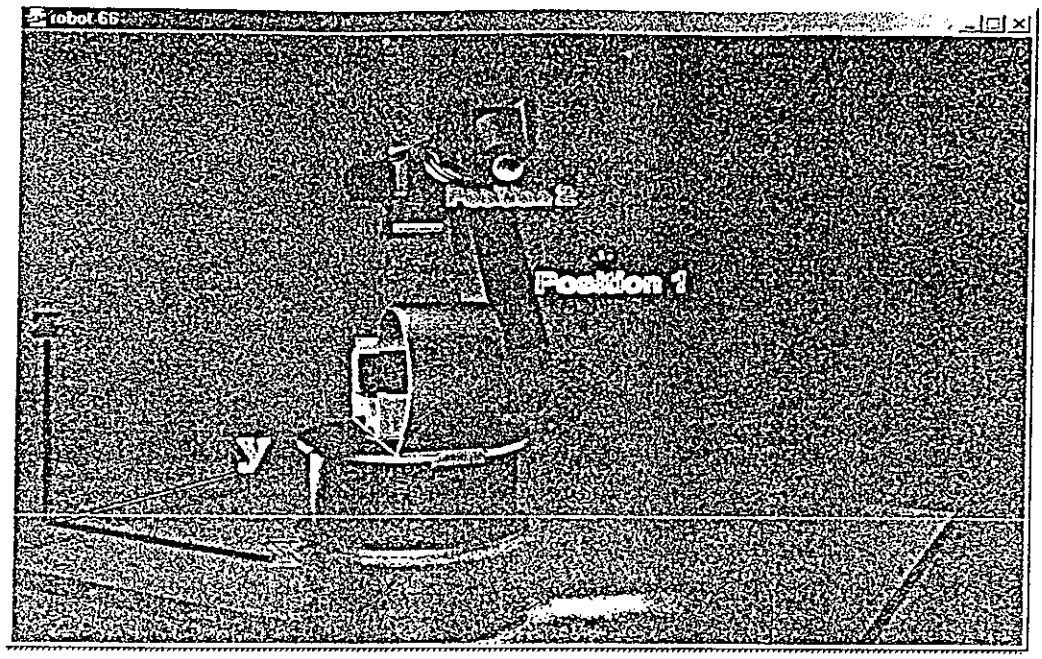
รูปที่ ข.24 แสดงพิกัด, ภาพความเร่งของการเคลื่อนที่ระหว่างจุดเริ่มต้นกับจุดปลายตำแหน่งที่ 1



รูปที่ ข.25 แสดงภาพของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่งเริ่มต้น (Home position)



รูปที่ ข.26 แสดงภาพจุดปลายของหุ่นยนต์อยู่ในตำแหน่งที่ 1 (Position 1)



รูปที่ ข.27 แสดงภาพจุดปลายของหุ่นยนต์อยู่ในตำแหน่งที่ 2 (Position 2)

ภาคผนวก ค. การตรวจสอบสมการด้วยโปรแกรม Mathcad

ค.1 การคำนวณฟอร์เวิร์ดคิเนเมติกส์ เมื่อป้อนค่ามุมของแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ครั้งที่ 1

Forward kinematic

กำหนดให้ $A := 90$ $B := 30$ $C := -20$ $D := 87.04$ $E := 90.89$ $F := -168.83$ (หน่วยองศา)

$a_2 := 1000$ $a_3 := 45$ $d_3 := 200$ $d_4 := 1000$ (หน่วยมิลลิเมตร)

โดยที่ A, B, C, D ,E, F = มุมของแต่ละข้อต่อ $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ ตามลำดับ (หน่วยองศา)

a_2, a_3, d_3, d_4 = ค่าตัวแปรเฉพาะหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2 (หน่วยมิลลิเมตร)

เนื่องจากโปรแกรม Mathcad รับค่าเป็นเรเดียน ดังนั้น เราจึงเปลี่ยนองศา ให้เป็นเรเดียน ดังต่อไปนี้

$$\Theta_1 := \frac{(A \cdot 2\pi)}{360} \qquad \Theta_2 := \frac{(B \cdot 2\pi)}{360} \qquad \Theta_3 := \frac{(C \cdot 2\pi)}{360}$$

$$\Theta_4 := \frac{(D \cdot 2\pi)}{360} \qquad \Theta_5 := \frac{(E \cdot 2\pi)}{360} \qquad \Theta_6 := \frac{(F \cdot 2\pi)}{360}$$

โดยที่ $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4, \Theta_5, \Theta_6$= มุมของแต่ละข้อต่อ $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ ตามลำดับ (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ
$$C_{23} := \cos(\Theta_2 - 1.57079) \cdot \cos(\Theta_3) - \sin(\Theta_2 - 1.57079) \cdot \sin(\Theta_3)$$
$$S_{23} := \cos(\Theta_2 - 1.57079) \cdot \sin(\Theta_3) + \sin(\Theta_2 - 1.57079) \cdot \cos(\Theta_3)$$

$$r_{11} := \cos(\Theta_1) \cdot [C_{23} \cdot (\cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6)) - S_{23} \cdot \sin(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6)]$$
$$+ \sin(\Theta_1) \cdot (\sin(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6) + \cos(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6))$$
$$r_{21} := \sin(\Theta_1) \cdot [C_{23} \cdot (\cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6)) - S_{23} \cdot \sin(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6)]$$
$$- \cos(\Theta_1) \cdot (\sin(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6) + \cos(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6))$$
$$r_{31} := -S_{23} \cdot (\cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6)) - C_{23} \cdot \sin(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6)$$

$$r_{12} := \cos(\Theta_1) \cdot [C_{23} \cdot (-\cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \sin(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6)) + S_{23} \cdot \sin(\Theta_5) \cdot \sin(\Theta_6)]$$
$$+ \sin(\Theta_1) \cdot (\cos(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \sin(\Theta_6))$$
$$r_{13} := \sin(\Theta_1) \cdot [C_{23} \cdot (-\cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \sin(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6)) + S_{23} \cdot \sin(\Theta_5) \cdot \sin(\Theta_6)]$$
$$- \cos(\Theta_1) \cdot (\cos(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \sin(\Theta_6))$$
$$r_{32} := -S_{23} \cdot (-\cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6)) + C_{23} \cdot \sin(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6)$$

$$r_{13} := -\cos(\Theta_1)\cdot\left(C_{23}\cdot\cos(\Theta_4)\cdot\sin(\Theta_5)+S_{23}\cdot\cos(\Theta_5)\right)-\sin(\Theta_1)\cdot\sin(\Theta_4)\cdot\sin(\Theta_5)$$

$$r_{23} := -\sin(\Theta_1)\cdot\left(C_{23}\cdot\cos(\Theta_4)\cdot\cos(\Theta_5)+S_{23}\cdot\cos(\Theta_5)\right)+\cos(\Theta_1)\cdot\sin(\Theta_4)\cdot\sin(\Theta_5)$$

$$r_{33} := S_{23}\cdot\cos(\Theta_4)\cdot\sin(\Theta_5)-C_{23}\cdot\cos(\Theta_5)$$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $r_{11} = 5.215\times10^{-3}$ $r_{12} = -0.013$ $r_{13} = -0.999$

$r_{21} = -0.932$ $r_{22} = 0$ $r_{23} = -0.015$

$r_{31} = 0.362$ $r_{32} = 0.019$ $r_{33} = -0.048$

โดยที่ $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33}$ = ค่าตัวแปรที่คำนวณได้ในสมการฟอร์เวิร์ดคิเนเมติกส์

จากสมการ $P_1 := \cos(\Theta_1)\cdot\left(a_2\cdot\cos(\Theta_2-1.57079)+a_3\cdot C_{23}-d_4\cdot S_{23}\right)-d_3\cdot\sin(\Theta_1)$

$P_2 := \sin(\Theta_1)\cdot\left(a_2\cdot\cos(\Theta_2-1.57079)+a_3\cdot C_{23}-d_4\cdot S_{23}\right)+d_3\cdot\cos(\Theta_1)$

$P_3 := -a_3\cdot S_{23}-a_2\cdot\sin(\Theta_2-1.57079)-d_4\cdot C_{23}$

โปรแกรมจะคำนวณหาตำแหน่งพิกัดปลาย จะได้ $P_1 = -200$

$P_2 = 1.493\times10^{3}$

$P_3 = 736.684$

โดยที่ P_1, P_2, P_3 = ตำแหน่งพิกัดปลายของหุ่นยนต์ในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ (หน่วยมิลลิเมตร)

ค.2 การคำนวณอินเวอร์สคิเนเมติกส์ เมื่อป้อนค่าตำแหน่งพิกัดปลายของหุ่นยนต์ครั้งที่ 1

Inverse kinematics

กำหนดให้ $P_1 := -200$ $P_2 := 1493$ $P_3 := 736.684$ (หน่วยมิลลิเมตร)

$a_2 := 1000$ $a_3 := 45$ $d_3 := 200$ $d_4 := 1000$ (หน่วยมิลลิเมตร)

Roll := 30 Pitch := 30 Yaw := 30 (หน่วยองศา)

โดยที่ P_1, P_2, P_3 = ตำแหน่งพิกัดปลายของหุ่นยนต์ในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ (หน่วยมิลลิเมตร)

a_2, a_3, d_3, d_4 = ค่าตัวแปรเฉพาะหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2 (หน่วยมิลลิเมตร)

Roll, Yaw, Picth = มุมของการเข้าสู่จุดปลายในแนวแกน z, y, x ตามลำดับ (หน่วยองศา)

เนื่องจากโปรแกรม Mathcad รับค่าเป็นเรเดียน ดังนั้น เราจึงเปลี่ยนองศา ให้เป็นเรเดียน ดังต่อไปนี้

$$\phi := \frac{(\text{Roll} \cdot 2 \cdot \pi)}{360} \qquad \theta := \frac{(\text{Yaw} \cdot 2 \cdot \pi)}{360} \qquad \psi := \frac{(\text{Pitch} \cdot 2 \cdot \pi)}{360}$$

โดยที่ ϕ, θ, φ = มุมของการเข้าสู่จุดปลายในแนวแกน z, y, x ตามลำดับ (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ $$\Theta_1 := -\left[\text{atan2}(P_2, P_1) - \text{atan2}\left[d_3, \sqrt{(P_1)^2 + (P_2)^2 - (d_3)^2}\right]\right]$$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\Theta_1 = 1.571$

โดยที่ Θ_1 = มุมของข้อต่อที่ 1 (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ $$K := \frac{\left[(P_1)^2 + (P_2)^2 + (P_3)^2 - (a_2)^2 - (a_3)^2 - (d_3)^2 - (d_4)^2\right]}{2\,a_2}$$

$$\Theta_3 := -\text{atan2}(a_3, d_4) + \text{atan2}\left[K, \sqrt{(a_3)^2 + (d_4)^2 - K^2}\right]$$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\Theta_3 = -0.35$

โดยที่ Θ_3 = มุมของข้อต่อที่ 3 (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ $S_{23} := (-a_3 - a_2 \cdot \cos(\Theta_3)) \cdot P_3 - (\cos(\Theta_1) \cdot P_1 + \sin(\Theta_1) \cdot P_2) \cdot (d_4 - a_2 \cdot \sin(\Theta_3))$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $S_{23} = -2.73 \times 10^6$

จากสมการ $C_{23} := (a_2 \cdot \sin(\Theta_3) - d_4) \cdot P_3 + (a_3 + a_2 \cdot \cos(\Theta_3)) \cdot (\cos(\Theta_1) \cdot P_1 + \sin(\Theta_1) \cdot P_2)$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $C_{23} = 4.808 \times 10^5$

จากสมการ $\Theta_{23} := \text{atan2}(C_{23}, S_{23})$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\Theta_{23} = -1.396$

จากสมการ

$$\Theta_2 := (\Theta_{23} - \Theta_3) + \frac{90 \cdot 2 \cdot \pi}{360}$$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\Theta_2 = 0.524$

โดยที่ Θ_2 = มุมของข้อต่อที่ 2 (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ

$$C_{231} := (\cos(\Theta_2) \cdot \cos(\Theta_3)) - (\sin(\Theta_2) \cdot \sin(\Theta_3))$$
$$C_{231} = 0.985$$
$$S_{231} := \cos(\Theta_2) \cdot \sin(\Theta_3) + \sin(\Theta_2) \cdot \cos(\Theta_3)$$
$$S_{231} = 0.173$$

จากสมการ

$r_{111} := \cos(\phi) \cdot \cos(\theta)$ $\quad r_{111} = 0.75$

$r_{112} := \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\psi) - \sin(\phi) \cdot \cos(\psi)$ $\quad r_{112} = -0.217$

$r_{113} := \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\psi) + \sin(\phi) \cdot \sin(\psi)$ $\quad r_{113} = 0.625$

จากสมการ

$r_{121} := \sin(\phi) \cdot \cos(\theta)$ $\quad r_{121} = 0.433$

$r_{122} := \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\psi) + \cos(\phi) \cdot \cos(\psi)$ $\quad r_{122} = 0.875$

$r_{123} := \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\psi) - \cos(\phi) \cdot \sin(\psi)$ $\quad r_{123} = -0.217$

จากสมการ

$r_{131} := -\sin(\theta)$ $\quad r_{131} = -0.5$

$r_{132} := \cos(\theta) \cdot \sin(\psi)$ $\quad r_{132} = 0.433$

$r_{133} := \cos(\theta) \cdot \cos(\psi)$ $\quad r_{133} = 0.75$

จากสมการ

$S_4 := -r_{113} \cdot \sin(\Theta_1) + r_{123} \cdot \cos(\Theta_1)$ $\quad S_4 = -0.625$

$C_4 := -r_{113} \cdot \cos(\Theta_1) \cdot C_{231} - r_{123} \cdot \sin(\Theta_1) \cdot C_{231} + r_{133} \cdot S_{231}$ $\quad C_4 = 0.343$

จากสมการ $\Theta_4 := \text{atan2}(C_4, S_4)$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\Theta_4 := -1.519$

โดยที่ Θ_4 = มุมของข้อต่อที่ 4 (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ

$$S_5 := -[r_{111} \cdot (\cos(\Theta_1) \cdot C_{231} \cdot \cos(\Theta_4) + \sin(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_4)) + r_{123} \cdot (\sin(\Theta_1) \cdot C_{231} \cdot \cos(\Theta_4) - \cos(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_4))$$
$$- r_{133} \cdot (S_{231} \cdot \cos(\Theta_4))]$$

จากสมการ $C_5 := r_{113} \cdot (-\cos(\Theta_1) \cdot S_{231}) + r_{123} \cdot (-\sin(\Theta_1) \cdot S_{231}) + r_{133} \cdot (-C_{231})$

จะได้ สมการ $\Theta_5 := \text{atan2}(S_5, C_5)$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\Theta_5 := 1.586$

โดยที่ Θ_5 = มุมของข้อต่อที่ 5 (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ

$$S_6 := r_{111} \cdot (\cos(\Theta_1) \cdot C_{231} \cdot \sin(\Theta_4) - \sin(\Theta_1) \cdot \cos(\Theta_4)) - r_{121} \cdot (\sin(\Theta_1) \cdot C_{231} \cdot \sin(\Theta_4) + \cos(\Theta_1) \cdot \cos(\Theta_4)) + r_{131} \cdot (S_{231} \cdot \sin(\Theta_4))$$

จากสมการ

$$C_6 := r_{111} \cdot [(\cos(\Theta_1) \cdot C_{231} \cdot \cos(\Theta_4) + \sin(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_4)) \cdot \cos(\Theta_5) - \cos(\Theta_1) \cdot S_{231} \cdot \sin(\Theta_5)] + r_{121} \cdot [(\sin(\Theta_1) \cdot C_{231} \cdot \cos(\Theta_4) - \cos(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_4)) \cdot \cos(\Theta_5) - \sin(\Theta_1) \cdot S_{231} \cdot \sin(\Theta_5)] - r_{113} \cdot (S_{231} \cdot \cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) + C_{231} \cdot \sin(\Theta_5))$$

จะได้ สมการ $\Theta_6 := \text{atan2}(S_6, C_6)$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\Theta_6 := -2.946$

โดยที่ Θ_6 = มุมของข้อต่อที่ 6 (หน่วยเรเดียน)

เนื่องจากโปรแกรม Mathcad คำนวณค่าออกมาเป็นเรเดียน ดังนั้น เราจึงเปลี่ยนเรเดียนให้เป็นองศา ดังต่อไปนี้

จากสมการ $A := \frac{\Theta_1 \cdot 360}{2 \cdot \pi}$ $B := \frac{\Theta_2 \cdot 360}{2 \cdot \pi}$ $C := \frac{\Theta_3 \cdot 360}{2 \cdot \pi}$

$D := \frac{\Theta_4 \cdot 360}{2 \cdot \pi}$ $E := \frac{\Theta_5 \cdot 360}{2 \cdot \pi}$ $F := \frac{\Theta_6 \cdot 360}{2 \cdot \pi}$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $A = 90$ $B = 30.023$ $C = -20.035$

$D = -87.032$ $E = 90.871$ $F = -168.793$

โดยที่ A, B, C, D ,E, F = มุมของแต่ละข้อต่อ $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ ตามลำดับ (หน่วยองศา)

ค.3 การคำนวณฟอร์เวิร์ดคิเนเมติกส์ เมื่อป้อนค่ามุมของแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ครั้งที่ 2

Forward kinematics

กำหนดให้ $A := -45$ $B := -30$ $C := 20$ $D := 137.49$ $E := 83.99$ $F := -173.11$

$a_2 := 1000$ $a_3 := 45$ $d_3 := 200$ $d_4 := 1000$

โดยที่ A, B, C, D ,E, F = มุมของแต่ละข้อต่อ $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ ตามลำดับ (หน่วยองศา)

a_2, a_3, d_3, d_4 = ค่าตัวแปรเฉพาะหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2 (หน่วยมิลลิเมตร)

เนื่องจากโปรแกรม Mathcad รับค่าเป็นเรเดียน ดังนั้น เราจึงเปลี่ยนองศา ให้เป็นเรเดียน ดังต่อไปนี้

$$\Theta_1 := \frac{(A \cdot 2\pi)}{360} \qquad \Theta_2 := \frac{(B \cdot 2\pi)}{360} \qquad \Theta_3 := \frac{(C \cdot 2\pi)}{360}$$

$$\Theta_4 := \frac{(D \cdot 2\pi)}{360} \qquad \Theta_5 := \frac{(E \cdot 2\pi)}{360} \qquad \Theta_6 := \frac{(F \cdot 2\pi)}{360}$$

โดยที่ $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4, \Theta_5, \Theta_6$= มุมของแต่ละข้อต่อ $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ ตามลำดับ (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ $C_{23} := \cos(\Theta_2 - 1.57079) \cdot \cos(\Theta_3) - \sin(\Theta_2 - 1.57079) \cdot \sin(\Theta_3)$

$S_{23} := \cos(\Theta_2 - 1.57079) \cdot \sin(\Theta_3) + \sin(\Theta_2 - 1.57079) \cdot \cos(\Theta_3)$

$$r_{11} := \cos(\Theta_1) \cdot [C_{23} \cdot (\cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6)) - S_{23} \cdot \sin(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6)]$$
$$+ \sin(\Theta_1) \cdot (\sin(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6) + \cos(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6))$$

$$r_{21} := \sin(\Theta_1) \cdot [C_{23} \cdot (\cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6)) - S_{23} \cdot \sin(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6)]$$
$$- \cos(\Theta_1) \cdot (\sin(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6) + \cos(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6))$$

$$r_{31} := -S_{23} \cdot (\cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6)) - C_{23} \cdot \sin(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6)$$

$$r_{12} := \cos(\Theta_1) \cdot [C_{23} \cdot (-\cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \sin(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6)) + S_{23} \cdot \sin(\Theta_5) \cdot \sin(\Theta_6)]$$
$$+ \sin(\Theta_1) \cdot (\cos(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \sin(\Theta_6))$$

$$r_{13} := \sin(\Theta_1) \cdot [C_{23} \cdot (-\cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \sin(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6)) + S_{23} \cdot \sin(\Theta_5) \cdot \sin(\Theta_6)]$$
$$- \cos(\Theta_1) \cdot (\cos(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \sin(\Theta_6))$$

$$r_{32} := -S_{23} \cdot (-\cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6) - \sin(\Theta_4) \cdot \sin(\Theta_6)) + C_{23} \cdot \sin(\Theta_5) \cdot \cos(\Theta_6)$$

$$r_{13} := -\cos(\Theta_1)\cdot\left(C_{23}\cdot\cos(\Theta_4)\cdot\sin(\Theta_5)+S_{23}\cdot\cos(\Theta_5)\right)-\sin(\Theta_1)\cdot\sin(\Theta_4)\cdot\sin(\Theta_5)$$

$$r_{23} := -\sin(\Theta_1)\cdot\left(C_{23}\cdot\cos(\Theta_4)\cdot\cos(\Theta_5)+S_{23}\cdot\cos(\Theta_5)\right)+\cos(\Theta_1)\cdot\sin(\Theta_4)\cdot\sin(\Theta_5)$$

$$r_{33} := S_{23}\cdot\cos(\Theta_4)\cdot\sin(\Theta_5)-C_{23}\cdot\cos(\Theta_5)$$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $r_{11} = -0.72$ $r_{12} = 5.731\times10^{-5}$ $r_{13} = 0.458$

$r_{21} = 0.694$ $r_{22} = 0$ $r_{23} = 0.412$

$r_{31} = -0.016$ $r_{32} = 0.176$ $r_{33} = 0.74$

โดยที่ $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33}$ = ค่าตัวแปรที่คำนวณได้ในสมการฟอร์เวิร์ดคิเนเมติกส์

จากสมการ

$$P_1 := \cos(\Theta_1)\cdot\left(a_2\cdot\cos(\Theta_2-1.57079)+a_3\cdot C_{23}-d_4\cdot S_{23}\right)-d_3\cdot\sin(\Theta_1)$$

$$P_2 := \sin(\Theta_1)\cdot\left(a_2\cdot\cos(\Theta_2-1.57079)+a_3\cdot C_{23}-d_4\cdot S_{23}\right)+d_3\cdot\cos(\Theta_1)$$

$$P_3 := -a_3\cdot S_{23}-a_2\cdot\sin(\Theta_2-1.57079)-d_4\cdot C_{23}$$

โปรแกรมจะคำนวณหาตำแหน่งพิกัดปลาย จะได้ $P_1 = 478.712$

$P_2 = -195.869$

$P_3 = 1.084\times10^{3}$

โดยที่ P_1, P_2, P_3 = ตำแหน่งพิกัดปลายของหุ่นยนต์ในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ (หน่วยมิลลิเมตร)

ค.4 การคำนวณอินเวอร์สคิเนเมติกส์ เมื่อป้อนค่าตำแหน่งพิกัดปลายของหุ่นยนต์ครั้งที่ 2

Inverse kinematics

กำหนดให้ $P_1 := 478.707$ $P_2 := -195.864$ $P_3 := 1083.990$ (หน่วยมิลลิเมตร)

$a_2 := 1000$ $a_3 := 45$ $d_3 := 200$ $d_4 := 1000$ (หน่วยมิลลิเมตร)

Roll := 30 Pitch := 30 Yaw := 30 (หน่วยองศา)

โดยที่ P_1, P_2, P_3 = ตำแหน่งพิกัดปลายของหุ่นยนต์ในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ (หน่วยมิลลิเมตร)

a_2, a_3, d_3, d_4 = ค่าตัวแปรเฉพาะหุ่นยนต์อุตสาหกรรม KUKA KRC 125/2 (หน่วยมิลลิเมตร)

Roll, Yaw, Picth = มุมของการเข้าสู่จุดปลายในแนวแกน z, y, x ตามลำดับ (หน่วยองศา)

เนื่องจากโปรแกรม Mathcad รับค่าเป็นเรเดียน ดังนั้น เราจึงเปลี่ยนองศา ให้เป็นเรเดียน ดังต่อไปนี้

$$\phi := \frac{(\text{Roll} \cdot 2 \cdot \pi)}{360} \qquad \theta := \frac{(\text{Yaw} \cdot 2 \cdot \pi)}{360} \qquad \psi := \frac{(\text{Pitch} \cdot 2 \cdot \pi)}{360}$$

โดยที่ ϕ, θ, φ = มุมของการเข้าสู่จุดปลายในแนวแกน z, y, x ตามลำดับ (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ $\varpi_1 := -\left[\text{atan2}(P_2, P_1) - \text{atan2}\left[d_3, \sqrt{(P_1)^2 + (P_2)^2 - (d_3)^2} \right] \right]$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\varpi_1 = -0.785$

โดยที่ Θ_1 = มุมของข้อต่อที่ 1 (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ $K := \dfrac{\left[(P_1)^2 + (P_2)^2 + (P_3)^2 - (a_2)^2 - (a_3)^2 - (d_3)^2 - (d_4)^2 \right]}{2\, a_2}$

$$\varpi_3 := -\text{atan2}(a_3, d_4) + \text{atan2}\left[K, \sqrt{(a_3)^2 + (d_4)^2 - K^2} \right]$$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\varpi_3 = 0.349$

โดยที่ Θ_3 = มุมของข้อต่อที่ 3 (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ $S_{23} := \left(-a_3 - a_2 \cdot \cos(\varpi_3)\right) \cdot P_3 - \left(\cos(\varpi_1) \cdot P_1 + \sin(\varpi_1) \cdot P_2\right) \cdot \left(d_4 - a_2 \cdot \sin(\varpi_3)\right)$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $S_{23} = -1.381 \times 10^6$

จากสมการ $C_{23} := \left(a_2 \cdot \sin(\varpi_3) - d_4\right) \cdot P_3 + \left(a_3 + a_2 \cdot \cos(\varpi_3)\right) \cdot \left(\cos(\varpi_1) \cdot P_1 + \sin(\varpi_1) \cdot P_2\right)$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $C_{23} = -2.436 \times 10^5$

$$\Theta_{23} := \operatorname{atan2}(C_{23}, S_{23})$$

จากสมการ

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\Theta_{23} = -1.745$

จากสมการ

$$\Theta_2 := (\Theta_{23} - \Theta_3) + \frac{90 \cdot 2 \cdot \pi}{360}$$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\Theta_2 = -0.524$

โดยที่ Θ_2 = มุมของข้อต่อที่ 2 (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ

$$C_{231} := (\cos(\Theta_2) \cdot \cos(\Theta_3)) - (\sin(\Theta_2) \cdot \sin(\Theta_3))$$

$C_{231} = 0.985$

$$S_{231} := \cos(\Theta_2) \cdot \sin(\Theta_3) + \sin(\Theta_2) \cdot \cos(\Theta_3)$$

$S_{231} = -0.174$

จากสมการ

$$r_{111} := \cos(\phi) \cdot \cos(\theta) \qquad r_{111} = 0.75$$

$$r_{112} := \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\psi) - \sin(\phi) \cdot \cos(\psi) \qquad r_{112} = -0.217$$

$$r_{113} := \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\psi) + \sin(\phi) \cdot \sin(\psi) \qquad r_{113} = 0.625$$

จากสมการ

$$r_{121} := \sin(\phi) \cdot \cos(\theta) \qquad r_{121} = 0.433$$

$$r_{122} := \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\psi) + \cos(\phi) \cdot \cos(\psi) \qquad r_{122} = 0.875$$

$$r_{123} := \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\psi) - \cos(\phi) \cdot \sin(\psi) \qquad r_{123} = -0.217$$

จากสมการ

$$r_{131} := -\sin(\theta) \qquad r_{131} = -0.5$$

$$r_{132} := \cos(\theta) \cdot \sin(\psi) \qquad r_{132} = 0.433$$

$$r_{133} := \cos(\theta) \cdot \cos(\psi) \qquad r_{133} = 0.75$$

จากสมการ $S_4 := -r_{113} \cdot \sin(\Theta_1) + r_{123} \cdot \cos(\Theta_1)$ $S_4 = 0.289$

$C_4 := -r_{113} \cdot \cos(\Theta_1) \cdot C_{231} - r_{123} \cdot \sin(\Theta_1) \cdot C_{231} + r_{133} \cdot S_{231}$ $C_4 = -0.716$

$$\Theta_4 := \operatorname{atan2}(C_4, S_4)$$

จากสมการ

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\Theta_4 := 2.3995$

โดยที่ Θ_4 = มุมของข้อต่อที่ 4 (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ

$$S_5 := -[r_{111} \cdot (\cos(\Theta_1) \cdot C_{231} \cdot \cos(\Theta_4) + \sin(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_4))$$

$$+ r_{123} \cdot \left(\sin(\Theta_1) \cdot C_{231} \cdot \cos(\Theta_4) - \cos(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_4)\right) - r_{133} \cdot \left(S_{231} \cdot \cos(\Theta_4)\right)\Big]$$

จากสมการ $C_5 := r_{113} \cdot \left(-\cos(\Theta_1) \cdot S_{231}\right) + r_{123} \cdot \left(-\sin(\Theta_1) \cdot S_{231}\right) + r_{133} \cdot \left(-C_{231}\right)$

จะได้ สมการ $\Theta_5 := \operatorname{atan2}(S_5, C_5)$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\Theta_5 := 1.466$

โดยที่ Θ_5 = มุมของข้อต่อที่ 5 (หน่วยเรเดียน)

จากสมการ

$$S_6 := r_{111} \cdot \left(\cos(\Theta_1) \cdot C_{231} \cdot \sin(\Theta_4) - \sin(\Theta_1) \cdot \cos(\Theta_4)\right) - r_{121} \cdot \left(\sin(\Theta_1) \cdot C_{231} \cdot \sin(\Theta_4)\right.$$
$$\left. + \cos(\Theta_1) \cdot \cos(\Theta_4)\right) + r_{131} \cdot \left(S_{231} \cdot \sin(\Theta_4)\right)$$

จากสมการ

$$C_6 := r_{111} \cdot \Big[\left(\cos(\Theta_1) \cdot C_{231} \cdot \cos(\Theta_4) + \sin(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_4)\right) \cdot \cos(\Theta_5) - \cos(\Theta_1) \cdot S_{231} \cdot \sin(\Theta_5)\Big]$$
$$+ r_{121} \cdot \Big[\left(\sin(\Theta_1) \cdot C_{231} \cdot \cos(\Theta_4) - \cos(\Theta_1) \cdot \sin(\Theta_4)\right) \cdot \cos(\Theta_5) - \sin(\Theta_1) \cdot S_{231} \cdot \sin(\Theta_5)\Big]$$
$$- r_{113} \cdot \left(S_{231} \cdot \cos(\Theta_4) \cdot \cos(\Theta_5) + C_{231} \cdot \sin(\Theta_5)\right)$$

จะได้ สมการ $\Theta_6 := \operatorname{atan2}(S_6, C_6)$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $\Theta_6 := -3.021$

โดยที่ Θ_6 = มุมของข้อต่อที่ 6 (หน่วยเรเดียน)

เนื่องจากโปรแกรม Mathcad คำนวณค่าออกมาเป็นเรเดียน ดังนั้น เราจึงเปลี่ยนเรเดียนให้เป็นองศา ดังต่อไปนี้

จากสมการ $A := \dfrac{\Theta_1 \cdot 360}{2 \cdot \pi}$ $B := \dfrac{\Theta_2 \cdot 360}{2 \cdot \pi}$ $C := \dfrac{\Theta_3 \cdot 360}{2 \cdot \pi}$

$D := \dfrac{\Theta_4 \cdot 360}{2 \cdot \pi}$ $E := \dfrac{\Theta_5 \cdot 360}{2 \cdot \pi}$ $F := \dfrac{\Theta_6 \cdot 360}{2 \cdot \pi}$

โปรแกรมจะคำนวณได้ คือ $A = -45$ $B = -30$ $C = 20$

$D = 137.481$ $E = 83.996$ $F = -173.091$

โดยที่ A, B, C, D ,E, F = มุมของแต่ละข้อต่อ $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ ตามลำดับ (หน่วยองศา)

ภาคผนวก ง. การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม Mathcad เทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมควบคุม และโปรแกรมแสดงผลการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมKUKA KRC 125/2

ภาคผนวก ง. การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม Mathcad เทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมควบคุมและโปรแกรมแสดงผลการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

เป็นการตรวจสอบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมควบคุมและโปรแกรมแสดงผลการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในโปรแกรม Mathcad

ง.1 การตรวจสอบ ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เทียบกับผลลัพธ์ของสมการอินเวิร์สคิเนเมติกที่คำนวณได้จากโปรแกรม Mathcad

ตรวจสอบครั้งที่ 1

เมื่อจุดพิกัดปลายของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่งพิกัดเดิม (Home) ไปสู่ตำแหน่งพิกัดที่ 1 คือ x = -200.000 มิลลิเมตร, y = 1493.000 มิลลิเมตร, z = 736.684 มิลลิเมตร, Roll = 30.000 องศา, Yaw = 30.000 องศา, Pitch = 30.000 องศา จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

มุมของแต่ละข้อต่อ (องศา)	มุมของแต่ละข้อต่อที่โปรแกรม Mathcad คำนวณได้ (องศา)	มุมของแต่ละข้อต่อที่โปรแกรมควบคุมคำนวณได้ (องศา)	เปอร์เซนต์ความผิดพลาด (%)
θ_1	90.000	90.000	0.000
θ_2	30.023	30.020	0.010
θ_3	-20.035	-20.030	0.025
θ_4	-87.032	-87.040	0.920
θ_5	90.871	90.890	0.021
θ_6	-168.793	-168.810	0.010

ตารางที่ ง.1 แสดง ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เทียบกับผลลัพธ์ของสมการอินเวิร์สคิเนเมติกที่คำนวณได้จากโปรแกรม Mathcad เมื่อจุดพิกัดปลายของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่งพิกัดเดิม (Home) ไปสู่ตำแหน่งพิกัดที่ 1

ตรวจสอบครั้งที่ 2

เมื่อจุดพิกัดปลายของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่งพิกัดเดิม (Home) ไปสู่ตำแหน่งพิกัดที่ 2 คือ x = 478.707 มิลลิเมตร, y = -195.864 มิลลิเมตร, z = 1083.990 มิลลิเมตร, Roll = 30.000 องศา, Yaw = 30.000 องศา, Pitch = 30.000 องศา จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

มุมของแต่ละข้อต่อ (องศา)	มุมของแต่ละข้อต่อที่โปรแกรม Mathcad คำนวณได้ (องศา)	มุมของแต่ละข้อต่อที่โปรแกรมควบคุมคำนวณได้ (องศา)	เปอร์เซนต์ความผิดพลาด (%)
θ_1	-45.000	-45.000	0.000
θ_2	-30.000	-30.000	0.000
θ_3	20.000	20.000	0.000
θ_4	137.481	137.490	0.007
θ_5	83.996	83.990	0.007
θ_6	-173.091	-173.110	0.011

ตารางที่ ง.2 แสดง ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เทียบกับผลลัพธ์ของสมการอินเวิร์สคิเนเมติกที่คำนวณได้จากโปรแกรม Mathcad เมื่อจุดพิกัดปลายของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่งพิกัดเดิม (Home) ไปสู่ตำแหน่งพิกัดที่ 2

ง.2 การตรวจสอบ ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมการแสดงผลการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เทียบกับผลลัพธ์ของสมการฟอร์เวิร์ดคิเนเมติกที่ ได้จากโปรแกรม Mathcad

ตรวจสอบครั้งที่ 1

เมื่อมุมของแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิม (Home) ไปสู่ตำแหน่งที่ 1 คือ $\theta_1 = 90.000$ องศา, $\theta_2 = 30.000$ องศา, $\theta_3 = -20.000$ องศา, $\theta_4 = 87.040$ องศา, $\theta_5 = 90.890$ องศา, $\theta_6 = 168.830$ องศา จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

ตำแหน่งพิกัดปลาย (มิลลิเมตร)	ตำแหน่งพิกัดปลายที่โปรแกรม Mathcad คำนวณได้(มิลลิเมตร)	ตำแหน่งพิกัดปลายที่โปรแกรมแสดงผลการควบคุมคำนวณได้ (มิลลิเมตร)	เปอร์เซนต์ความผิดพลาด (%)
x	-200.000	-200.000	0.000
y	1493.000	1492.622	0.025
z	736.684	736.694	0.001

ตารางที่ ง.3 แสดง ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมแสดงผลการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เทียบกับ ผลลัพธ์ของสมการฟอร์เวิร์ดคิเนเมติกที่คำนวณได้จากโปรแกรม Mathcad เมื่อมุมของแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิม (Home) ไปสู่ตำแหน่งพิกัดที่ 1

ตรวจสอบครั้งที่ 2

เมื่อมุมของแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิม (Home) ไปสู่ตำแหน่งที่ 2 คือ θ_1 = -45.000 องศา, θ_2 = -30.000 องศา, θ_3 = 20.000 องศา, θ_4 = 137.490 องศา, θ_5 = 83.990 องศา, θ_6 = -173.110 องศา จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

ตำแหน่งพิกัดปลาย (มิลลิเมตร)	ตำแหน่งพิกัดปลายที่โปรแกรม Mathcad คำนวณได้(มิลลิเมตร)	ตำแหน่งพิกัดปลายที่โปรแกรมแสดงผลการควบคุมคำนวณได้ (มิลลิเมตร)	เปอร์เซนต์ความผิดพลาด (%)
x	478.712	478.707	0.001
y	-195.869	-195.864	0.003
z	1084.000	1083.990	0.001

ตารางที่ ง.4 แสดง ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมแสดงผลการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เทียบกับ ผลลัพธ์ของสมการฟอร์เวิร์ดคิเนเมติกที่คำนวณได้จากโปรแกรม Mathcad เมื่อมุมของแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิม (Home) ไปสู่ตำแหน่งพิกัดที่ 2