โปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกล (หุ่นยนต์)

ROBOT ARM SIMULATON PROGRAM

นางสาวจิตรฤดี สังวรชาติ
MS. JITRUEDEE SANGWORACHART
นางสาวชนิดา ศรีไส
MS. CHANIDA SRISAI
นายชิตษณุ ภักดีวานิช
MR. CHITSANU PAKDEEWANICH

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

ROBOT ARM SIMULATON PROGRAM

MS. JITRUEDEE SANGWORACHART

MS. CHANIDA SRISAI

MR. CHITSANU PAKDEEWANICH

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2010

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์ โปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกล (หุ่นยนต์)

Robot Arm Simulation Program

นักศึกษา	นางสาวจิตรฤดี สังวรชาติ	รหัสประจำตัว	50010225
	นางสาวชนิดา ศรีใส	รหัสประจำตัว	50010300
	นายชิตษณุ ภักดีวานิช	รหัสประจำตัว	50011491

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

_____

(ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข)

หัวข้อปริญญานิพนธ์	โปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกล (หุ่นยนต์)
นักศึกษา	นางสาวจิตรฤดี สังวรชาติ
	นางสาวชนิดา ศรีใส
	นายชิตษณุ ภักดีวานิช
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาทฤษฎีและหลักการของการเขียนโปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกล รุ่น SCORBOT-ER 4u โดยใช้ภาษา Visual C# และเทคนิคการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ การคำนวณตำแหน่งของแขนกลใช้หลักกลศาสตร์การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ เพื่อนำตำแหน่งที่ได้ไปแสดงภาพจำลองการเคลื่อนไหวสามมิติของแขนกลด้วย OpenGL ขั้นตอนการดำเนินงาน เริ่มจากการวัดขนาดชิ้นส่วนของแขนกลแต่ละชิ้น และนำไปเขียนแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks จากนั้นแปลงแบบให้อยู่ในรูปแบบ polygon file (.ply) เพื่อบันทึกพิกัดและระนาบของชิ้นส่วนต่างๆ ในรูปแบบเชิงวัตถุ โดยนำพิกัดและระนาบที่บันทึกจากไฟล์ .ply มาแสดงเป็นภาพสามมิติด้วย OpenGL และคำนวณทิศทางและขอบเขตการเคลื่อนไหวของแขนกลตามคำสั่งของผู้ใช้ โปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกลที่สร้างขึ้นสามารถรับคำสั่งจากผู้ใช้ และบันทึกตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลเพื่อเรียกดูในภายหลังได้ สามารถบังคับการเคลื่อนที่ของแต่ละชิ้นส่วนและตรวจสอบขอบเขตการเคลื่อนที่ได้จากภาพที่ปรากฏ

Thesis Title	Robot Arm Simulation Program
Student	Ms. Jitruedee Sangworachart
	Ms. Chanida Srisai
	Mr. Chitsanu Pakdeewanich
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic year	2010
Thesis Advisor	Dr. Udom Janjarassuk

ABSTRACT

This thesis is a study of theories and principles of a development of simulation program for the SCORBOT-ER 4u robot by using Visual C# and object-oriented programming techniques. Robot kinematics is used to analyze the position and movement of the robot in order to display 3D graphic by using OpenGL. The processes begin by measuring the dimension of the robot in order to from the drawings of each parts in SolidWorks, and then convert the drawings into the point and planes from the .ply files are then loaded into 3D objects for 3D graphic construction by using OpenGL. The movement of the robot is calculated according to the user input. The simulation program is able to response to the user commands and the movements of the robot can be recorded for further usage. Each joint of the robot can be controlled separately.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง โปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกล (หุ่นยนต์) สามารถเสร็จลุล่วงโดยได้รับการสนับสนุน การให้คำปรึกษา รวมถึงกำลังใจต่างๆ ซึ่งส่งผลให้การจัดทำโครงงานนี้บรรลุเป้าหมายตามที่ได้วางไว้ กลุ่มผู้จัดทำขอขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ส่งผลให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในทุกๆ เรื่อง

ขอขอบพระคุณ ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกๆ ด้านตลอดวลาที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สรรพสิทธิ์ ลิ่มนรรัตน์ สำหรับความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ความเอาใจใส่และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกๆ ท่าน สำหรับความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือซึ่งกันและกันในทุกๆ เรื่อง และคอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นางสาวจิตรฤดี สังวรชาติ
นางสาวชนิดา ศรีใส
นายชิตษณุ ภักดีวานิช

สารบัญ

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

สารบัญตาราง

หน้า

สารบัญรูป

หน้า

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

บทที่ 1
บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบัน แขนกลได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิต เนื่องจากสามารถใช้แทนแรงงานมนุษย์ในการขนส่งสินค้า การหยิบจับสิ่งของ การพ่นสี เป็นต้น การใช้แขนกลแทนแรงงานนิยมใช้กันอย่างมากในการผลิตขนาดใหญ่ (Mass Production) เนื่องจากแขนกลสามารถทำงานแบบซ้ำๆ ได้ดี มีประสิทธิภาพและความแม่นยำในการทำงานสูงกว่าการทำงานของมนุษย์

ปัญหาและอุปสรรคในการใช้แขนกลที่มักจะเกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงานคือ การเขียนคำสั่งที่ใช้ในการป้อนข้อมูลให้แขนกลทำงานตามที่ต้องการ หากเกิดข้อผิดพลาดในขั้นตอนดังกล่าวอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องหรือเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ยังต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานที่มีทักษะและประสบการณ์สูงในการเขียนคำสั่งควบคุมการทำงานของแขนกล ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการผลิต และประสิทธิภาพของเครื่องมือรวมไปถึงต้นทุนในการผลิต

ทักษะการใช้งานของแขนกลควรฝึกฝนตั้งแต่ขณะที่กำลังศึกษาอยู่ แต่เนื่องจากแขนกลมีราคาแพงและมีจำนวนไม่เพียงต่อความต้องการ อีกทั้งมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดอุบัติเหตุขึ้นในระหว่างการฝึกอบรม ดังนั้นการนำระบบเสมือนจริงมาใช้ในการศึกษาจึงสามารถช่วยลดความเสี่ยงและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในการปฏิบัติงานจริงได้

โปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกล มีบทบาทในแง่ของการฝึกใช้แขนกล โดยที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย ต่อแขนกลโดยตรง เพราะเป็นการฝึกกับโปรแกรมจำลองซึ่งประหยัดเวลาและลดอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้นกับแขนกลที่มีราคาแพง โปรแกรมดังกล่าวจะมีการจำลองสิ่งแวดล้อมให้ใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อมจริงมากที่สุด เพื่อที่จะนำคำสั่งที่ได้จากการทดลองมาใช้กับแขนกลจริงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาการจำลองการทำงานของแขนกล

1.2.2 เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการจำลองการทำงานของแขนกล

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 ใช้ Visual C# ในการออกแบบโปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกล

1.3.2 โปรแกรมจำลองการทำงานใช้สำหรับแขนกลรุ่น SCORBOT – ER 4u

1.3.3 แขนกลที่ใช้เป็นแบบ jointed – arm robot และใช้ในการหยิบของขึ้นลง

1.3.4 แสดงผลการจำลองโดยใช้ OpenGL

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถใช้งานแขนกลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.4.2 สามารถนำไปใช้เป็นสื่อการเรียนการสอน

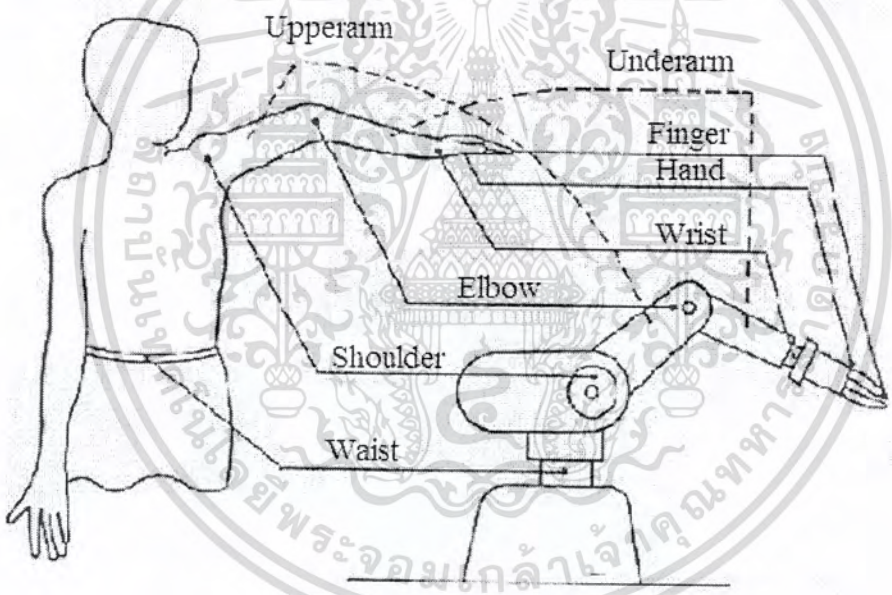
1.4.3 ลดค่าใช้จ่ายในการใช้งาน และการดูแลรักษาแขนกล

1.4.4 เป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมการจำลองการทำงานของแขนกลในอนาคต

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Industrial Robot)

การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะเลียนแบบร่างกายของมนุษย์ โดยจะเลียนแบบเฉพาะส่วนของร่างกายที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเท่านั้น นั่นคือช่วงแขนของมนุษย์ ดังนั้นคำว่า "แขนกล" จึงเป็นอีกชื่อหนึ่งของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเปรียบเทียบกับแขนของมนุษย์ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนต่างๆ ของหุ่นยนต์เปรียบเทียบกับสรีระของมนุษย์

2.1.1 นิยามของหุ่นยนต์ (Robotics definition)

คำจำกัดความของหุ่นยนต์ตามมาตรฐาน ISO 8373 คือ "An automatically controlled, reprogrammable, multipurpose, manipulator programmable in three or more axes which may be either fixed in place or mobile for use in industrial automation application" ซึ่งหมายถึงเครื่องจักรที่ถูกควบคุมอัตโนมัติ สามารถเขียนโปรแกรมใหม่ได้ ใช้งานเอนกประสงค์ โปรแกรมการเคลื่อนที่จะต้องสามารถโปรแกรมให้เคลื่อนที่ได้อย่างน้อย 3 แกนหรือมากกว่า หุ่นยนต์อาจจะยึดอยู่กับที่หรือเคลื่อนที่ได้ เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม

2.1.2 การทำงานของข้อต่อของหุ่นยนต์

ข้อต่อ (Joint) ของหุ่นยนต์ อุตสาหกรรมสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทตามลักษณะการทำงาน ดังนี้

ตารางที่ 2.1 การทำงานของข้อต่อ

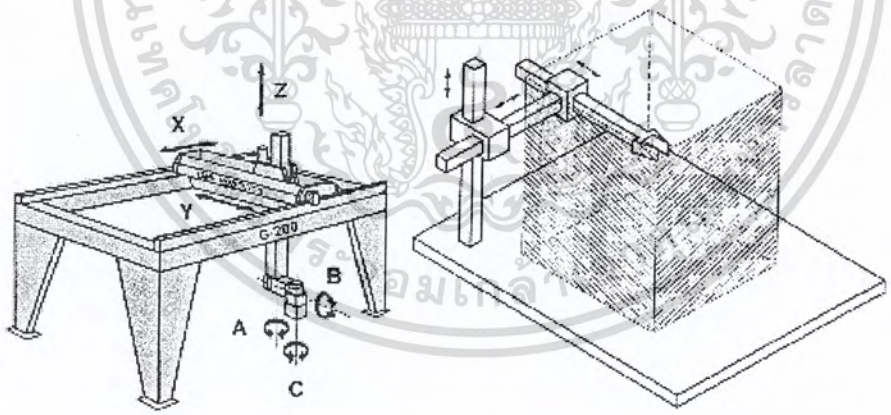
ชนิด	สัญลักษณ์	หมายเหตุ
Revolute (R)		การหมุนรอบแกน (Rotary)
Prismatic (P)		การเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear motion)

2.1.3 การแบ่งชนิดของหุ่นยนต์

การแบ่งชนิดของหุ่นยนต์ จะแบ่งตามลักษณะรูปทรงของพื้นที่ทำงาน (Envelope Geometric) ดังนี้

2.1.3.1 Cartesian Robot (Gantry Robot)

แกนทั้ง 3 ของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น (Prismatic) ถ้าโครงสร้างมีลักษณะคล้าย Overhead Crane จะเรียกว่าเป็นหุ่นยนต์ชนิด gantry แต่ถ้าหุ่นยนต์ไม่มีขาตั้งหรือขาเป็นแบบอื่น เรียกว่า ชนิด Cartesian



a) Gantry Robot b) Work envelope of Gantry Robot

รูปที่ 2.2 Cartesian Robot (Gantry Robot)

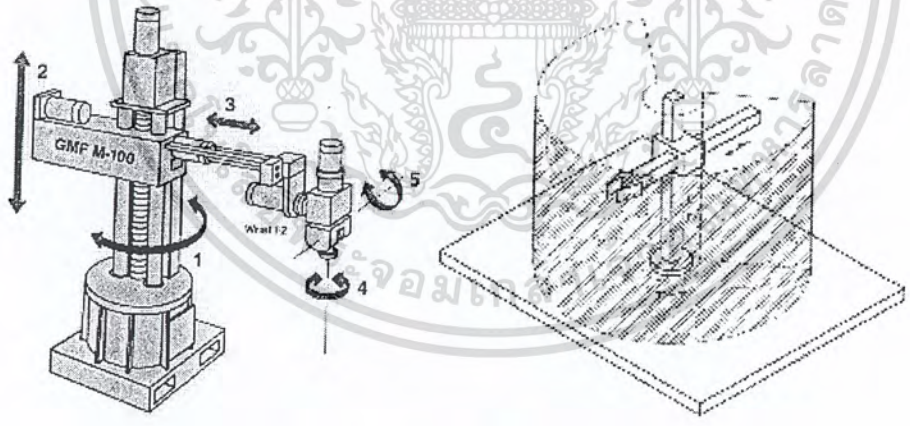
ตารางที่ 2.2 ข้อดี และข้อเสีย ของ Cartesian Robot

ข้อดี	ข้อเสีย
- เคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงทั้ง 3 มิติ	- ต้องการพื้นที่ติดตั้งมาก
- การเคลื่อนที่สามารถทำความเข้าใจง่าย	- บริเวณที่หุ่นยนต์เข้าไปทำงานได้ จะเล็กกว่าขนาดของตัวหุ่นยนต์
- มีส่วนประกอบง่าย ๆ	- ไม่สามารถเข้าถึงวัตถุจากทิศทางข้างใต้ได้
- โครงสร้างแข็งแรงตลอดการเคลื่อนที่	- แกนแบบเชิงเส้นจะ Seal เพื่อป้องกันฝุ่นและของเหลวได้ยาก

เนื่องจากโครงสร้างของ Cartesian Robot มีความแข็งแรงตลอดแนวการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงเหมาะกับงานเคลื่อนย้ายของหนักๆ หรือเรียกว่างาน Pick – and – Place เช่นใช้โหลดชิ้นงานเข้าเครื่องจักร (Machine loading), ใช้จัดเก็บชิ้นงาน (Stacking) นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานประกอบ (Assembly) ที่ไม่ต้องการเข้าถึงในลักษณะที่มีมุมหมุน เช่น ประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และงานทดสอบต่างๆ

2.1.3.2 Cylindrical Robot

หุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีแกนที่ 2 (ไหล่) และแกนที่ 3 (ข้อศอก) เป็นแบบ prismatic ส่วนแกนที่ 1 (เอว) จะเป็นแบบหมุน (revolute) ทำให้การเคลื่อนที่ได้พื้นที่การทำงานเป็นรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.3b



a) Cylindrical Robot b) Work envelope of Cylindrical Robot

รูปที่ 2.3 Cylindrical Robot

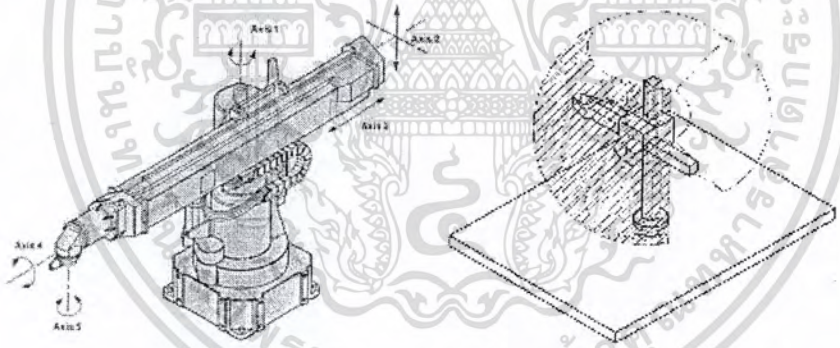
ตารางที่ 2.3 ข้อดี และข้อเสีย ของ Cylindrical Robot

ข้อดี	ข้อเสีย
- มีส่วนประกอบไม่ซับซ้อน	- มีพื้นที่ทำงานจำกัด
- การเคลื่อนที่สามารถเข้าใจได้ง่าย	- แกนที่เป็นเชิงเส้นมีความยุ่งยากในการ seal เพื่อป้องกันฝุ่นและของเหลว
- สามารถเข้าถึงเครื่องจักรที่มีการเปิด-ปิด หรือเข้าไปในบริเวณที่เป็นช่องหรือโพรงได้ง่าย (Loading) เช่น การโหลดชิ้นงานเข้าเครื่อง CNC	

Cylindrical Robot โดยทั่วไปจะใช้ในการหยิบยกชิ้นงาน (Pick-and-Place) หรือป้อนชิ้นงานเข้าเครื่องจักร เพราะสามารถเคลื่อนที่เข้าออกบริเวณที่เป็นช่องโพรงเล็กๆ ได้สะดวก

2.1.3.3 Spherical Robot (Polar)

Spherical Robot มีสองแกนที่เคลื่อนในลักษณะการหมุน (Revolute Joint) คือแกนที่ 1 (เอว) และแกนที่ 2 (ไหล่) ส่วนแกนที่ 3 (ข้อศอก) จะเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่แนวเส้นตรง ดังรูปที่ 2.4 a) ซึ่งทำให้ได้พื้นที่การทำงานเป็นรูปทรงกลม ดังรูปที่ 2.4 b)



a) Spherical Robot b) Work envelope of Spherical Robot

รูปที่ 2.4 Spherical Robot

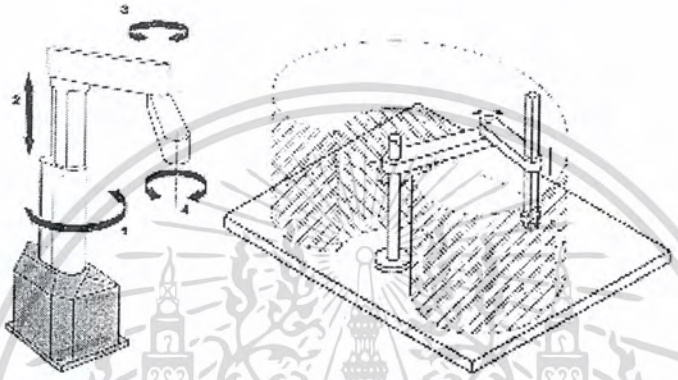
ตารางที่ 2.4 ข้อดี และข้อเสีย ของ Spherical Robot

ข้อดี	ข้อเสีย
- มีปริมาตรการทำงานมากขึ้น เนื่องจากการหมุนของแกนที่ 2 (ไหล่)	- มีระบบพิกัด (Coordinate) และส่วนประกอบ ที่ซับซ้อน
- สามารถที่จะก้มลงมาจับชิ้นงานบนพื้นได้สะดวก	- การเคลื่อนที่และระบบควบคุมมีความซับซ้อนขึ้น

Spherical Robot ใช้ในงานที่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical) เพียงเล็กน้อย เช่น การโหลดชิ้นงานเข้าออกจากเครื่องปั๊ม (Press) หรืออาจจะใช้งานเชื่อมจุด (Spot Welding)

2.1.3.4 SCARA Robot

หุ่นยนต์ SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) จะมีลักษณะแกนที่ 1 (เอว) และแกนที่ 3 (ข้อศอก) หมุนรอบแกนแนวตั้ง ส่วนแกนที่ 2 จะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ขึ้นลง (Prismatic) ดังรูปที่ 2.5a ทำให้ได้พื้นที่การทำงานดัง รูปที่ 2.5b หุ่นยนต์ SCARA จะเคลื่อนที่ได้รวดเร็วในแนวระนาบ และมีความแม่นยำสูง



a) Scara Robot b) Work envelope of Scara Robot

รูปที่ 2.5 SCARA Robot

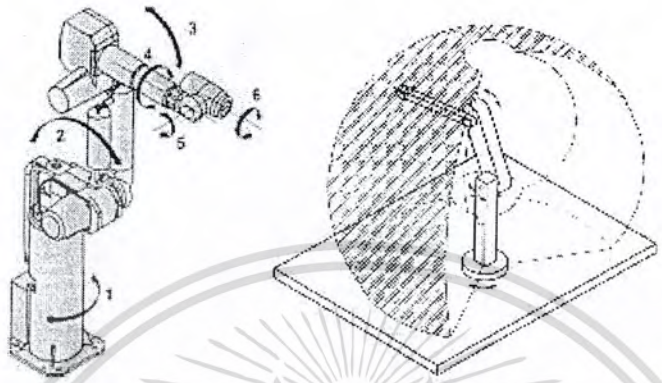
ตารางที่ 2.5 ข้อดี และข้อเสีย ของ SCARA Robot

ข้อดี	ข้อเสีย
- มีความแม่นยำสูง	- มีพื้นที่ทำงานจำกัด
- สามารถเคลื่อนที่ในแนวระนาบ และขึ้นลงได้รวดเร็ว	- ไม่สามารถหมุน (rotation)ในลักษณะมุมต่างๆได้
	- สามารถยกน้ำหนัก (Payload) ได้ไม่มากนัก

การประยุกต์การนำไปใช้งาน เนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวระนาบและขึ้นลงได้รวดเร็วจึงเหมาะกับงานประกอบชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความรวดเร็ว และการเคลื่อนที่ไม่ต้องการการหมุนมากนัก แต่จะไม่เหมาะกับงานประกอบชิ้นส่วนทางกล (Mechanical part) ซึ่งส่วนใหญ่การประกอบจะอาศัยการหมุน (rotation) ในลักษณะมุมต่างๆ นอกจากนี้ SCARA Robot ยังเหมาะกับงานตรวจสอบ (Inspection) งานบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

2.1.3.5 Articulated Arm (Revolute)

แกนการเคลื่อนที่ของ Articulated Arm จะเป็นแบบหมุน (Revolute) ทั้งหมด รูปแบบการเคลื่อนที่จะคล้ายกับแขนคน ซึ่งจะประกอบด้วยช่วงเอว ท่อนแขนบน ท่อนแขนล่าง ข้อมือ การเคลื่อนที่ทำให้ได้พื้นที่การทำงานดังรูปที่ 2.6b



a) Articulated Robot b) Work envelope of Articulated Robot

รูปที่ 2.6 Articulated Arm

ตารางที่ 2.6 ข้อดี และข้อเสีย ของ Articulated Arm

ข้อดี	ข้อเสีย
- เนื่องจากทุกแกนจะเคลื่อนที่ในลักษณะของการหมุนทำให้มีความยืดหยุ่นสูงในการเข้าไปยังจุดต่างๆ	- มีระบบพิกัด (Coordinate) ที่ซับซ้อน
- บริเวณข้อต่อ (Joint) สามารถ Seal เพื่อป้องกันฝุ่น ความชื้นหรือน้ำได้ง่าย	- การเคลื่อนที่และระบบควบคุมทำความ เข้าใจได้ยากขึ้น
- มีพื้นที่การทำงานมาก	- ควบคุมให้เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (Linear) ได้ยาก
- สามารถเข้าถึงชิ้นงานทั้งจากด้านบน ด้านล่าง	- โครงสร้างไม่มั่นคงตลอดช่วงการเคลื่อนที่ เพราะบริเวณพื้นที่การทำงาน (Work envelope) ปลายแขนจะมีการสั่น ทำให้ความแม่ยำลดลง
- เหมาะกับการใช้มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นชุดขับเคลื่อน	

การประยุกต์การนำไปใช้งาน หุ่นยนต์ชนิดนี้สามารถใช้งานได้กว้างขวาง เพราะสามารถเข้าถึงตำแหน่งต่างๆ ได้ดี เช่น งานเชื่อม Spot Welding, Path Welding, งานยกของ, งานตัด, งานทากาว, งานที่มีการเคลื่อนที่ยากๆ เช่น งานพ่นสี งาน sealing ฯลฯ

การนำข้อต่อ (Joint) ทั้งสองแบบมาต่อเข้าด้วยกันอย่างน้อย 3 แกนหลักจะได้พื้นที่ทำงาน (Work envelope) ที่มีลักษณะแตกต่างกันไป สามารถนำมาสรุปเป็นตาราง เมื่อแบ่งตามชนิดของหุ่นยนต์ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.7 สรุปการนำข้อต่อทั้งสองแบบมาต่อเข้าด้วยกัน

ชนิดของหุ่นยนต์	แกนที่ 1 (เอว)	แกนที่ 2 (ไหล่)	แกนที่ 3(ข้อศอก)
Cartesian (gantry)	P	P	P
Cylindrical	R	P	P
Spherical (Polar)	R	R	P
SCARA Robot	R	P	R
Articulated Arm	R	R	R
R = Revolute, P = Prismatic			

(สัมพันธ์ แหล่งป่าหมุ้น : http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/ELTC2401/unit4/robot/robot2.htm)

2.2 การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object-oriented programming, OOP)

การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ คือการเขียนโปรแกรมโดยการมองว่าส่วนประกอบของโปรแกรมเป็นเสมือนวัตถุชิ้นหนึ่งที่ประกอบไปด้วย คุณสมบัติ (property) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าวัตถุนี้คืออะไร และวิธีการหรือที่เรียกว่าเมธอด (Method) ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมของวัตถุนั้นว่าสามารถทำอะไรได้ การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุเป็นการแบ่งซอฟท์แวร์หรือโปรแกรมออกเป็นส่วนๆ เรียกว่า คลาส (Class) โดยการนิยามคลาสและออบเจ็กต์ เพื่อทำให้สามารถนำส่วนของซอฟท์แวร์หรือโปรแกรม ส่วนนั้นกลับมาเรียกใช้งานได้อีก เพื่อลดความซ้ำซ้อนและเวลาในการพัฒนาโปรแกรมลง การทำงานของคลาส จะถูกกำหนดโดยส่วนอินเตอร์เฟสของเมธอด ส่วนการทำงานของส่วนที่เป็นโค้ด (Code) จะไม่ถูกคำนึงถึงมากนักในการออกแบบภาษา การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุสนใจเฉพาะข้อมูลที่จะถูกประมวลผลมากกว่าฟังก์ชันที่ทำการประมวลข้อมูลนั้นๆ

2.2.1 หลักสำคัญของการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ

- Class and Subclass
- Encapsulation
- Inheritance
- Polymorphism
- Abstract Data Type

2.2.1.1 คลาส

คลาส คือกลุ่ม (category) ของออบเจ็กต์ที่มีคุณสมบัติและพฤติกรรมที่เหมือนกัน โดยคลาสจะต้องประกอบไปด้วย data, behavior และ interface หรือหมายถึงต้นแบบ (prototype) หรือพิมพ์เขียว ที่กำหนดตัวแปรและวิธีการเพื่อนำไปใช้ได้ในทุกออบเจ็กต์ของคลาส

2.2.1.2 ออบเจ็กต์

ออบเจ็กต์ คือ สิ่งใดๆ ซึ่งมีคุณลักษณะ (State) บ่งบอกถึงความเป็นตัวของมันเองในขณะนั้น และสามารถแสดงพฤติกรรม (Behavior) ของตัวเองออกมาได้ เช่น รถยนต์สีน้ำเงิน มีความหมายคือ วัตถุประเภทรถยนต์ มีคุณลักษณะของสีเป็นสีน้ำเงิน และมีพฤติกรรมที่แสดงถึงการเคลื่อนที่ และหยุดได้ หรือกล่าวได้ว่าออบเจ็กต์ คือ ข้อมูลของคลาส (เป็น entities ของคลาส) ซึ่งทุกๆ อย่างจะจัดเป็นออบเจ็กต์ โดยต้องประกอบไปด้วย

- ชื่อ (Identity)
- สถานะ (State) คุณสมบัติ หรือค่าของข้อมูล ซึ่งแทนด้วย value
- พฤติกรรม (Behavior) ที่ระบุว่าสามารถทำอะไรได้บ้าง ซึ่งแทนด้วยเมธอด

2.2.1.3 เมธอด

เมธอด คือ ฟังก์ชันที่บ่งบอกพฤติกรรมของออบเจ็กต์ว่าทำอะไรได้บ้าง เมธอดถูกกำหนดไว้ในคลาส ซึ่งประกอบด้วย ชื่อของเมธอด เรียกว่า Identifier ตามด้วยเครื่องหมายวงเล็บ () โดยในวงเล็บอาจมี parameter list อยู่หรือไม่ก็ได้ เช่น

getBalance()

raiseSalary(float Salary, float Percent)

2.2.1.4 Constructor Method

คือเมธอดที่ใช้สาหรับสร้าง instance object ของคลาสนั้นๆ โดยที่ชื่อเมธอดนี้ต้องเหมือนกับชื่อคลาส และใช้สำหรับ initialize ข้อมูลให้กับ instance variable โดยจะไม่มีการถ่ายทอดให้กับ subclass และไม่มีการ return ค่า

2.2.1.5 Message

คือคำสั่งหรือข้อความที่จะให้ข้อมูลหรือตัวแปรใดทำงาน ก็คือ parameter ในภาษาอื่นที่ไม่ใช่ OOP คือใช้เพื่อนำส่งค่าข้อมูลระหว่างออบเจ็กต์ โดยใน message นั้นต้องประกอบด้วย

- Destination (ชื่อของออบเจ็กต์)
- เมธอด
- Parameters

2.2.1.6 Accessibility

เป็นการกำหนดการเข้าถึงของข้อมูลหรือเมธอดภายในคลาส โดยใช้คีย์เวิร์ด ต่อไปนี้ในการกำหนดระดับการเข้าถึง

- public: เข้าถึงได้ในทุกที่
- private: เข้าถึงได้เฉพาะภายในคลาส เท่านั้น ไม่รวม subclass
- protected: เข้าถึงได้เฉพาะภายในคลาส และ subclass ที่สืบทอดกันมา (Inherit)
- default: ถ้าไม่ระบุ จะเข้าถึงข้อมูลภายในคลาส และอยู่แพ็กเกจเดียวกัน

2.2.1.7 Encapsulation

จากแนวทางเชิงวัตถุได้นำเอา Attribute (Data) และเมธอดเก็บรวมกันไว้ภายแต่ละออบเจ็กต์ นับว่าเป็นการห่อหุ้มรายละเอียดของออบเจ็กต์ (ข้อมูลและพฤติกรรมของออบเจ็กต์) ไว้ เปรียบเสมือนการนำตัวยาหลายๆ ชนิดมาผสมรวมกัน แล้วบรรจุในแคปซูล (Capsule) ซึ่งในความเป็นจริงแล้วถ้าไม่ใช่แคปซูลใส จะไม่สามารถรู้ได้ว่าภายในประกอบด้วยอะไรบ้าง OOP ได้นำเอาหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับการมองเห็นและการเข้าถึงรายละเอียดของคลาส ซึ่งมุมมองดังกล่าวเป็นที่มาของหลักการ Encapsulation

Encapsulation หมายถึง การห่อหุ้ม Attribute และเมธอดของออบเจ็กต์เข้าไว้ด้วยกัน เพื่อป้องกันการมองเห็นหรือเข้าถึงข้อมูลจากออบเจ็กต์อื่น สำหรับประโยชน์ของ Encapsulation คือ ทำให้เกิดการนำกลับมาใช้ใหม่ (reuse) การใช้งานออบเจ็กต์กระทำโดยการส่งข้อความ (Message) เพื่อเรียกใช้วิธีการของออบเจ็กต์ ซึ่งทำให้เกิดผลดีคือ เป็นการป้องกันสิ่งที่อยู่ในออบเจ็กต์ไม่ให้ได้รับผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายนอก และรักษาระบบไม่ให้ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงภายในออบเจ็กต์

หลักการ Encapsulation ก่อให้เกิดการมองออบเจ็กต์ได้ใน 2 มุมคือ การมองออบเจ็กต์จากภายใน (Internal View) และการมองออบเจ็กต์จากภายนอก (Outside View) ซึ่งถ้ามองออบเจ็กต์จากภายในตัวเอง จะเห็นรายละเอียดทั้งหมดของออบเจ็กต์ (ทั้ง Attribute และเมธอด) แต่ถ้ามองออบเจ็กต์จากภายนอก จะเห็นเฉพาะสิ่งที่ออบเจ็กต์เปิดเผยทาง Public Interface เท่านั้น ซึ่งเรียกว่าเป็นการซ่อนข้อมูล (Information Hiding)

Information Hiding หรือการซ่อนรายละเอียดของคลาสหรือออบเจ็กต์นั้น มีหลายระดับแตกต่างกันออกไป ในบางรายละเอียดของคลาส ซึ่งอาจเปิดเผยให้ภายนอกสามารถมองเห็นและใช้งานได้โดยตรง (เมธอด) ในทางตรงกันข้าม ในบางรายละเอียดเราอาจต้องการปกปิดไม่ยอมให้ภายนอกได้เห็นเลยก็ได้ (Properties) ซึ่งระดับในการมองเห็นรายละเอียดต่างๆ ของคลาสจากภายนอกนี้ เรียกว่า "Visibility"

ทั้งนี้เรายังสามารถกำหนดให้พร็อพเพอร์ตี้ หรือเมธอดของคลาสมี Visibility เป็นระดับใดก็ได้ ขึ้นอยู่กับความต้องการและระดับของความจำเป็นในการปกปิดรายละเอียด แบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ Private, Protected และ Public

2.2.1.8 Inheritance

คือ การสร้างคลาสใหม่ ซึ่งสืบทอดคุณลักษณะ และพฤติกรรมของอีกคลาสหนึ่ง ดังนั้นคลาสที่สร้างขึ้นใหม่ขึงมีเมธอด และพร็อพเพอร์ตี้เหมือนในคลาสต้นแบบทุกประการ โดยคลาสที่เป็นคลาสต้นแบบเรียกว่า "Superclass" และคลาสที่สืบทอดคุณสมบัติเรียกว่า "Subclass" นอกจากนี้ Subclass ยังสามารถแก้ไขหรือเพิ่มเติมเมธอดและพร็อพเพอร์ตี้ได้ด้วย

2.2.1.9 Polymorphism

การทำให้ message อันหนึ่งสามารถส่งให้ออบเจ็กต์แต่ละตัวในคลาส และ subclass ตอบสนองต่อ message อันเดียวกัน ในลักษณะที่เหมาะสมกับคลาส ของตัวเอง เช่น method print นี้สามารถส่งให้ทุกออบเจ็กต์ของคลาส และ subclass ที่ทำให้ออบเจ็กต์นั้นรู้จัก method print และแต่ละออบเจ็กต์ที่ต่างกันจะตอบสนองต่อ message นี้ต่างกันออกไป ตามความสามารถในการใช้

2.2.1.10 Abstract Data Type (ADT)

รูปแบบชนิดของข้อมูล ผู้พัฒนาเป็นผู้กำหนดขึ้นมาเอง

2.2.1.11 เหตุผลที่ OOP มีบทบาทมากขึ้น

- ง่าย และรวดเร็ว ทำให้ลดเวลาในการพัฒนาลงไปได้
- เพิ่มปริมาณงานที่ได้ และมีความน่าเชื่อถือมากกว่า
- สามารถนำโค้ดกลับมาใช้ได้อีก (เรียกใช้คลาส)
- ทำต้นแบบ (Prototyping) ได้รวดเร็วกว่า
- ลดต้นทุนในการสร้าง และบำรุงรักษาซอฟท์แวร์
- การเปลี่ยนแปลงแก้ไข ไม่ทำให้เกิดผลกระทบไปยังภายนอกคลาส

(สุธี พงศาสกุลชัย และ หทัยชนก งามอินทร์, 2550)

2.3 OpenGL

2.3.1 ความหมายของ OpenGL

OpenGL (Open Graphics Library) เป็นซอฟต์แวร์ไลบรารี (Software Library) ที่ใช้ติดต่อกับฮาร์ดแวร์เพื่อแสดงภาพกราฟิก โดย OpenGL จะมีคำสั่งสำหรับการวาดภาพพื้นฐาน คือ จุด เส้น และรูปเหลี่ยมต่างๆ ซึ่งคำสั่งพื้นฐานมีประมาณ 120 คำสั่ง ที่สามารถใช้กำหนดคุณลักษณะและควบคุมการทำงานของแอพพลิเคชั่น 3 มิติ ซึ่งผู้พัฒนาโปรแกรมสามารถใช้ไลบรารี OpenGL ได้โดยไม่มีค่าลิขสิทธิ์ ทำให้มีการนำไลบรารีของของ OpenGL ไปใช้งานอย่างแพร่หลายในงานกราฟิก

ภาษาที่สามารถใช้กับ OpenGL มีดังนี้ C/C++ (VC++, Borland C++ C++ Builder, C Complier on UNIX), Delphi, Visual Basic, Java, Perl, Python, Fortran และ Ada เป็นต้น

เนื่องจากโครงสร้างของ OpenGL เป็นอินเตอร์เฟซที่เป็นอิสระจากฮาร์ดแวร์ (Hardware – independent interface) และสามารถใช้ได้กับระบบปฏิบัติการหลายๆ แบบ ไม่ว่าจะเป็น Window, UNIX เป็นต้น และด้วยเหตุที่ OpenGL ถูกออกแบบให้ทำงานโดยไม่ยึดติดกับระบบ สามารถทำงานได้บนทุกๆ แพลตฟอร์ม (Independent Platform) ทำให้สามารถเคลื่อนย้ายโค้ดที่สร้างเรียบร้อยแล้วไปใช้แพลตฟอร์มอื่นได้อย่างสะดวก (Portability) โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงโค้ดโปรแกรมเลย การที่ OpenGL สามารถใช้ได้กับระบบปฏิบัติการที่หลากหลายนี้เอง ทำให้ OpenGL ไม่มีคำสั่งที่จัดการกับระบบปฏิบัติการเลย อีกทั้งยังไม่มีคำสั่งเพื่อรับอินพุตจากผู้ใช้อีกด้วย หน้าที่ทั้งสองอย่างนี้เป็นของผู้เขียนโปรแกรมที่จะต้องออกแบบและเขียนโค้ดเพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามยังมียูทิลิตี้ (Utility) ที่ช่วยจัดการงานทั้งสองนี้ หากพัฒนาโปรแกรมบนระบบปฏิบัติการแบบ Windows ยูทิลิตี้ดังกล่าวคือ GULT (OpenGL Utility Toolkit) อย่างไรก็ตาม OpenGL ยังไม่มีคำสั่งระดับสูงที่จะใช้วาดวัตถุ 3 มิติแบบซับซ้อน เช่น รถยนต์ อวัยวะ หรือโมเลกุลต่างๆ สิ่งที่ OpenGL เตรียมไว้มีเพียงการสร้างรูปจำลองสามมิติ คือรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่าย ได้แก่ จุด เส้น และรูปหลายเหลี่ยม ซึ่งผู้ใช้งานจะต้องนำรูปทรงเหล่านี้มาประกอบกันเพื่อให้เกิดรูปทรงสามมิติที่ซับซ้อน (ไลบรารี Open Inventor ถูกสร้างขึ้นจากชุดคำสั่งของ OpenGL เพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถกำหนดสร้างรูปทรงที่ซับซ้อนได้โดยง่าย)

2.3.2 เหตุผลที่นิยมใช้ OpenGL ในระบบกราฟิก

ในการออกแบบและการทำงานในระบบกราฟิกมีเครื่องมือที่ช่วยงานหลายเครื่องมือ แต่ละเครื่องมือมีคุณสมบัติ ฟังก์ชัน หรือเครื่องมือที่แตกต่างกันไป เครื่องมือเหล่านั้นอาจมีจุดเด่น – จุดด้อยที่แตกต่างกันไป แต่ปัจจุบันเครื่องมือที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างระบบกราฟิกคือ OpenGL ซึ่งเหตุผลสำคัญที่นิยมนำ OpenGL มาใช้งานมีดังนี้

- มีประสิทธิภาพสูงในการเร่งความเร็ว Application 3 มิติ และเกมต่างๆ ในปัจจุบัน
- สามารถใช้ข้อมูลจำนวนมาก สร้าง effect 3 มิติ ในแบบ real time ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- เพิ่มการสนับสนุนอุปกรณ์ใหม่ๆ ลงไปใน OpenGL ที่ทำได้ง่ายและรวดเร็ว
- ทำงานได้บนหลายแพลตฟอร์ม ทำให้การย้ายโปรแกรมประยุกต์ระหว่างแต่ละแพลตฟอร์มนั้นทำได้ง่าย และประหยัด
- มีเสถียรภาพในการทำงานสูง สามารถทำงานกับเครื่องเวิร์คสเตชันแบบ High End 3D และซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ได้
- ใช้งานร่วมกับคอมไพเลอร์ได้หลากหลาย เช่น C/C++, Delphi, Visual Basic, Java, Perl, Fortran, Ada เป็นต้น

2.3.3 โครงสร้างไลบรารีพื้นฐานของ OpenGL

ไลบรารีพื้นฐานของ OpenGL จะมีฟังก์ชันเก็บอยู่ใน GL ฟังก์ชันเหล่านี้ชื่อจะขึ้นต้นด้วย gl หลังจากนั้นมีชื่อฟังก์ชันที่ขึ้นต้นตัวแรกด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่ เช่น glBegin, glClear เป็นต้น ส่วนฟังก์ชันเฉพาะ ต้องใช้อาร์กิวเมนต์ 1 ตัว หรือมากกว่า 1 ตัว ซึ่งขึ้นอยู่กับฟังก์ชัน อาร์กิวเมนต์อาจเป็นสัญลักษณ์เฉพาะ เช่น ค่าคงที่ ชื่อพารามิเตอร์ ค่าพารามิเตอร์ หรือโหมดของพารามิเตอร์ เป็นต้น ค่าคงที่ทั้งหมดนี้จะขึ้นต้นด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่ GL นอกจากนี้ยังมีเครื่องหมายขีดล่าง (Underscore; _) เพื่อคั่นระหว่างคอมโพเนนต์ เช่น GL_2D, GL_RGB เป็นต้น

ฟังก์ชันของ OpenGL อาจจะกำหนดประเภทข้อมูลได้ เช่น ใช้กำหนดประเภทข้อมูลตัวเลขจำนวนเต็ม 32 บิต แต่การกำหนดขนาดของตัวเลขจำนวนเต็มอาจจะแตกต่างกันไปตามเครื่อง การกำหนดค่าประเภทข้อมูล OpenGL จะใช้ชื่อประเภทข้อมูลที่มีในฟังก์ชัน โดยชื่อประเภทข้อมูลนี้จะขึ้นต้นด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่ GL ต่อด้วยชื่อประเภทข้อมูลมาตรฐานที่เป็นตัวพิมพ์เล็ก (หรืออาจใช้ชื่อธรรมดา เช่น int, float) เช่น GLbyte, GLfloat, GLdouble เป็นต้น

บางอาร์กิวเมนต์ของฟังก์ชัน OpenGL สามารถกำหนดค่าโดยใช้อาร์เรย์ที่เป็นลิสต์ของค่าข้อมูลได้ มีออปชันในการกำหนดลิสต์ของค่าข้อมูลเป็นพอยเตอร์ของอาร์เรย์ อีกทั้งยังสามารถกำหนดลิสต์ในลักษณะ explicit ให้เป็นพารามิเตอร์ของอาร์กิวเมนต์ได้อีกด้วย

2.3.4 ไลบรารีที่เกี่ยวข้องกับ OpenGL

นอกจากไลบรารีหลักของ OpenGL แล้ว ยังมีไลบรารีที่เกี่ยวข้องอีกเป็นจำนวนมาก เพื่อจัดการกับงานเฉพาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไลบรารีที่เกี่ยวข้องกับ OpenGL และเป็นไลบรารีเฉพาะมีดังนี้

2.3.4.1 OpenGL Utilities (GLU)

OpenGL Utilities (GLU) เป็นไลบรารีที่ประกอบด้วยรูทีนมากมายในการจัดการมุมมองเพื่อแสดงรูปพื้นฐานและออบเจ็กต์ที่ซับซ้อนที่ประกอบขึ้นจากเส้นและรูปหลายเหลี่ยม, แสดงรูปลูกบาศก์ เป็นต้น ตัวอย่างการสร้างวัตถุพื้นฐาน เช่น ฟังก์ชันในการสร้างทรงกลม ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องทราบว่าทรงกลมสร้างได้อย่างไรแต่สามารถเรียกใช้

ฟังก์ชันได้เลย GLU นี้เป็นฟังก์ชันที่มีใน OpenGL อยู่แล้ว ซึ่งฟังก์ชัน GLU จะขึ้นต้นด้วยคำว่า glu เสมอ การเรียกใช้จะต้อง include ไฟล์ header ที่ชื่อ glu.h ในตอนต้นของโค้ดโปรแกรม

2.3.4.2 OpenGL Utility Toolkit (GLUT)

OpenGL Utility Toolkit (GLUT) คือไลราลีของระบบกราฟิกที่ช่วยในการติดต่อกับการแสดงผลทางจอภาพ ทั้งนี้เนื่องจากในการใช้งาน OpenGL เพื่อใช้งานด้านกราฟิก สิ่งแรกที่มีความจำเป็นต้องทำคือการกำหนดวินโดว์สำหรับการแสดงผล (display window) บนจอภาพ ซึ่งวินโดว์ดังกล่าวนี้คือพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าของจอภาพที่ใช้แสดงกราฟิก ซึ่งเราไม่อาจสร้างวินโดว์นี้ได้โดยตรงจากฟังก์ชันของ OpenGL เนื่องจากไลบรารีนี้ประกอบเพียงฟังก์ชันทางด้านกราฟิกที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ใดๆ นอกจากนี้การจัดการเกี่ยวกับวินโดว์ขึ้นอยู่กับคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานอยู่อีกด้วย อย่างไรก็ตามยังคงมีไลบรารีจำนวนหนึ่งที่สนับสนุนฟังก์ชันของ OpenGL สำหรับเครื่องที่แตกต่างกันไป ซึ่ง GLUT เป็นชุดเครื่องมือที่มีไลบรารีของฟังก์ชันสำหรับการใช้งานกับระบบวินโดว์ของจอภาพทั่วๆ ไป เนื่องจากการเขียนโปรแกรมโดยใช้ OpenGL มีความซับซ้อนน้อยลง เหมาะสำหรับการพัฒนาโปรแกรมขนาดเล็กถึงขนาดกลาง คำสั่งของ GLUT จะขึ้นต้นด้วยคำว่า glut เสมอ การเรียกใช้จะต้อง include ไฟล์ header ที่ชื่อ gult.h ในตอนต้นของโค้ดโปรแกรมเช่นกัน ถ้าในตอนต้นของโค้ดโปรแกรมเป็น glut.h แล้ว ไม่จำเป็นต้องใช้ gl.h และ glu.h อีก (ไพศาล โมลิสกุลมงคล, 2550)

2.4 กลศาสตร์การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์

กลศาสตร์การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์คือ การศึกษาการเคลื่อนไหว โดยวิเคราะห์จากตำแหน่งของหุ่นยนต์ ซึ่งจะคำนวณโดยปราศจากแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว การกำหนดให้แขนกลแต่ละส่วนมีความสัมพันธ์กับแต่ละเมตริกซ์ที่มีลักษณะเฉพาะและเชื่อมโยงไปสู่ข้อต่อต่างๆ ที่ได้รับผลกระทบ เรียกอีกอย่างว่ากลศาสตร์การเคลื่อนไหวโดยตรง มีการคำนวณตำแหน่งของจุดต่างๆ ในการทำงานของหุ่นยนต์ กลศาสตร์การเคลื่อนไหวหุ่นยนต์สามารถแบ่งได้เป็น กลศาสตร์การเคลื่อนไหวหุ่นยนต์แบบอนุกรม กลศาสตร์การเคลื่อนไหวหุ่นยนต์แบบขนาน กลศาสตร์การเคลื่อนไหวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ และกลศาสตร์การเคลื่อนไหวที่เลียนแบบมนุษย์

2.5 Transformation matrix

ในการออกแบบหุ่นยนต์ ต้องมีการกำหนดโครงร่างในแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ และในแต่ละวัตถุของหน่วยงาน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของโครงร่างเป็นแนวคิดพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองและการเขียนโปรแกรมของหุ่นยนต์ ซึ่งจะมีส่วนช่วยดังนี้

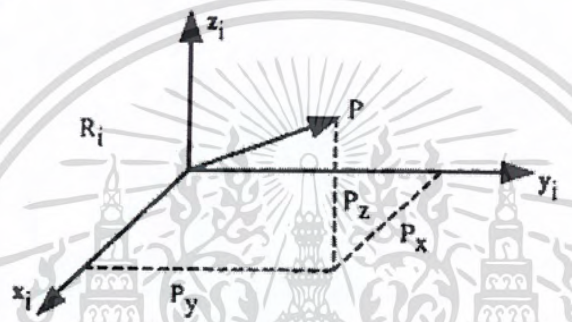
- คำนวณที่ตั้ง ตำแหน่ง และการกำหนดทิศทางของหุ่นยนต์
- อธิบายถึงตำแหน่งและการกำหนดทิศทางของหุ่นยนต์
- ระบุเส้นทางการเคลื่อนที่และความความเร็วของ End – effector ของหุ่นยนต์ สำหรับงานที่ต้องการ
- อธิบายและควบคุมแรง เมื่อหุ่นยนต์มีการตอบสนองกับสภาพแวดล้อม
- ดำเนินการควบคุมทางประสาทสัมผัสที่ใช้ โดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่างๆ และกรอบอ้างอิงของตัวมันเอง

2.5.1 พิกัดเดี่ยว (Homogeneous coordinates)

2.5.1.1 ตัวแทนของจุด (Representation of a point)

ให้ $({}^{i}P_x, {}^{i}P_y, {}^{i}P_z)$ เป็นพิกัดคาร์ทีเซียนของจุด P ในกรอบ R_i ซึ่งจากรูปที่ 2.7 ได้บอกถึงจุดกำเนิด O_i และแกน x_i, y_i, z_i พิกัดเดี่ยวของ P ในกรอบของ R_i ที่ถูกกำหนดด้วย $(w{}^{i}P_x, w{}^{i}P_y, w{}^{i}P_z, w)$ เมื่อ w คือ ปัจจัยการปรับขนาด (Scaling Factor) ในการออกแบบหุ่นยนต์จะให้ w มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นเราสามารถเขียนพิกัดของจุด P ได้ดังนี้

$$ {}^{i}P = \begin{bmatrix} {}^{i}P_x \\ {}^{i}P_y \\ {}^{i}P_z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1} $$



รูปที่ 2.7 ตัวแทนของเวคเตอร์ของจุด

2.5.1.2 ตัวแทนของทิศทาง (Representation of a direction)

ทิศทางของเวคเตอร์ใดๆ จะถูกแทนด้วยส่วนประกอบ 4 ส่วน ในส่วนที่สี่จะมีค่าเป็น 0 (ศูนย์) ซึ่งแสดงถึงเวคเตอร์ที่อินฟินิตี้ สมมติให้พิกัดคาร์ทีเซียนของหนึ่งหน่วยของเวคเตอร์ ในกรอบของ R_i เป็น $({}^{i}u_x, {}^{i}u_y, {}^{i}u_z)$ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$ {}^{i}u = \begin{bmatrix} {}^{i}u_x \\ {}^{i}u_y \\ {}^{i}u_z \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2} $$

2.5.1.3 ตัวแทนของระนาบ (Representation of a plane)

พิกัดเดี่ยวของระนาบ Q ซึ่งสมการในกรอบของ R_i เป็น ${}^{i}\alpha x + {}^{i}\beta y + {}^{i}\gamma z + {}^{i}\delta = 0$ ที่กำหนดโดย

$$ {}^{i}Q = [{}^{i}\alpha \quad {}^{i}\beta \quad {}^{i}\gamma \quad {}^{i}\delta] \tag{3} $$

ถ้าจุด P อยู่บนระนาบ Q แล้ว เมตริกซ์ของผลลัพธ์ของ ${}^{i}Q\,{}^{i}P$ มีค่าเท่ากับ 0 (ศูนย์)

$$ {}^{i}Q\,{}^{i}P = \begin{bmatrix} {}^{i}\alpha & {}^{i}\beta & {}^{i}\gamma & {}^{i}\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{i}P_x \\ {}^{i}P_y \\ {}^{i}P_z \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \qquad (4) $$

2.5.2 การเปลี่ยนแปลงเชิงเดี่ยว

2.5.2.1 การเปลี่ยนแปลงของกรอบ

การแทนที่ และ/หรือ การหมุนของกรอบ R_i ที่อยู่ในกรอบของ R_j ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งสามารถเขียนเป็นเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงเชิงเดี่ยว ${}^{i}T_j$ มิติ 4×4 ดังนี้

$$ {}^{i}T_j = \begin{bmatrix} {}^{i}s_j & {}^{i}n_j & {}^{i}a_j & {}^{i}P_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (5) $$

เมื่อ ${}^{i}s_j$, ${}^{i}n_j$ และ ${}^{i}a_j$ ถูกแทนค่าด้วยเวคเตอร์หนึ่งหน่วยตามแนวแกน x_j, y_j และ z_j ตามลำดับ ที่แสดงในกรอบ R_i และเมื่อ ${}^{i}P_j$ คือเวคเตอร์ที่เป็นตัวแทนของพิกัดของจุดกำเนิดของกรอบ R_j ที่แสดงในกรอบ R_i

รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของกรอบ

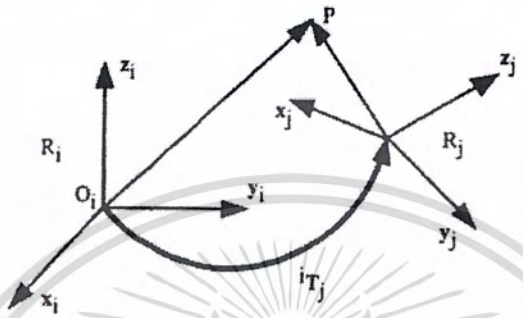
อีกทั้งยังสามารถกล่าวได้ว่าเมตริกซ์ ${}^{i}T_j$ กำหนดความสัมพันธ์ของกรอบ R_j กับกรอบ R_i หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงของเมตริกซ์ในสมการที่ 5 ในบางครั้งจะถูกเขียนเป็นรูปแบบของพาร์ติชันเมตริกซ์ ดังนี้

$$ {}^{i}T_j = \begin{bmatrix} & {}^{i}A_j & & {}^{i}P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{i}s_j & {}^{i}n_j & {}^{i}a_j & {}^{i}P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (6) $$

2.5.2.2 การเปลี่ยนแปลงของเวคเตอร์

ให้เวคเตอร์ ${}^{j}P$ เป็นพิกัดเดี่ยวของจุด P ในกรอบ R_j ดังรูปที่ 4 ดังนั้นพิกัดเดี่ยวของ P ในกรอบของ R_i สามารถเขียนได้เป็น

$$ {}^{i}P = {}^{i}(O_iP) = {}^{i}s_j{}^{j}P_x + {}^{i}n_j{}^{j}P_y + {}^{i}a_j{}^{j}P_z + {}^{i}P_j = {}^{i}T_j{}^{j}P \qquad (7) $$

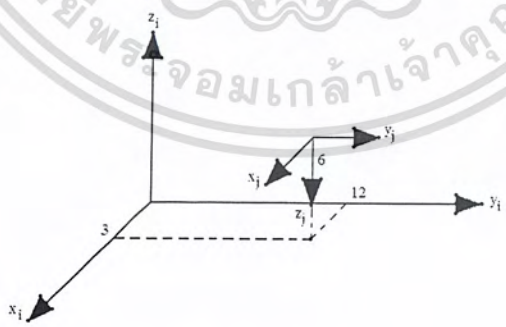


รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของเวคเตอร์

ดังนั้นเมตริกซ์ ${}^{i}T_j$ ช่วยให้เราสามารถคำนวณพิกัดของเวคเตอร์ในกรอบ R_i ในเทอมของพิกัดในกรอบ R_j

ตัวอย่างที่ 1 สมมติให้เมตริกซ์ ${}^{i}T_j$ และ ${}^{j}T_i$ จากรูปที่ 2.10 ใช้สมการที่ 5 จะได้เป็น

$$ {}^{i}T_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 0 & 12 \\ -1 & 0 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^{j}T_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 6 \\ 0 & 1 & 0 & -12 \\ 1 & 0 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างที่ 1

2.5.2.3 การเปลี่ยนแปลงของระนาบ

ตำแหน่งความสัมพันธ์ของจุดที่เกี่ยวกับระนาบจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากการนำไปใช้ของเซต {point, plane} ดังนั้น

$$^{j}Q\,^{j}P = {}^{i}Q\,^{i}P = {}^{i}Q\,^{i}T_{j}\,^{j}P$$

จะได้

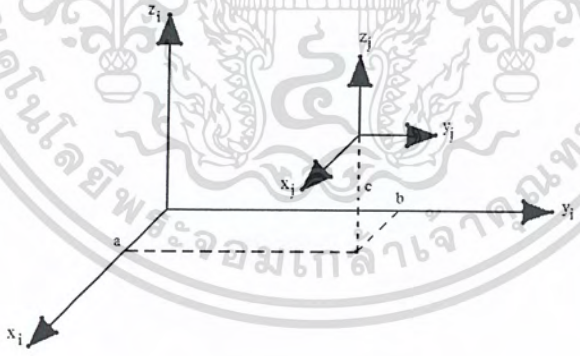
$$^{j}Q = {}^{i}Q\,^{i}T_{j} \tag{8}$$

2.5.3 การเปลี่ยนแปลงเมตริกซ์ของการย้ายแบบ pure

ให้ **Trans**(a, b, c) เป็นการเปลี่ยนแปลงชนิดข้างต้น เมื่อ a, b และ c แสดงถึงการย้ายตามแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของ **Trans**(a, b, c) จะแสดงดังรูปที่ 2.11

$$^{i}T_{j} = \mathbf{Trans}(a,b,c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

ต่อจากนี้ เรายังคงใช้สัญลักษณ์ **Trans**(u, d) ในการแสดงการย้ายตามแกน u โดยค่า d ดังนั้นเมตริกซ์ **Trans**(a, b, c) สามารถแตกออกเป็นเมตริกซ์ 3 ส่วน คือ **Trans**(x, a) **Trans**(y, b) **Trans**(z, c) ซึ่งใช้ในการคูณใดๆ



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงของการย้ายแบบ pure

2.5.4 การแปลงเมตริกซ์ของการหมุนของแกน

2.5.4.1 การแปลงเมตริกซ์ของการหมุนของแกน x ด้วยมุม θ

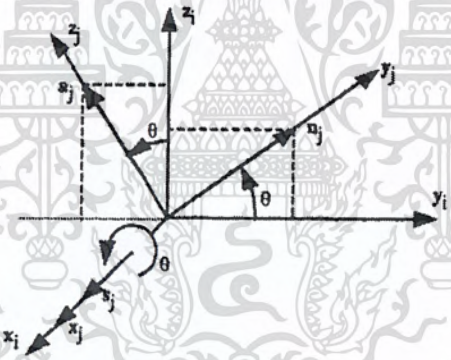
ให้ **Rot**(x, θ) เป็นการเปลี่ยนแปลงชนิดข้างต้น จากรูปที่ 2.12 เราสมมติว่าส่วนประกอบของเวคเตอร์ ${}^{i}s_j$, ${}^{i}n_j$, ${}^{i}a_j$ ขนาดหนึ่งหน่วย ตามแนวแกน x_j, y_j, z_j ของกรอบ R_j ที่แสดงในกรอบ R_i มีดังต่อไปนี้

$$\begin{cases} {}^{i}s_j = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \\ {}^{i}n_j = [0 \quad C\theta \quad S\theta \quad 0]^T \\ {}^{i}a_j = [0 \quad -S\theta \quad C\theta \quad 0]^T \end{cases} \tag{10}$$

เมื่อ Sθ และ Cθ คือ sin(θ) และ cos (θ) ตามลำดับ และ ตัวยก T เป็นการทรานสโพสของเวคเตอร์

$${}^{i}T_j = \mathbf{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta & 0 \\ 0 & S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & \mathbf{rot}(x, \theta) & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

เมื่อ **rot**(x, θ) เป็นเมตริกซ์ มิติ 3×3



รูปที่ 2.12 การแปลงของการหมุนของแกน x

2.5.4.2 การแปลงเมตริกซ์ของการหมุนของแกน y ด้วยมุม θ

ด้วยวิธีเดียวกับแกน x จะได้เป็น

$${}^{i}T_j = \mathbf{Rot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} C\theta & 0 & S\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & \mathbf{rot}(y, \theta) & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

2.5.4.3 การแปลงเมตริกซ์ของการหมุนของแกน z ด้วยมุม θ

ด้วยวิธีเดียวกับแกน x จะได้เป็น

$$ {}^{i}T_{j} = \mathbf{Rot}(z,\theta) = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 & 0 \\ s\theta & C\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & \mathbf{rot}(z,\theta) & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13) $$

(Khali and Dombre,2002)

2.6 Ply file format

Ply file format (Polygon File Format) เป็นรูปแบบการเก็บข้อมูลสามมิติ โดยในวัตถุหนึ่งจะเป็นความสัมพันธ์ของโครงตาข่ายรูปสามเหลี่ยม ซึ่งข้อมูลดังกล่าวประกอบด้วยส่วนของ Header ตามด้วยส่วนของจุดยอด และส่วนของรูปหลายเหลี่ยม ส่วนของ header จะระบุจำนวนพิกัด และจำนวนระนาบของโครงตาข่ายรูปสามเหลี่ยม และยังบอกถึงคุณสมบัติของแต่ละจุดยอด เช่น พิกัด x, y, z จากนั้นสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อแสดงรูปทรงสามมิติใน OpenGL Library (Georgia Institute of Technology) ตัวอย่าง Ply file format มีดังนี้

```
ply
format ascii 1.0
comment VCGLIB generated
element vertex 76
property float x
property float y
property float z
element face 148
property list uchar int vertex_indices
end_header
-65.25 0 -4.7
65.25 0 -4.7
-65.25 0.39859 -4.6830681
65.25 0.39859 -4.6830681
        :
65.25 1.1843 -4.548345
```

ในส่วนนี้เป็นการบอกข้อมูลของรูปทรงที่ทำการแปลงไฟล์เป็น PLY ได้แก่ จำนวนพิกัด โดยแบ่งเป็น x, y และ z และจำนวนระนาบ

ในส่วนนี้เป็นการแสดงให้เห็นว่า มีตัวเลข 3 กลุ่ม มีการเรียงเป็น x y z ตามลำดับ

3 67 0 1
3 1 0 3
3 0 2 3
3 3 2 66
:
3 3 66 4

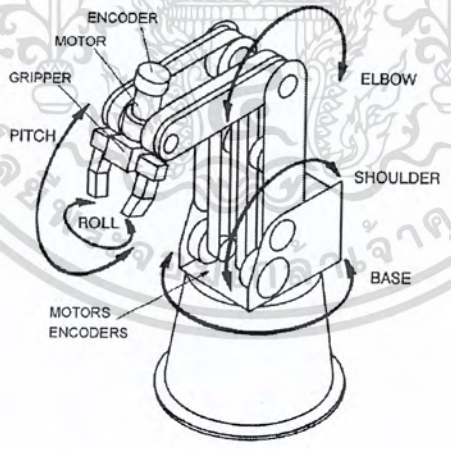
ในส่วนนี้เป็นการแสดงให้เห็นว่า
ตัวเลข 4 กลุ่ม กลุ่มแรกคือ เลข 3
หมายความว่า เป็นรูปสามเหลี่ยมที่มี
จุดทั้งสามตัวหลังเป็นจุดมุม

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

การออกแบบและสร้างโปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกล มีขั้นตอนที่สำคัญคือ ศึกษาแขนกลรุ่น SCORBOT-ER 4u การสร้างแบบสามมิติและการเก็บข้อมูลของแขนกล และการออกแบบโปรแกรม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ศึกษาแขนกลรุ่น SCORBOT-ER 4u

SCORBOT – ER 4u เป็นหุ่นยนต์ ชนิด Articulated Arm (Revolute) สำหรับการใช้ในการศึกษาหุ่นยนต์ ที่สามารถติดตั้งบนฐานได้ ซึ่งความเร็วและการทำซ้ำของหุ่นยนต์นั้น เหมาะสำหรับการทำงานเฉพาะและรวมการใช้งาน workcell อัตโนมัติ เช่น หุ่นยนต์ที่ใช้เชื่อม เครื่อง CNC และการดำเนินงานอื่นๆ โดยใช้โปรแกรม SCORBASE ในการควบคุม SCORBOT – ER 4u แบบครบวงจร จากนั้นทำการวัดขนาดจากแขนกลจริง เพื่อใช้ในการเขียนแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks และศึกษาของเขตการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยแต่ละแกนและขอบเขตการเคลื่อนที่จะแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แขนกลรุ่น SCORBOT – ER 4u

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของแขนกล

ลักษณะเชิงกล	โครงสร้างแนวตั้งแบบข้อต่อ โครงร่างแบบเปิด
องศาความเป็นอิสระ	มี 5 แกน และ gripper ที่สามารถหมุนได้
รับน้ำหนักได้	2.1 kg (4.6 lb)
ช่วงแกน	
แกนที่ 1:	Base หมุนได้ 310°
แกนที่ 2:	Shoulder หมุนได้ 130°/ -35°
แกนที่ 3:	Elbow หมุนได้ 130°
แกนที่ 4:	Wrist (ข้อมือ) มีองศากวาด (Pitch) เท่ากับ 130°
แกนที่ 5:	หมุนข้อต่อ (ROLL) Wrist ± 570
ระยะยืดจาก gripper	610 mm (24")
ความเร็ว	700 mm/s (27.6 inch/sec)
การทำซ้ำ	± 0.18 mm (0.007 inch)
การกลับไปยังตำแหน่งเดิม	การอ่านตำแหน่ง แบบที่บวกเพิ่มจากตำแหน่งเดิม
Gripper Jaw เปิด	0 - 65/75 mm (2.6"/ 3") ทั้งที่มีและไม่มีชิ้นงาน
ตัวส่งกำลัง	เฟือง สายพาน สกรู
น้ำหนัก	10.8 kg (23.8 lb)

3.2 การสร้างแบบสามมิติและเก็บข้อมูลของแขนกล

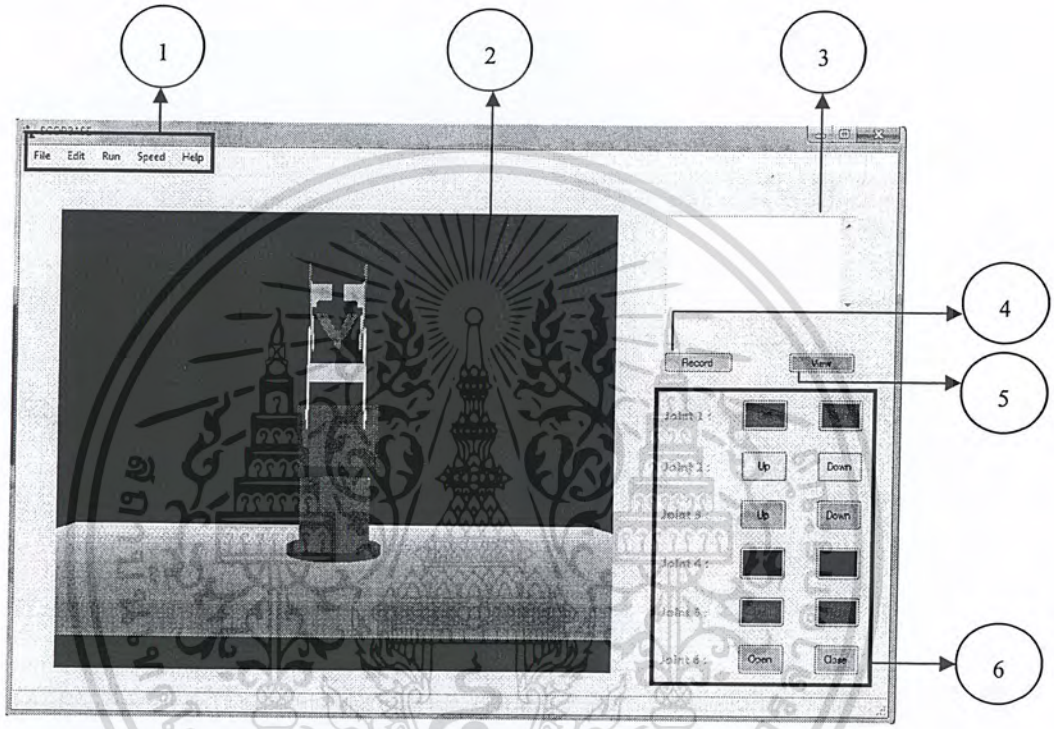
เมื่อวัดขนาดต่างๆ ของแขนกลแล้ว นำไปเขียนแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks แล้วแปลงให้เป็นไฟล์ PLY เพื่อให้เป็นโครงร่างตาข่ายรูปสามเหลี่ยม ในขั้นตอนนี้จะทราบพิกัดและระนาบของรูปสามเหลี่ยมที่ประกอบกันเป็นรูปทรงสามมิติของแต่ละชิ้นส่วน

ทางผู้จัดทำได้วัดส่วนประกอบของแขนกล SCORBOT – ER 4u ทั้งหมด 12 ชิ้น คือ Base1, Cover3, Lower Arm, Upper Arm, Bar, Tee, Grip01, Grip02, Grip03, Grip04, Grip Left และ Grip Right ดังรูปที่ 4.1

3.3 การออกแบบโปรแกรม

3.3.1 ออกแบบส่วนของ User Interface

ขณะที่เปิดโปรแกรมขึ้นมา หน้าจอจะแสดง User Interface ที่พร้อมสำหรับการใช้งาน รวมไปถึงรูปสามมิติของแขนกลที่อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น (Home position) ซึ่งเกิดจากการสร้างรูปสามมิติทันทีที่เปิดโปรแกรม โดย User Interface ประกอบไปด้วยปุ่มควบคุมการเคลื่อนที่ หน้าต่างบันทึกตำแหน่งที่เปลี่ยนไป และเรียกดูการเคลื่อนที่จากคำสั่งทั้งหมดได้ ส่วนประกอบของหน้าจอ User Interface แสดงดังรูปที่ 3.2

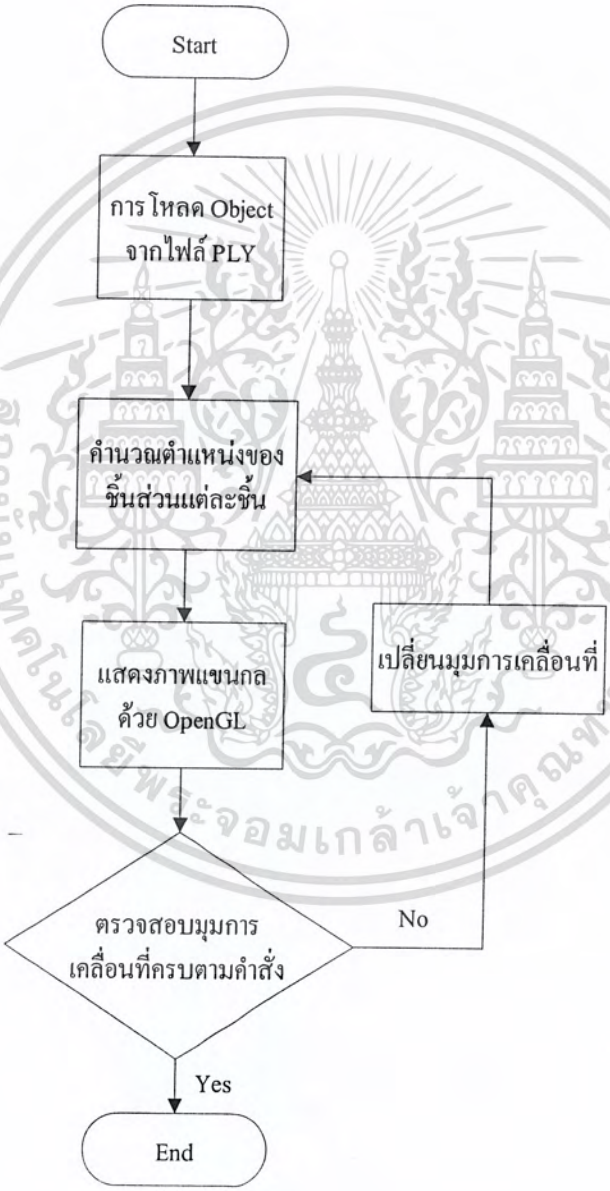


รูปที่ 3.2 User Interface

1. แถบเมนู เป็นส่วนที่เก็บคำสั่งทั้งหมดของโปรแกรม เช่นการบันทึกไฟล์ สั่งรันโปรแกรม และกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนกล
2. OpenGLControl เป็นส่วนที่แสดงภาพเคลื่อนไหวของแขนกล
3. หน้าต่างบันทึกตำแหน่ง เป็นส่วนที่แสดงตำแหน่งที่เปลี่ยนไปของการบันทึกแต่ละครั้ง
4. ปุ่มบันทึกคำสั่ง เป็นปุ่มที่ทำให้เกิดการจดจำตำแหน่งโดยจะแสดงอยู่ในหน้าต่างบันทึกตำแหน่ง
5. ปุ่มเลือกมุมมอง เป็นปุ่มที่ใช้เลือกมุมมองของแขนกลไม่ว่าจะเป็นด้านหน้า ด้านข้างหรือด้านหลัง
6. ปุ่มควบคุมแขนกล เป็นปุ่มที่ใช้ในการควบคุมแขนกล แบ่งออกเป็น 6 Joints

3.3.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

การทำงานของโปรแกรม เริ่มจากการโหลดข้อมูลจากไฟล์ PLY มาเก็บไว้ในออบเจ็กต์ที่สร้างไว้ และคำนวณตำแหน่งของแต่ละชิ้นส่วนว่าอยู่ตำแหน่งใดของแขนกล โดยเรียงลำดับจากชิ้นส่วนที่อยู่ด้านปลายของแขนกลลงมาที่ฐานของแขนกล จากนั้นจึงแสดงภาพโดยการนำจุดแต่ละจุดมาต่อกันเป็นระนาบสามเหลี่ยมและนำระนาบสามเหลี่ยมมาต่อกันเป็นภาพสามมิติ ในการแสดงภาพเคลื่อนไหว โปรแกรมจะตรวจสอบมุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแต่ละชิ้นและทำการแบ่งมุมการเคลื่อนที่ออกเป็นช่วงเล็กๆ เพื่อให้ภาพเคลื่อนไหวที่ได้มีความต่อเนื่อง ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรม

3.3.3 เขียนฟังก์ชันการทำงานในส่วนต่างๆ

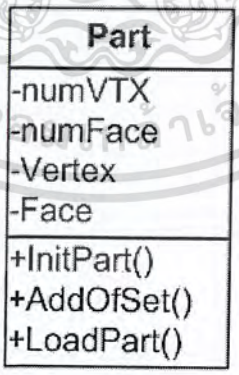
โปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกลมีฟังก์ชันการดึงข้อมูล เพื่อดึงข้อมูลไฟล์ PLY มาเก็บไว้ในออบเจ็กต์ ฟังก์ชันการคำนวณตำแหน่งของแขนกล เพื่อคำนวณตำแหน่งของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นก่อนการเคลื่อนที่ ฟังก์ชันการคำนวณการเคลื่อนที่ของแขนกล เพื่อคำนวณการเคลื่อนที่โดยการนำพิกัดคูณกับทรานฟอเมชันเมตริกซ์ ฟังก์ชันการเพิ่มความเร็ว เพื่อเพิ่มหรือลดความเร็วในการเคลื่อนไหว ฟังก์ชันการแสดงภาพการเคลื่อนไหว โดยแบ่งภาพการเคลื่อนไหวเป็น 150 ภาพต่อคำสั่ง เพื่อใช้ภาพเคลื่อนไหวมีความต่อเนื่อง และฟังก์ชันการเปิดหรือบันทึกข้อมูล เพื่อเก็บข้อมูลตำแหน่งการเคลื่อนไหวที่ต้องการ หรือเปิดคำสั่งที่ได้บันทึกไว้

เมื่อสามารถแสดงรูปสามมิติได้แล้ว ในส่วนการควบคุมเช่น คำสั่งที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของแขนกลจะต้องสามารถคำนวณตำแหน่งที่แขนกลเคลื่อนที่ไปซึ่งใช้สำหรับการแสดงภาพสามมิติ คำสั่งที่ใช้สำหรับการเก็บค่าตำแหน่งเป็นลำดับ เพื่อนำค่าตำแหน่งที่ได้ไปแสดงภาพสามมิติของขั้นตอนการทำงานอย่างเป็นลำดับ

3.3.3.1 การสร้างออบเจ็กต์จากไฟล์ PLY

การสร้างออบเจ็กต์ของชิ้นส่วนแขนกลสามารถทำได้ โดยการโหลดข้อมูลตำแหน่งและพื้นผิวของแต่ละชิ้นส่วนจากไฟล์ PLY โดยใช้ Part ซึ่งเป็นคลาสที่ใช้เก็บคุณสมบัติต่างๆ ของชิ้นส่วน ได้แก่ ค่าพิกัด (Vertex) พื้นผิว (Face) จำนวนพิกัด (numVTX) จำนวนพื้นผิว (numFace) และตำแหน่งของชิ้นส่วนนั้น (EndCo) ซึ่งมีค่าเป็น Vertex, Face, numVTX, numFace, EndCo และมีเมธอดที่ใช้สร้างออบเจ็กต์เริ่มต้นตำแหน่งของชิ้นส่วน (InitPart ()) และจัดข้อมูลของชิ้นส่วนลงในอาร์เรย์ (Array) ซึ่งมีค่าเป็น

- InitPart() ทำหน้าที่สร้างออบเจ็กต์เริ่มต้นตำแหน่งของชิ้นส่วน
- AddOfSet() ทำหน้าที่เก็บตำแหน่งของชิ้นส่วน
- LoadPart() ทำหน้าที่เก็บค่าพิกัด และพื้นผิวของชิ้นส่วน



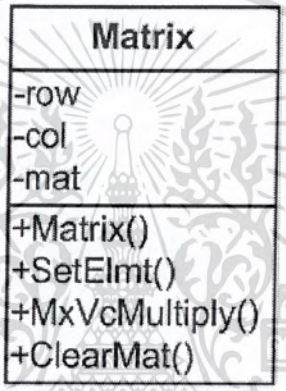
รูปที่ 3.4 คลาสของ Part

ออบเจ็กต์แต่ละชิ้นมีคุณสมบัติและหน้าที่เหมือนกัน โดยจะใช้ Coordinate เป็นโครงสร้างของการเก็บค่าพิกัดและพื้นผิว ในการสร้างแขนกลจึงเป็นการนำออบเจ็กต์ของแต่ละชิ้นส่วนมาเรียงต่อกัน

3.3.3.2 การคำนวณตำแหน่งชิ้นส่วนแต่ละชิ้น

การคำนวณตำแหน่งของแขนกลเริ่มจากการรับข้อมูลตำแหน่งจากผู้ใช้ ส่งข้อมูลไปยังฟังก์ชันการคำนวณ และมุมที่เปลี่ยนไปจะถูกคำนวณโดยใช้ทรานฟอร์เมชันเมตริกซ์ เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแขนกล หลังจากนั้นจึงสั่งให้ฟังก์ชันการแสดงภาพแสดงการเคลื่อนไหว ซึ่งมีคุณสมบัติเก็บค่าจำนวนแถว (row) จำนวนหลัก (col) และค่าต่างๆ และมีเมธอดต่างๆ ดังนี้

- Matrix() ทำหน้าที่สร้างเมตริกซ์ขึ้นมา
- SetElmt() ทำหน้าที่กำหนดค่าในเมตริกซ์
- MxVcMultiply() หน้าที่นำเมตริกซ์คูณกับเวคเตอร์
- ClearMat() ทำหน้าที่กำจัดเมตริกซ์ที่ใช้เรียบร้อยแล้วให้เป็นเมตริกซ์ศูนย์



รูปที่ 3.5 คลาสของเมตริกซ์

$[x, y, z]^T$ = ตำแหน่งพิกัดเดิม

$[x', y', z']^T$ = ตำแหน่งพิกัดใหม่

การหมุนรอบแกน x

$$[\mathrm{rot}(x, \theta)]\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (14)$$

การหมุนรอบแกน y

$$[\mathrm{rot}(y, \theta)]\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (15)$$

การหมุนรอบแกน z

$$[\mathrm{rot}(z,\theta)]\begin{bmatrix}x\\y\\z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x'\\y'\\z'\end{bmatrix} \quad (16)$$

ให้ θ เป็นอินพุต โดยการรับค่าจากการกดปุ่ม ซึ่งการกดปุ่ม UP 1 ครั้ง จะบวกมุมไป 10 องศา และการกด Down 1 ครั้ง จะลบมุมไป 10 องศา จากนั้นเมื่อคำนวณเสร็จ จะนำค่า x', y', z' ที่ได้ไปแสดงภาพ

การหาตำแหน่งของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นทำได้โดยการนำพิกัดที่ระบุตำแหน่งของชิ้นส่วนมารวมกัน เช่น ถ้าต้องการต่อ Cover3 กับ Base1 พิกัดที่บอกตำแหน่งว่า Cover3 กับ Base1 ต่อกันตำแหน่งไหน จะอยู่ที่ Base1 ซึ่งเป็นตัวฐานของ Cover3 ส่วนการขยับแขนกลที่ต่อกันเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะมีการคำนวณใหม่ทุกครั้งก่อนที่จะแสดงภาพ

3.3.4 การใช้ OpenGL ในการแสดงภาพการเคลื่อนไหวของแขนกล

ในส่วนนี้จะเป็นการนำผลจากการคำนวณในส่วนฟังก์ชันการทำงานมาสร้างรูปสามมิติที่แสดงตำแหน่งปัจจุบันขณะที่มีการควบคุม และค่าตำแหน่ง ซึ่งเก็บเป็นลำดับมาแสดงภาพสามมิติเป็นขั้นตอน โดยใช้ OpenGL ในการแสดงภาพสามมิติ และการเคลื่อนที่ของแขนกล

การแสดงภาพเกิดจากการนำออบเจ็กต์ของแขนกล ซึ่งเกิดจากการนำตำแหน่งทุกจุดของแขนกลมาสร้างระนาบสามเหลี่ยมต่อกันบน OpenGLControl หรือฉากสีดำ โดยภาพที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงภาพเป็นท่าเริ่มต้น จากนั้นจะเป็นการแสดงภาพการเคลื่อนที่ โดยตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงไปจะถูกคำนวณแล้วนำมาแสดงใหม่ แล้วลบภาพก่อนหน้านั้นออก ทำอย่างนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ ก็จะเกิดเป็นการเคลื่อนไหวของแขนกล

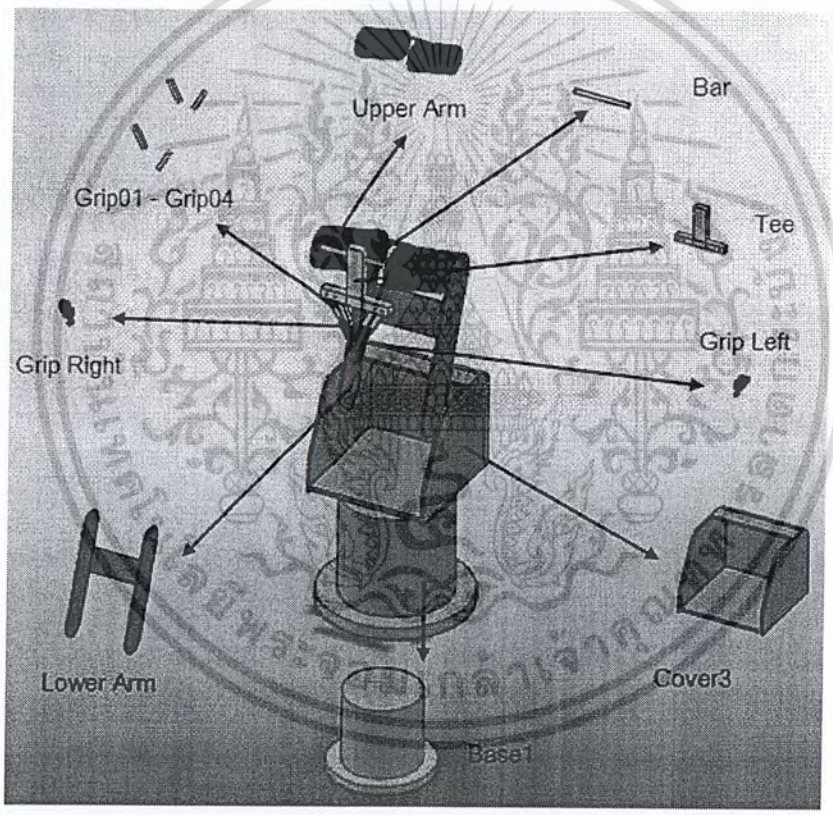
3.3.4.1 การกำหนดสี แสง ตำแหน่งและมุมมองของแขนกล

การกำหนดสีของแต่ชิ้นส่วน ทำเพื่อช่วยให้ง่ายต่อการควบคุม โดยกำหนดให้ชิ้นส่วนที่ขยับต่างกันมีสีต่างกัน เช่น ให้ Cover3 มีสีม่วง แต่ให้ Lower Arm มีสีเหลือง เพราะการเคลื่อนที่เป็นคนละทิศทางกัน ส่วนการกำหนดแสง ทำเพื่อให้เห็นรูปลักษณ์ของแขนกลเป็นแบบ 3 มิติ และให้เข้าใจง่ายต่อการมองแขนกลขณะเคลื่อนที่ โดยจะกำหนดให้แสงฉายจากด้านบนของแขนกล เพื่อให้เห็นภาพโดยรวม และเกิดเงาน้อยที่สุด และการกำหนดตำแหน่งและมุมมองของแขนกลทำเพื่อให้สามารถมองเห็นแขนกลในทิศทางอื่นได้ แม้ว่าจะเป็นการทำงานแบบเดียวกัน เช่น ต้องการดูการเคลื่อนที่จากด้านหลังของแขนกล เป็นต้น สามารถทำได้โดยการกดปุ่ม View เพื่อเปลี่ยนมุมมอง

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

4.1 การสร้างแบบสามมิติ

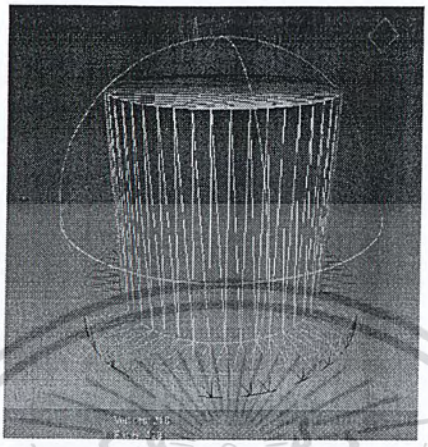
ข้อมูลที่ได้จากการวัดขนาดของแขนกลจะถูกนำไปเขียนแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks รูปที่ 4.1 แสดงถึงส่วนประกอบหลักของแขนกล



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของแขนกลที่เขียนด้วยโปรแกรม SolidWorks

4.2 การเก็บข้อมูลของแขนกล

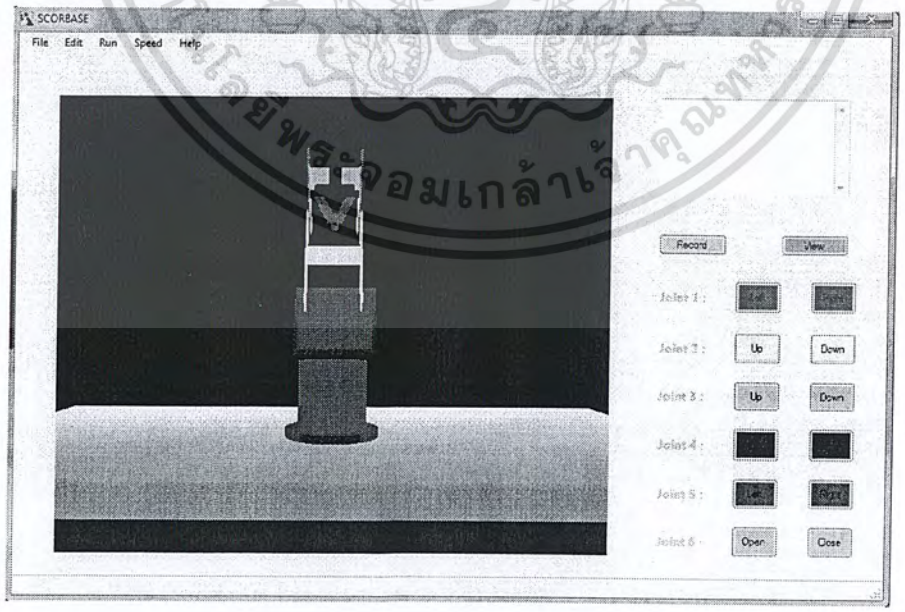
เมื่อวาดส่วนประกอบของแขนกลด้วยด้วยโปรแกรม SolidWorks แล้วแปลงเป็นไฟล์ PLY ซึ่งส่วนประกอบจะกลายเป็นโครงร่างตาข่ายรูปสามเหลี่ยม ยกตัวอย่างส่วนประกอบของแขนกลดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบ base ของแขนกล ที่เป็นโครงร่างตาข่ายรูปสามเหลี่ยม

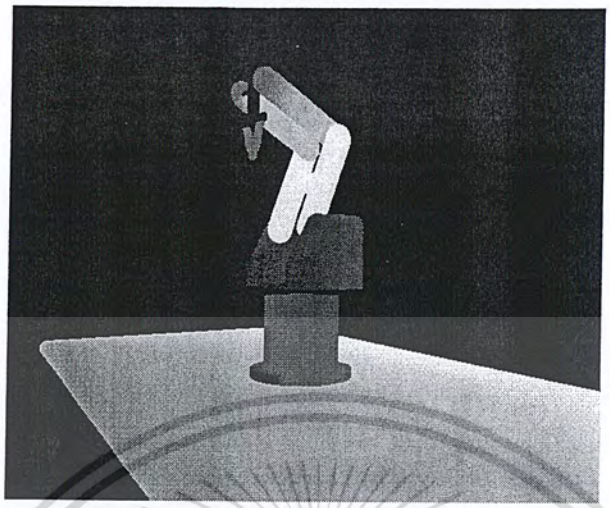
4.3 โปรแกรมจำลองแขนกล

เมื่อเขียนโปรแกรมเสร็จแล้ว หน้าต่างโปรแกรมจะแสดงการจำลองแขนกลในตำแหน่งเริ่มต้น (Home position) ดังรูปที่ 4.3 ในส่วนของโค้ด (Source code) ของโปรแกรม ผู้จัดทำได้แสดงไว้ในภาคผนวกของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้



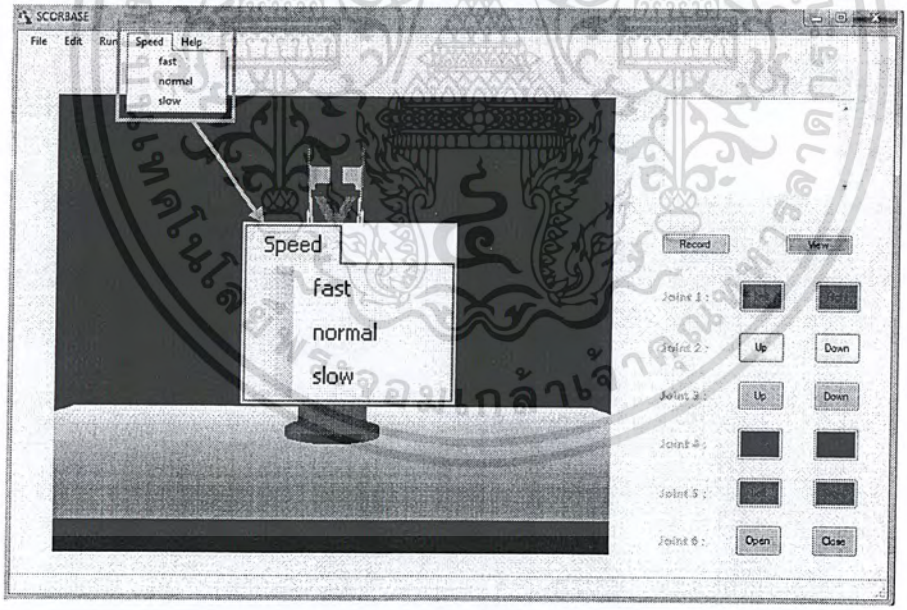
รูปที่ 4.3 โปรแกรมจำลองแขนกล

การเปลี่ยนมุมมองของการจำลอง โดยการกดปุ่ม View ดังรูปที่ 4.4



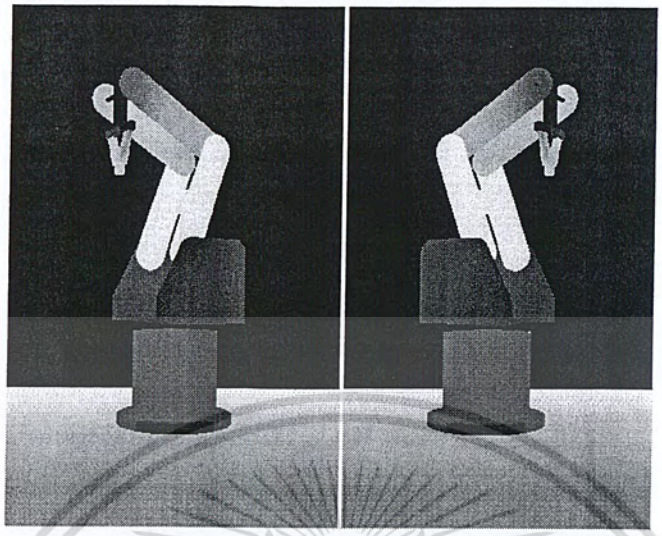
รูปที่ 4.4 แสดงมุมมองที่เปลี่ยนไปเมื่อกดปุ่ม View

การปรับความเร็วของการจำลอง ซึ่งมีให้เลือก 3 ระดับ นั่นคือ fast, Normal และ slow ดังแสดงในรูปที่ 4.5

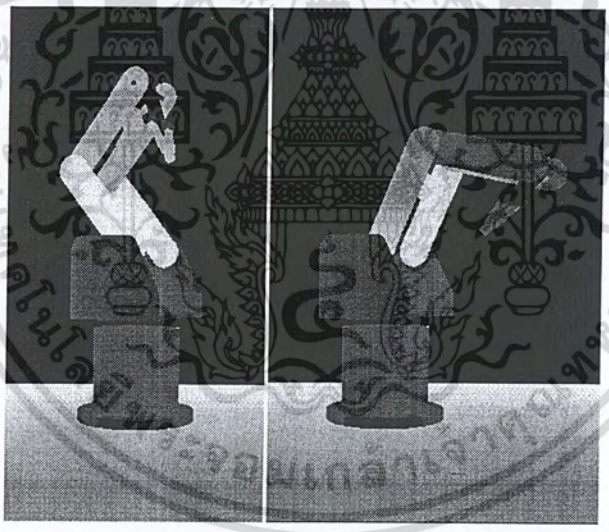


รูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนการเลือกความเร็ว

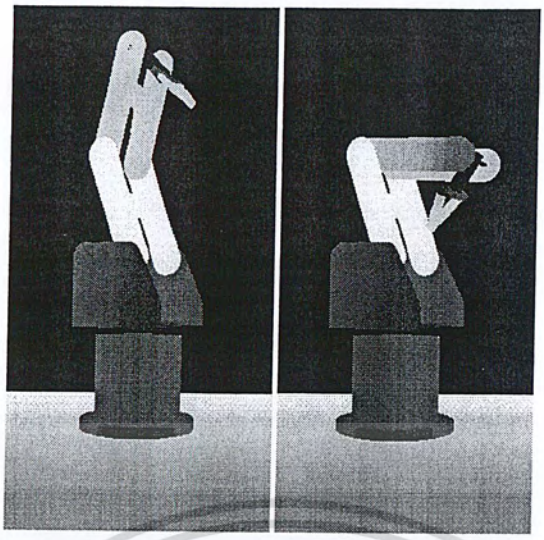
หรือกดปุ่มต่างๆ เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ ดังรูปที่ 4.6 – 4.11



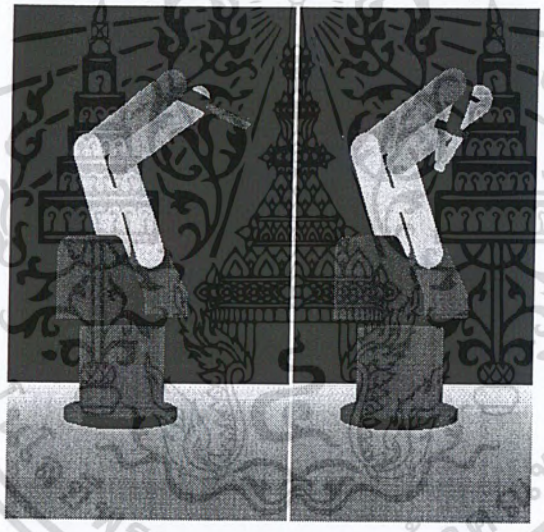
รูปที่ 4.6 แสดงภาพเมื่อกดปุ่ม Left และ Right ตามลำดับ ที่ Joint 1



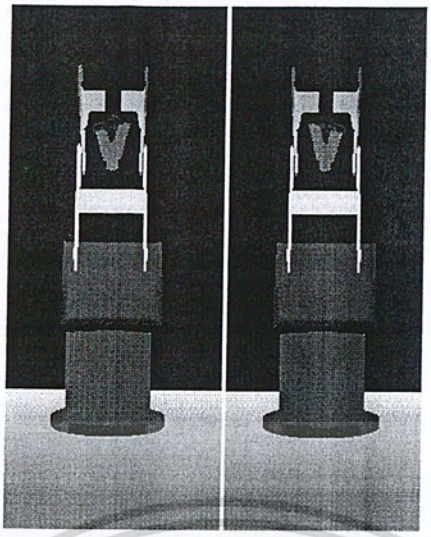
รูปที่ 4.7 แสดงภาพเมื่อกดปุ่ม Up และ Down ตามลำดับ ที่ Joint 2



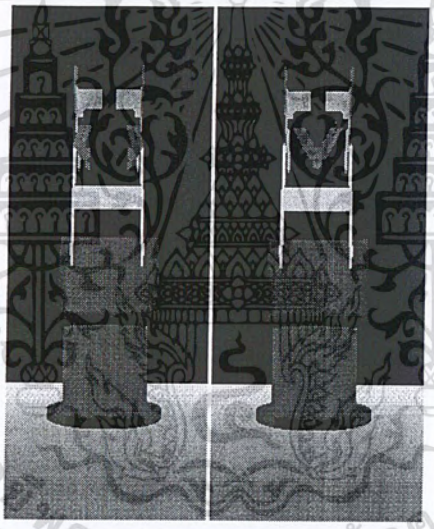
รูปที่ 4.8 แสดงภาพเมื่อกดปุ่ม Up และ Down ตามลำดับ ที่ Joint 3



รูปที่ 4.9 แสดงภาพเมื่อกดปุ่ม Up และ Down ตามลำดับ ที่ Joint 4

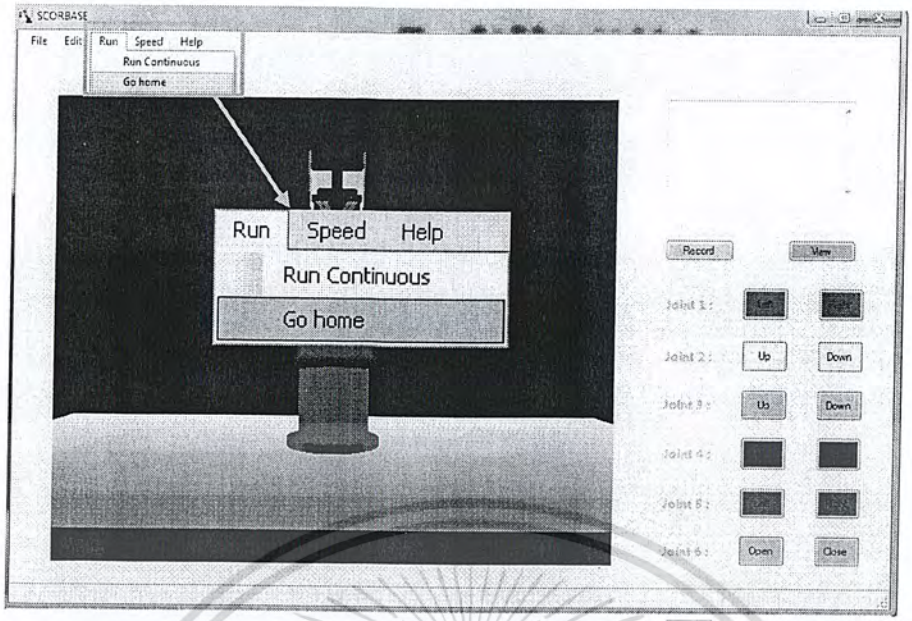


รูปที่ 4.10 แสดงภาพเมื่อกดปุ่ม Left และ Right ตามลำดับ ที่ Joint 5

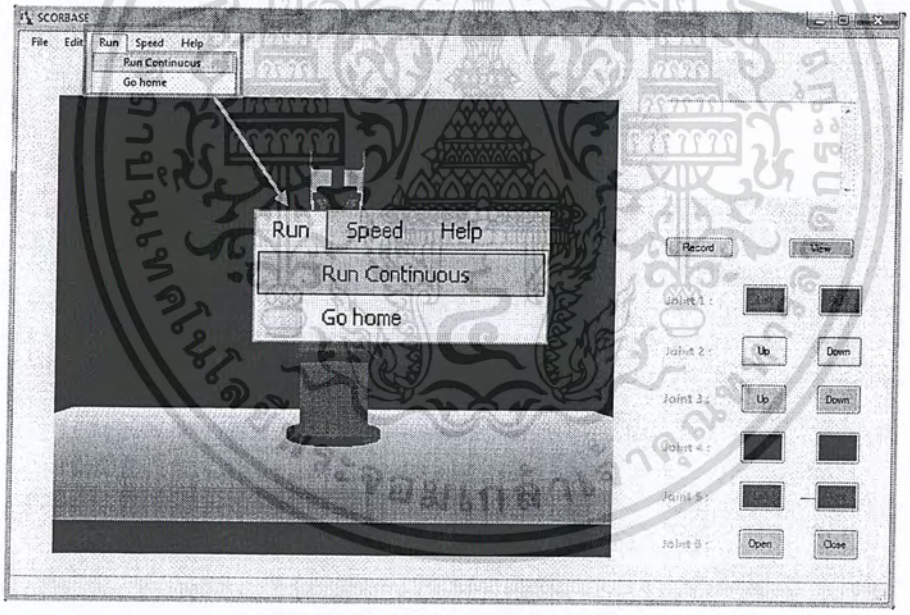


รูปที่ 4.11 แสดงภาพเมื่อกดปุ่ม Open และ Close ตามลำดับ ที่ Joint 6

การบันทึกตำแหน่งการเคลื่อนไหวของแขนกล เพื่อเรียกดูภายหลัง สามารถทำได้โดยกดปุ่ม Go home เพื่อกลับมายังท่าเริ่มต้น และกดปุ่ม Run Continuous เพื่อให้โปรแกรมเริ่มแสดงการเคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่ได้บันทึกไว้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 และ 4.13

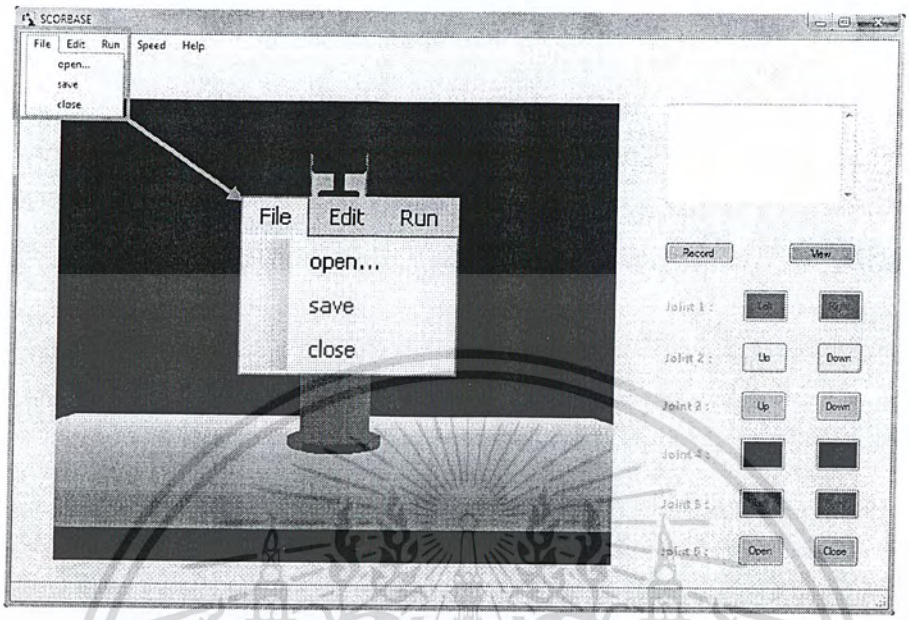


รูปที่ 4.12 แสดงขั้นตอนการเลือกตำแหน่งเริ่มต้น



รูปที่ 4.13 แสดงขั้นตอนการเรียกดูการเคลื่อนไหวทั้งหมดของแขนกล

วิธีการบันทึกตำแหน่งเป็นไฟล์ข้อมูล สามารถทำได้โดยการกด File เลือก save จะได้ไฟล์ข้อมูลเป็น .txt จะได้ชุดคำสั่งที่สามารถเรียกดูในภายหลังได้ โดยกดปุ่ม open เพื่อเรียกดูชุดคำสั่งดังกล่าว ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงขั้นตอนการบันทึกและเปิดไฟล์

บทที่ 5
สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อสร้างโปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกล เพื่อใช้ในการเรียนรู้การทำงานของแขนกลเบื้องต้น โดยการเขียนโปรแกรมการจำลองการทำงานของแขนกลรุ่น SCORBOT-ER 4u เริ่มจากการวัดขนาดของแขนกลแต่ละชิ้นส่วน นำขนาดดังกล่าวมาเขียนแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks และแปลงเป็นไฟล์ PLY เพื่อทราบจำนวนจุดและจำนวนระนาบของรูปทรงต่างๆ และศึกษาการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ, Visual C#, OpenGL Library, Transformation matrix และข้อมูลจำเพาะของแขนกลในแต่ละชิ้นส่วน โดยนำจำนวนพิกัดและระนาบที่ทราบจากไฟล์ PLY มาแสดงเป็นภาพสามมิติของชิ้นส่วนทั้งหมดที่ประกอบเข้าด้วยกันจนเป็นแขนกล โดยรับคำสั่งการเคลื่อนที่ในแต่ละชิ้นส่วนจากผู้ใช้มาประมวลผลและแสดงเป็นภาพเคลื่อนไหวสามมิติ

5.1.1 ผลที่ได้รับ

โปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกลที่สร้างขึ้นสามารถรับคำสั่งจากผู้ใช้ และบันทึกคำสั่งได้ 100 คำสั่ง พร้อมทั้งเรียกดูการทำงานตั้งแต่คำสั่งแรกโดยเริ่มจากท่าเริ่มต้น (Home position) เป็นโปรแกรมที่สามารถเพิ่มทักษะการใช้แขนกลรุ่น SCORBOT – ER 4u เพื่อลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากผู้ใช้งานแขนกลที่ขาดประสบการณ์ ลดเวลาในการศึกษาแขนกลเข้าใจลักษณะและข้อมูลจำเพาะในข้อต่อต่างๆ ของแขนกล โดยโปรแกรมดังกล่าวสามารถใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการนำโปรแกรมดังกล่าวไปทดลองใช้งานจริงกับผู้ที่สนใจหรือนักศึกษาเพื่อประเมินประสิทธิภาพของโปรแกรมและปรับปรุงในโอกาสต่อไป และเพื่อความง่ายในการใช้งาน ผู้ใช้งานควรศึกษาคู่มือก่อนใช้งานจริง โปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกลที่สร้างขึ้นเป็นเพียงการจำลองการเคลื่อนไหวของแขนกลเท่านั้น สิ่งที่ควรเพิ่มเติม คือ การสร้างสภาพแวดล้อมของแขนกล เช่น บริเวณที่ปฏิบัติงาน อุปกรณ์เสริม ชิ้นงานที่เกี่ยวข้อง มุมมองภาพในอิริยาบถต่างๆ ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยง่าย เช่น การเลื่อนเมาส์ การเคลื่อนไหวแบบ Invert Kinematic นอกจากนี้ควรแสดงผลที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ เช่น เกิดการชน เกิดความเสียหาย

เอกสารอ้างอิง

1. บัญชา ปะสีละเตสัง, 2552. พัฒนาแอปพลิเคชั่นด้วย Visual C# 2008. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ซีเอ็ดยูเคชั่น.
2. Khali, W., and Dombre, E., 2002. Modeling, Identification & Control of Robots. London : Kogan Page Science.
3. สุธี พงศาสกุลชัย และ หทัยชนก งามอินทร์, 2550. คัมภีร์ Visual C# 2005. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ เคทีพี คอมพ์ แอนด์ คอนซัลท์.
4. ศูนย์รวมความรู้วิศวกรรม. หุ่นยนต์อุตสาหรรมประเภทต่างๆ. < http://www.mceengineer.com>
5. ไพศาล โมลิสกุลมงคล, 2550. คอมพิวเตอร์กราฟิกใช้ OpenGL. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ ไทยเจริญการพิมพ์.
6. Intelitek. SCORBOT – ER 4u. <http://www.intelitek.com>

ภาคผนวก ก

Source Code

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using System.IO;
using System.Threading;
using System.Drawing.Drawing2D;

using SharpGL;
using SharpGL.SceneGraph;
using SharpGL.SceneGraph.Quadrics;
using SharpGL.SceneGraph.Lights;

public struct Coordinate
{
   public double x;
   public double y;
   public double z;
}

public struct Surface
{
   public int a;
   public int b;
   public int c;
}
```

```
namespace LongD
{

  public partial class Form1 : Form
  {
    private int NbVertex1;
    private int NbFace1;
    private Part Base1;
    private Part Cover3;
    private Part Grip_Left;
    private Part Grip_Right;
    private Part Lower_Arm;
    private Part Thing1;
    private Part Upper_Arm;
    private Part Bar;
    private Part Grip04;
    private Part Grip01;
    private Part Grip02;
    private Part Grip03;
    private Part Cylinder;
    private Part Stick_Cylinder;
    private Part Table;

    double rtri = 0;
    double Cover3Angle = 0.0;
    double Lower_ArmAngle = 0.0;
    double Upper_ArmAngle = 0.0;
    double CylinderAngle = 0.0;
    double Stick_CylinderAngle = 0.0;
    double Grip_Angle = 0.0;
    double ViewAngle = 0.0;
```

```
int NumPos = 1;
double[] memCover3 = new double[100];
double[] memLowerArm = new double[100];
double[] memUpperArm = new double[100];
double[] memCylinder = new double[100];
double[] memStick_Cylinder = new double[100];
double[] memGrip = new double[100];

double incCover3;
double incLowerArm;
double incUpperArm;
double incCylinder;
double incStick_Cylinder;
double incGrip;
int CountMove = 0;
int CountPos = 0;
bool goHome = false;

int Speed = 10;


private Part Robot1;

public Form1()
{
  InitializeComponent();
}

private void OpenPart(string PartName, Part pt)
{
  StreamReader sr = new StreamReader(PartName);
  txtData1.Text = sr.ReadToEnd();
  string[] lines1 = txtData1.Text.Split('\n');
  string Rena1 = lines1[3];
```

```
string[] words3 = Rena1.Split(' ');

string Rena2 = lines1[7];
string[] words1 = Rena2.Split(' ');

string[] line5 = txtData1.Text.Split('\n');
string Rem1 = line5[3];
string[] wordV = Rem1.Split(' ');
string Rem2 = line5[7];
string[] wordF = Rem2.Split(' ');
NbVertex1 = int.Parse(wordV[2]);
NbFace1 = int.Parse(wordF[2]);
Coordinate[] Vt = new Coordinate[NbVertex1];
Surface[] Face = new Surface[NbFace1];
string CoPart = line5[10 + NbVertex1 + NbFace1];
string[] Jess = CoPart.Split(' ');
string JCC1 = Jess[1];
string JCC2 = Jess[2];
string JCC3 = Jess[3];
Coordinate JCC;
JCC.x = float.Parse(JCC1);
JCC.y = float.Parse(JCC2);
JCC.z = float.Parse(JCC3);

for (int i = 0; i < NbVertex1; i++)
{
  string Rem = line5[i + 10];

  string[] word9 = Rem.Split(' ');
  string Nux = word9[0];
  string Nuy = word9[1];
  string Nuz = word9[2];
  float Nux1 = float.Parse(Nux);
  float Nuy1 = float.Parse(Nuy);
```

```
        float Nuz1 = float.Parse(Nuz);


        Vt[i].x = Nux1;
        Vt[i].y = Nuy1;
        Vt[i].z = Nuz1;

    }

    for (int k = 0; k < NbFace1; k++)
    {
      string Row = line5[k + 10 + NbVertex1];
      string[] word10 = Row.Split(' ');
      string Kaix = word10[1];
      string Kaiy = word10[2];
      string Kaiz = word10[3];
      int Kaix1 = int.Parse(Kaix);
      int Kaiy1 = int.Parse(Kaiy);
      int Kaiz1 = int.Parse(Kaiz);

      Face[k].a = Kaix1;
      Face[k].b = Kaiy1;
      Face[k].c = Kaiz1;

    }

    pt.InitPart(NbVertex1, NbFace1);
    pt.LoadPart(Vt, Face, JCC);

}

private void button4_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Base1 = new Part();
```

```
OpenPart("Base1.ply", Base1);
Cover3 = new Part();
OpenPart("Cover3.ply", Cover3);
Bar = new Part();
OpenPart("Bar.ply", Bar);
Grip_Left = new Part();
OpenPart("Grip_Left.ply", Grip_Left);
Grip_Right = new Part();
OpenPart("Grip_Right.ply", Grip_Right);
Lower_Arm = new Part();
OpenPart("Lower_Arm.ply", Lower_Arm);
Grip01 = new Part();
OpenPart("Grip01.ply", Grip01);
Grip02 = new Part();
OpenPart("Grip02.ply", Grip02);
Grip03 = new Part();
OpenPart("Grip03.ply", Grip03);
Grip04 = new Part();
OpenPart("Grip04.ply", Grip04);
Thing1 = new Part();----------
OpenPart("Thing1.ply", Thing1);
Upper_Arm = new Part();
OpenPart("Upper_Arm.ply", Upper_Arm);
Cylinder = new Part();
OpenPart("Cylinder.ply", Cylinder);
Stick_Cylinder = new Part();
OpenPart("Stick_Cylinder.ply", Stick_Cylinder);
Table = new Part();
OpenPart("Table.ply", Table);

Robot1 = new Part();
Robot1.InitPart(Base1.numVTX + Cover3.numVTX + Bar.numVTX + Grip_Left.numVTX + Grip_Right.numVTX +
Grip01.numVTX + Grip02.numVTX + Grip03.numVTX + Grip04.numVTX + Lower_Arm.numVTX +
Upper_Arm.numVTX + Cylinder.numVTX + Stick_Cylinder.numVTX + Table.numVTX,
```

```
        Base1.numFace + Cover3.numFace + Bar.numFace + Grip_Left.numFace + Grip_Right.numFace +
Grip01.numFace + Grip02.numFace + Grip03.numFace + Grip04.numFace + Lower_Arm.numFace + Upper_Arm.numFace
+ Cylinder.numFace + Stick_Cylinder.numFace + Table.numFace);


    }

    public void LoadRobot()
    {
      Matrix Rotate = new Matrix(3, 3);

      Robot1.numVTX = 0;
      Robot1.numFace = 0;

      Rotate.SetRotateZ(Grip_Angle);
      for (int i = 0; i < Grip01.numVTX; i++)
      {
        Coordinate y1 = Rotate.MxVcMultiply(Grip01.Vertex[i]);
        y1.x += 48.2;
        //y1.y -= 74.9;
        y1.y -= 8.2;
        Robot1.Vertex[i] = y1;
      }
      Robot1.numVTX += Grip02.numVTX;

      Rotate.SetRotateZ(Grip_Angle);
      for (int i = 0; i < Grip02.numVTX; i++)
      {
        Coordinate y1 = Rotate.MxVcMultiply(Grip02.Vertex[i]);
        y1.x += 35.4;
        //y1.y -= 74.9;
        y1.y -= 8.2;
        Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = y1;
      }
```

```
Robot1.numVTX += Grip02.numVTX;

Rotate.SetRotateZ(-Grip_Angle);
for (int i = 0; i < Grip03.numVTX; i++)
{
   Coordinate y1 = Rotate.MxVcMultiply(Grip03.Vertex[i]);
   y1.x -= 35.4;
   //y1.y -= 74.9;
   y1.y -= 8.2;
   Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = y1;
}
Robot1.numVTX += Grip03.numVTX;

Rotate.SetRotateZ(-Grip_Angle);
for (int i = 0; i < Grip04.numVTX; i++)
{
   Coordinate y1 = Rotate.MxVcMultiply(Grip04.Vertex[i]);
   y1.x -= 48.2;
   //y1.y -= 74.9;
   y1.y -= 8.2;
   Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = y1;
}
Robot1.numVTX += Grip04.numVTX;

Rotate.SetRotateZ(-Grip_Angle);
Coordinate Ofset1 = Rotate.MxVcMultiply(Grip03.EndCo);
for (int i = 0; i < Grip_Left.numVTX; i++)
{
   Coordinate y1;
   y1.x = Ofset1.x + Grip_Left.Vertex[i].x;
   y1.y = Ofset1.y + Grip_Left.Vertex[i].y;
   y1.z = Ofset1.z + Grip_Left.Vertex[i].z;
   y1.x -= 35.4;
```

```
    //y1.y -= 74.9;
    y1.y -= 8.2;
    Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = y1;
  }
  Robot1.numVTX += Grip_Left.numVTX;

  Rotate.SetRotateZ(Grip_Angle);
  Coordinate Ofset2 = Rotate.MxVcMultiply(Grip02.EndCo);
  for (int i = 0; i < Grip_Right.numVTX; i++)
  {
    Coordinate y1;
    y1.x = Ofset2.x + Grip_Right.Vertex[i].x;
    y1.y = Ofset2.y + Grip_Right.Vertex[i].y;
    y1.z = Ofset2.z + Grip_Right.Vertex[i].z;
    y1.x += 35.4;
    //y1.y -= 74.9;
    y1.y -= 8.2;
    Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = y1;
  }
  Robot1.numVTX += Grip_Right.numVTX;

  for (int i = 0; i < Stick_Cylinder.numVTX; i++)
  {
    Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = Stick_Cylinder.Vertex[i];
  }
  Robot1.numVTX += Stick_Cylinder.numVTX;

  Rotate.SetRotateY(Stick_CylinderAngle);
  for (int i = 0; i < Robot1.numVTX; i++)
  {
    Robot1.Vertex[i] = Rotate.MxVcMultiply(Robot1.Vertex[i]);
  }

  Robot1.AddOfset(Cylinder.EndCo);
```

```
for (int i = 0; i < Cylinder.numVTX; i++)
{
   Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = Cylinder.Vertex[i];
}
Robot1.numVTX += Cylinder.numVTX;

Rotate.SetRotateX(CylinderAngle);
for (int i = 0; i < Robot1.numVTX; i++)
{
   Robot1.Vertex[i] = Rotate.MxVcMultiply(Robot1.Vertex[i]);
}

for (int i = 0; i < Bar.numVTX; i++)
{
   Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = Bar.Vertex[i];
}
Robot1.numVTX += Bar.numVTX;

Robot1.AddOfset(Upper_Arm.EndCo);
for (int i = 0; i < Upper_Arm.numVTX; i++)
{
   Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = Upper_Arm.Vertex[i];
}
Robot1.numVTX += Upper_Arm.numVTX;

Rotate.SetRotateX(Upper_ArmAngle);
for (int i = 0; i < Robot1.numVTX; i++)
{
   Robot1.Vertex[i] = Rotate.MxVcMultiply(Robot1.Vertex[i]);
}

Robot1.AddOfset(Lower_Arm.EndCo);
for (int i = 0; i < Lower_Arm.numVTX; i++)
{
```

```
    Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = Lower_Arm.Vertex[i];
  }
  Robot1.numVTX += Lower_Arm.numVTX;

  Rotate.SetRotateX(Lower_ArmAngle);
  for (int i = 0; i < Robot1.numVTX; i++)
  {
    Robot1.Vertex[i] = Rotate.MxVcMultiply(Robot1.Vertex[i]);
  }

  Robot1.AddOfset(Cover3.EndCo);
  for (int i = 0; i < Cover3.numVTX; i++)
  {
    Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = Cover3.Vertex[i];
  }
  Robot1.numVTX += Cover3.numVTX;

  Rotate.SetRotateY(Cover3Angle);
  for (int i = 0; i < Robot1.numVTX; i++)
  {
    Robot1.Vertex[i] = Rotate.MxVcMultiply(Robot1.Vertex[i]);
  }

  Robot1.AddOfset(Base1.EndCo);
  for (int i = 0; i < Base1.numVTX; i++)
  {
    Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = Base1.Vertex[i];
  }
  Robot1.numVTX += Base1.numVTX;

  for (int i = 0; i < Table.numVTX; i++)
  {
    Robot1.Vertex[Robot1.numVTX + i] = Table.Vertex[i];
  }
```

```
Robot1.numVTX += Table.numVTX;


// ------------------------------------------------------------


int RobotNumVTX = 0;
for (int i = 0; i < Grip01.numFace; i++)
{
   Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Grip01.Face[i].a + RobotNumVTX;
   Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Grip01.Face[i].b + RobotNumVTX;
   Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Grip01.Face[i].c + RobotNumVTX;
}
Robot1.numFace += Grip01.numFace;
RobotNumVTX += Grip01.numVTX;

for (int i = 0; i < Grip02.numFace; i++)
{
   Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Grip02.Face[i].a + RobotNumVTX;
   Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Grip02.Face[i].b + RobotNumVTX;
   Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Grip02.Face[i].c + RobotNumVTX;
}
Robot1.numFace += Grip02.numFace;
RobotNumVTX += Grip02.numVTX;

for (int i = 0; i < Grip03.numFace; i++)
{
   Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Grip03.Face[i].a + RobotNumVTX;
   Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Grip03.Face[i].b + RobotNumVTX;
   Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Grip03.Face[i].c + RobotNumVTX;
}
Robot1.numFace += Grip03.numFace;
RobotNumVTX += Grip03.numVTX;

for (int i = 0; i < Grip04.numFace; i++)
```

```
    {
        Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Grip04.Face[i].a + RobotNumVTX;
        Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Grip04.Face[i].b + RobotNumVTX;
        Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Grip04.Face[i].c + RobotNumVTX;
    }
    Robot1.numFace += Grip04.numFace;
    RobotNumVTX += Grip04.numVTX;

    for (int i = 0; i < Grip_Left.numFace; i++)
    {
        Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Grip_Left.Face[i].a + RobotNumVTX;
        Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Grip_Left.Face[i].b + RobotNumVTX;
        Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Grip_Left.Face[i].c + RobotNumVTX;
    }
    Robot1.numFace += Grip_Left.numFace;
    RobotNumVTX += Grip_Left.numVTX;

    for (int i = 0; i < Grip_Right.numFace; i++)
    {
        Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Grip_Right.Face[i].a + RobotNumVTX;
        Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Grip_Right.Face[i].b + RobotNumVTX;
        Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Grip_Right.Face[i].c + RobotNumVTX;
    }
    Robot1.numFace += Grip_Right.numFace;
    RobotNumVTX += Grip_Right.numVTX;

    for (int i = 0; i < Stick_Cylinder.numFace; i++)
    {
        Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Stick_Cylinder.Face[i].a + RobotNumVTX;
        Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Stick_Cylinder.Face[i].b + RobotNumVTX;
        Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Stick_Cylinder.Face[i].c + RobotNumVTX;
    }
    Robot1.numFace += Stick_Cylinder.numFace;
    RobotNumVTX += Stick_Cylinder.numVTX;
```

```
for (int i = 0; i < Cylinder.numFace; i++)
{
    Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Cylinder.Face[i].a + RobotNumVTX;
    Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Cylinder.Face[i].b + RobotNumVTX;
    Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Cylinder.Face[i].c + RobotNumVTX;
}
Robot1.numFace += Cylinder.numFace;
RobotNumVTX += Cylinder.numVTX;

for (int i = 0; i < Bar.numFace; i++)
{
    Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Bar.Face[i].a + RobotNumVTX;
    Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Bar.Face[i].b + RobotNumVTX;
    Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Bar.Face[i].c + RobotNumVTX;
}
Robot1.numFace += Bar.numFace;
RobotNumVTX += Bar.numVTX;

for (int i = 0; i < Upper_Arm.numFace; i++)
{
    Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Upper_Arm.Face[i].a + RobotNumVTX;
    Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Upper_Arm.Face[i].b + RobotNumVTX;
    Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Upper_Arm.Face[i].c + RobotNumVTX;
}
Robot1.numFace += Upper_Arm.numFace;
RobotNumVTX += Upper_Arm.numVTX;

for (int i = 0; i < Lower_Arm.numFace; i++)
{
    Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Lower_Arm.Face[i].a + RobotNumVTX;
    Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Lower_Arm.Face[i].b + RobotNumVTX;
    Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Lower_Arm.Face[i].c + RobotNumVTX;
}
```

```
    Robot1.numFace += Lower_Arm.numFace;
    RobotNumVTX += Lower_Arm.numVTX;

    for (int i = 0; i < Cover3.numFace; i++)
    {
      Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Cover3.Face[i].a + RobotNumVTX;
      Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Cover3.Face[i].b + RobotNumVTX;
      Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Cover3.Face[i].c + RobotNumVTX;
    }
    Robot1.numFace += Cover3.numFace;
    RobotNumVTX += Cover3.numVTX;

    for (int i = 0; i < Base1.numFace; i++)
    {
      Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Base1.Face[i].a + RobotNumVTX;
      Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Base1.Face[i].b + RobotNumVTX;
      Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Base1.Face[i].c + RobotNumVTX;
    }
    Robot1.numFace += Base1.numFace;
    RobotNumVTX += Base1.numVTX;

    for (int i = 0; i < Table.numFace; i++)
    {
      Robot1.Face[Robot1.numFace + i].a = Table.Face[i].a + RobotNumVTX;
      Robot1.Face[Robot1.numFace + i].b = Table.Face[i].b + RobotNumVTX;
      Robot1.Face[Robot1.numFace + i].c = Table.Face[i].c + RobotNumVTX;
    }
    Robot1.numFace += Table.numFace;
    RobotNumVTX += Table.numVTX;
}

private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
  LoadRobot();
```

```
Coordinate x;

SharpGL.OpenGL gl = this.openGLControl1.OpenGL;

gl.Clear(OpenGL.COLOR_BUFFER_BIT | OpenGL.DEPTH_BUFFER_BIT);
gl.LoadIdentity();

gl.Translate(0.0f, -10.0f, -50.0f);                    // Move Left And Into The Screen
gl.Scale(0.035, 0.035, 0.035);

gl.Rotate(rtri, 0.0f, 1.0f, 0.0f);                     // Rotate The Pyramid

gl.Enable(OpenGL.LIGHTING);
gl.Enable(OpenGL.LIGHT0);
gl.ShadeModel(OpenGL.SMOOTH);

float[] ambientLight = new float[4] { 0.2f, 0.2f, 0.2f, 1.0f };
float[] diffuseLight = new float[4] { 0.8f, 0.8f, 0.8f, 1.0f };
float[] specularLight = new float[4] { 0.5f, 0.5f, 0.5f, 1.0f };
float[] position = new float[4] { 2000.0f, 4000.0f, 3000.0f, 30.0f };
//float[] position = new float[4] { -1.5f, 1.0f, -4.0f, 1.0f };

gl.Light(OpenGL.LIGHT0, OpenGL.AMBIENT, ambientLight);
gl.Light(OpenGL.LIGHT0, OpenGL.DIFFUSE, diffuseLight);
gl.Light(OpenGL.LIGHT0, OpenGL.SPECULAR, specularLight);
gl.Light(OpenGL.LIGHT0, OpenGL.POSITION, position);

float[] mcolor = new float[4] { 0.0f, 1.0f, 1.0f, 1.0f };
gl.Material(OpenGL.FRONT, OpenGL.AMBIENT_AND_DIFFUSE, mcolor);

gl.Begin(OpenGL.TRIANGLES);                            // Start Drawing The Pyramid

Matrix Rotate = new Matrix(3, 3);
```

```
for (int n = 0; n < Robot1.numFace; n++)
{
  if (n == 1967)
  {
    float[] amcolor = new float[4] { 1.0f, 0.0f, 0.0f, 1.0f };
    gl.Material(OpenGL.FRONT, OpenGL.AMBIENT_AND_DIFFUSE, amcolor);
  }
  if (n == 1967 + 640)
  {
    float[] amcolor = new float[4] { 0.0f, 0.0f, 1.0f, 1.0f };
    gl.Material(OpenGL.FRONT, OpenGL.AMBIENT_AND_DIFFUSE, amcolor);
  }
  if (n == 1967 + 640 + 568 + 148)
  {
    float[] amcolor = new float[4] { 0.0f, 1.0f, 0.0f, 1.0f };
    gl.Material(OpenGL.FRONT, OpenGL.AMBIENT_AND_DIFFUSE, amcolor);
  }
  if (n == 1967 + 640 + 568 + 148 + 484)
  {
    float[] amcolor = new float[4] { 1.0f, 1.0f, 0.0f, 1.0f };
    gl.Material(OpenGL.FRONT, OpenGL.AMBIENT_AND_DIFFUSE, amcolor);
  }
  if (n == 1967 + 640 + 568 + 148 + 484 + 332)
  {
    float[] amcolor = new float[4] { 1.0f, 0.0f, 1.0f, 1.0f };
    gl.Material(OpenGL.FRONT, OpenGL.AMBIENT_AND_DIFFUSE, amcolor);
  }
  if (n == 1967 + 640 + 568 + 148 + 484 + 332 + 220 + 428)
  {
    float[] amcolor = new float[4] { 1.0f, 1.0f, 1.0f, 1.0f };
    gl.Material(OpenGL.FRONT, OpenGL.AMBIENT_AND_DIFFUSE, amcolor);
  }
```

```
    gl.Color(1.0f, 1.0f, 1.0f);

    x.x = Robot1.Vertex[Robot1.Face[n].a].x;
    x.y = Robot1.Vertex[Robot1.Face[n].a].y;
    x.z = Robot1.Vertex[Robot1.Face[n].a].z;

    gl.Vertex(x.x, x.y, x.z);
    //gl.Color(1.0f, 0.0f, 0.0f);

    x.x = Robot1.Vertex[Robot1.Face[n].b].x;
    x.y = Robot1.Vertex[Robot1.Face[n].b].y;
    x.z = Robot1.Vertex[Robot1.Face[n].b].z;

    gl.Vertex(x.x, x.y, x.z);
    //gl.Color(0.0f, 1.0f, 0.0f);
    x.x = Robot1.Vertex[Robot1.Face[n].c].x;
    x.y = Robot1.Vertex[Robot1.Face[n].c].y;
    x.z = Robot1.Vertex[Robot1.Face[n].c].z;

    gl.Vertex(x.x, x.y, x.z);
}

gl.End();                                   // Done Drawing The Pyramid

/*
float[] mat_diffuse = new float[4] { 1.0f, 1.0f, 1.0f, 1.0f };
float[] mat_specular = new float[4] { 0.0f, 0.0f, 1.0f, 1.0f };
float[] mat_shininess = new float[1] { 128.0f };
float[] light_position = new float[4] { 1.0f, 1.0f, 1.0f, 0.0f };
float[] diffuse = new float[4] { 1.0f, 1.0f, 1.0f, 1.0f };
float[] emission = new float[4] { 0.1f, 0.1f, 0.1f, 1.0f };
float[] ambient = new float[4] { 0.2f, 0.2f, 0.2f, 1.0f };
```

```
        gl.Enable(OpenGL.LIGHTING);
        gl.Enable(OpenGL.LIGHT0);
        gl.Enable(OpenGL.DEPTH_TEST);
        gl.Enable(OpenGL.NORMALIZE);
        gl.Enable(OpenGL.COLOR_MATERIAL);
        gl.ClearColor(0.0f, 0.0f, 0.0f, 0.0f);
        gl.ShadeModel(OpenGL.SMOOTH);
        gl.ShadeModel(OpenGL.FLAT);

        gl.Light(OpenGL.LIGHT0, OpenGL.POSITION, light_position);
        //gl.Light(OpenGL.LIGHT1, OpenGL.SPOT_CUTOFF, 15.0f);
        gl.Material(OpenGL.FRONT, OpenGL.AMBIENT, ambient);
        gl.Material(OpenGL.FRONT, OpenGL.DIFFUSE, mat_diffuse);
        gl.Material(OpenGL.FRONT, OpenGL.EMISSION, emission);
        gl.Material(OpenGL.FRONT, OpenGL.SPECULAR, mat_specular);
        gl.Material(OpenGL.FRONT, OpenGL.SHININESS, mat_shininess);
        gl.Material(OpenGL.LIGHT0, OpenGL.POSITION, light_position);
        */



      rtri += 05.0f * ViewAngle;
    }


    private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
    {
      this.Close();
    }

    private void lower_up_Click(object sender, EventArgs e)
    {
      if (Lower_ArmAngle < 180)
      Lower_ArmAngle += Speed;
```

```
        LoadRobot();
        button2_Click(sender, e);
    }

    private void lower_down_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        if (Lower_ArmAngle > -40)
            Lower_ArmAngle -= Speed;
        LoadRobot();
        button2_Click(sender, e);
    }

    private void All_round_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        ViewAngle = 1.0;
        button2_Click(sender, e);
        ViewAngle = 0.0;
    }

    private void Upper_up_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        if (Upper_ArmAngle < 130)
            Upper_ArmAngle += Speed;
        LoadRobot();
        button2_Click(sender, e);
    }

    private void Upper_Down_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        if (Upper_ArmAngle > -130)
            Upper_ArmAngle -= Speed;
        LoadRobot();
        button2_Click(sender, e);
    }
```

```
    private void Stick_Left_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        Stick_CylinderAngle -= Speed;
        LoadRobot();
        button2_Click(sender, e);
    }

    private void Stick_Right_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        Stick_CylinderAngle += Speed;
        LoadRobot();
        button2_Click(sender, e);
    }

    private void Tee_Up_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        if (CylinderAngle < 130)
            CylinderAngle += Speed;
        LoadRobot();
        button2_Click(sender, e);
    }

    private void Tee_Down_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        if (CylinderAngle > -270)
            CylinderAngle -= Speed;
        LoadRobot();
        button2_Click(sender, e);
    }

    private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        if (Cover3Angle > -310)
```

```
        Cover3Angle -= Speed;
      LoadRobot();
      button2_Click(sender, e);
   }

   private void button5_Click(object sender, EventArgs e)
   {
      if (Cover3Angle < 310)
         Cover3Angle += Speed;
      LoadRobot();
      button2_Click(sender, e);
   }

   private void Open_Click(object sender, EventArgs e)
   {
      if (Grip_Angle < 90)
      Grip_Angle += Speed;
      LoadRobot();
      button2_Click(sender, e);
   }

   private void Close_Click(object sender, EventArgs e)
   {
      if (Grip_Angle > 0)
      Grip_Angle -= Speed;
      LoadRobot();
      button2_Click(sender, e);
   }


   private void button9_Click(object sender, EventArgs e)
   {

      if (NumPos < 100)
```

```
    {
      txtmem1.Text += Convert.ToString(Upper_ArmAngle) + " ";
      txtmem1.Text += Convert.ToString(Lower_ArmAngle) + " ";
      txtmem1.Text += Convert.ToString(Cover3Angle) + " ";
      txtmem1.Text += Convert.ToString(CylinderAngle) + " ";
      txtmem1.Text += Convert.ToString(Stick_CylinderAngle) + " ";
      txtmem1.Text += Convert.ToString(Grip_Angle) + "\r\n";

      memUpperArm[NumPos] = Upper_ArmAngle;
      memLowerArm[NumPos] = Lower_ArmAngle;
      memCover3[NumPos] = Cover3Angle;
      memGrip[NumPos] = Grip_Angle;
      memStick_Cylinder[NumPos] = Stick_CylinderAngle;
      memCylinder[NumPos] = CylinderAngle;
      NumPos++;

    }

}

private void txtrec_TextChanged(object sender, EventArgs e)
{

}

private void timer2_Tick(object sender, EventArgs e)
{
  if (CountMove == 0)
  {
    incCover3 = (memCover3[CountPos] - Cover3Angle) / 150.0;
    incGrip = (memGrip[CountPos] - Grip_Angle) / 150.0;
    incLowerArm = (memLowerArm[CountPos] - Lower_ArmAngle) / 150.0;
    incStick_Cylinder = (memStick_Cylinder[CountPos] - Stick_CylinderAngle) / 150.0;
    incCylinder = (memCylinder[CountPos] - CylinderAngle) / 150.0;
```

```
        incUpperArm = (memUpperArm[CountPos] - Upper_ArmAngle) / 150.0;

    }
    if (CountMove < 150)
    {
        Lower_ArmAngle += incLowerArm;
        Upper_ArmAngle += incUpperArm;
        Grip_Angle += incGrip;
        Stick_CylinderAngle += incStick_Cylinder;
        CylinderAngle += incCylinder;
        Cover3Angle += incCover3;
        button2_Click(sender, e);
        CountMove++;
    }
    else
    {
        CountMove = 0;
        if (CountPos == (NumPos -1))
        {
            timer2.Enabled = false;
            CountPos = 0;
        }
        else
        {
            if(goHome)
            {
                timer2.Enabled = false;
                goHome = false;
                CountPos = 0;
            }
            else
                CountPos++;
        }
    }
```

```
    }

    private void Form1_Shown(object sender, EventArgs e)
    {
        button4_Click(sender, e);
        button2_Click(sender, e);
    }

    private void closeToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        this.Close();
    }

    private void howToUseToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        MessageBox.Show("LongD>>LongD>>bin>>Debug>>How_to");
    }

    private void clearToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        txtmem1.Clear();
        NumPos = 1;
    }

    private void runContinuousToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        CountPos = 0;
        timer2.Enabled = true;
    }

    private void goHomeToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        goHome = true;
        timer2.Enabled = true;
```

```
}

private void saveToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
{
    string savefile;
    savefile = "";
    SaveFileDialog sa = new SaveFileDialog();
    sa.Title = "save";
    sa.Filter = "Text Documents(*.txt;)|*.txt;";
    sa.RestoreDirectory = true;
    if (sa.ShowDialog() == DialogResult.OK)
    {
        savefile = sa.FileName;
    }

    File.WriteAllText(savefile, txtmem1.Text);
}

private void openToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
{
    string FileToOpen;
    FileToOpen = "";

    OpenFileDialog foDlg = new OpenFileDialog();
    foDlg.Title = "เลือกไฟล์ข้อความ";
    foDlg.Filter = "ไฟล์ข้อความ (*.txt;*.ply;)|*.txt;*.ply;";
    foDlg.RestoreDirectory = true;

    if (foDlg.ShowDialog() == DialogResult.OK)
    {
        FileToOpen = foDlg.FileName;
        StreamReader sr = new StreamReader(FileToOpen);
        txtmem1.Text = sr.ReadToEnd();
```

```
        string[] lines = txtmem1.Text.Split('\n');
        int numline = lines.Length - 1;
        for (int i = 0; i < numline; i++)
        {
          string[] anglesave = lines[i].Split(' ');
          memUpperArm[i+1] = double.Parse(anglesave[0]);
          memLowerArm[i + 1] = double.Parse(anglesave[1]);
          memCover3[i + 1] = double.Parse(anglesave[2]);
          //memStick_Cylinder[i + 1] = double.Parse(anglesave[3]);
          memCylinder[i + 1] = double.Parse(anglesave[3]);
          memStick_Cylinder[i + 1] = double.Parse(anglesave[4]);
          memGrip[i + 1] = double.Parse(anglesave[5]);
        }
        NumPos = numline + 1;
      }
    }

    private void fastToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
    {
      Speed = 20;
    }

    private void normalToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
    {
      Speed = 10;
    }

    private void slowToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
    {
      Speed = 5;
    }

}
```

```
public class Part
{
   public int numVTX;
   public int numFace;
   public Coordinate[] Vertex;
   public Surface[] Face;
   public Coordinate EndCo;


   public Part()
   {

   }

  public void InitPart(int nv, int nf)
  {
     numVTX = nv;
     numFace = nf;
     Vertex = new Coordinate[numVTX];
     Face = new Surface[numFace];
  }
  public void AddOfset(Coordinate os)
  {
     for (int i = 0; i < numVTX; i++)
     {
        Vertex[i].x += os.x;
        Vertex[i].y += os.y;
        Vertex[i].z += os.z;
     }
  }

public void LoadPart(Coordinate[] V, Surface[] F, Coordinate E)
{
   for (int i = 0; i < numVTX; i++)
```

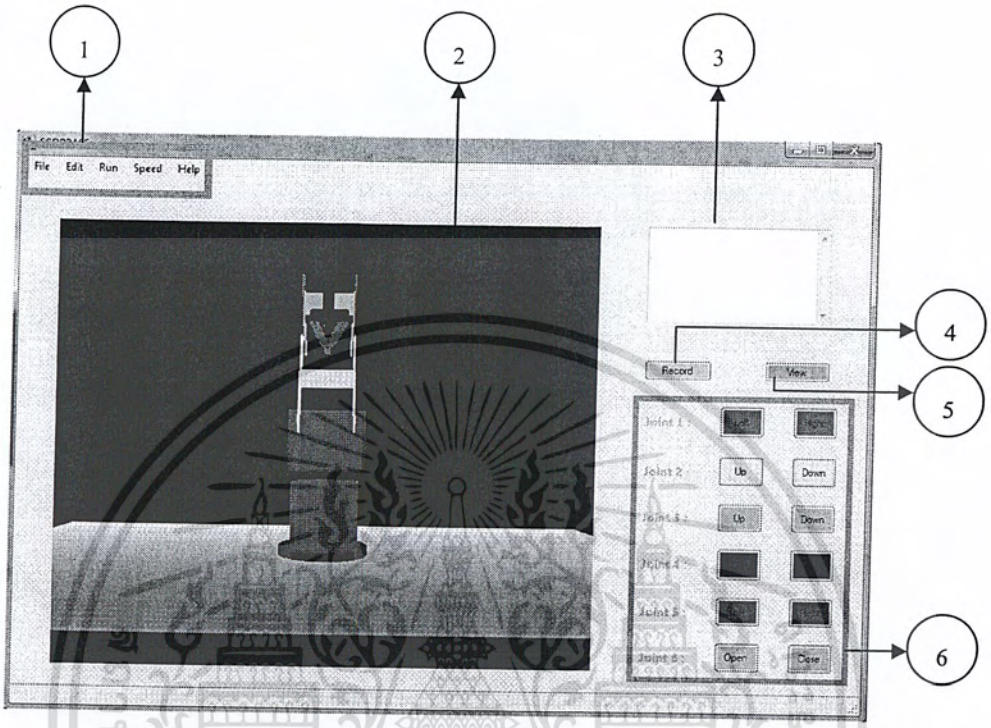
```
        {
            Vertex[i].x = V[i].x;
            Vertex[i].y = V[i].y;
            Vertex[i].z = V[i].z;
        }
        for (int i = 0; i < numFace; i++)
        {
            Face[i].a = F[i].a;
            Face[i].b = F[i].b;
            Face[i].c = F[i].c;
        }
        EndCo.x = E.x;
        EndCo.y = E.y;
        EndCo.z = E.z;
    }
};

public class Matrix
{
    int row;
    int col;
    double[,] mat;

    public Matrix(int r, int c)
    {
        row = r;
        col = c;
        mat = new double[r, c];
        for (int i=0; i<r; i++)
            for (int j = 0; j < c; j++)
            {
                mat[i, j] = 0.0;
            }
}
```

```
public void SetElmt(int i, int j, double v)
{
   mat[i, j] = v;
}

public void ClearMat()
{
   for (int i = 0; i < row; i++)
      for (int j = 0; j < col; j++)
      {
         mat[i, j] = 0.0;
      }
}

public Coordinate MxVcMultiply(Coordinate x)
{
   Coordinate y;
   y.x = mat[0, 0] * x.x + mat[0, 1] * x.y + mat[0, 2] * x.z;
   y.y = mat[1, 0] * x.x + mat[1, 1] * x.y + mat[1, 2] * x.z;
   y.z = mat[2, 0] * x.x + mat[2, 1] * x.y + mat[2, 2] * x.z;

   return y;
}

public void SetRotateX(double Angle)
{
   ClearMat();
   SetElmt(0, 0, 1);
   SetElmt(1, 1, Math.Cos(Math.PI * Angle/360));
   SetElmt(1, 2, -Math.Sin(Math.PI * Angle / 360));
   SetElmt(2, 1, Math.Sin(Math.PI * Angle / 360));
   SetElmt(2, 2, Math.Cos(Math.PI * Angle / 360));
}
```

```
    public void SetRotateY(double Angle)
    {
        ClearMat();
        SetElmt(0, 0, Math.Cos(Math.PI * Angle / 360));
        SetElmt(0, 2, Math.Sin(Math.PI * Angle / 360));
        SetElmt(1, 1, 1.0);
        SetElmt(2, 0, -Math.Sin(Math.PI * Angle / 360));
        SetElmt(2, 2, Math.Cos(Math.PI * Angle / 360));
    }
    public void SetRotateZ(double Angle)
    {
        ClearMat();
        SetElmt(0, 0, Math.Cos(Math.PI * Angle / 360));
        SetElmt(0, 1, -Math.Sin(Math.PI * Angle / 360));
        SetElmt(1, 0, Math.Sin(Math.PI * Angle / 360));
        SetElmt(1, 1, Math.Cos(Math.PI * Angle / 360));
        SetElmt(2, 2, 1.0);
    }

};
}
```

ภาคผนวก ข

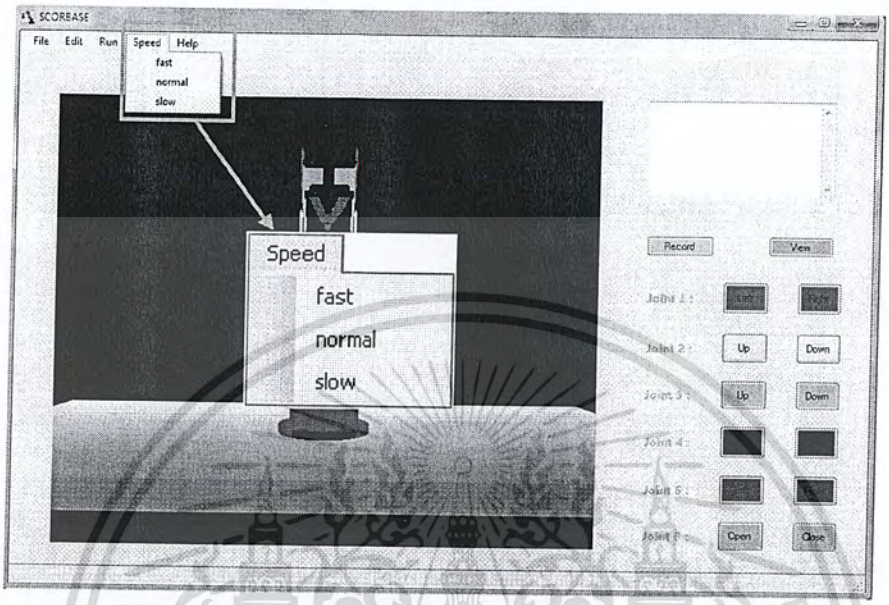
คู่มือการใช้งาน



รูปที่ ผข1 แนะนำหน้าต่างโปรแกรม

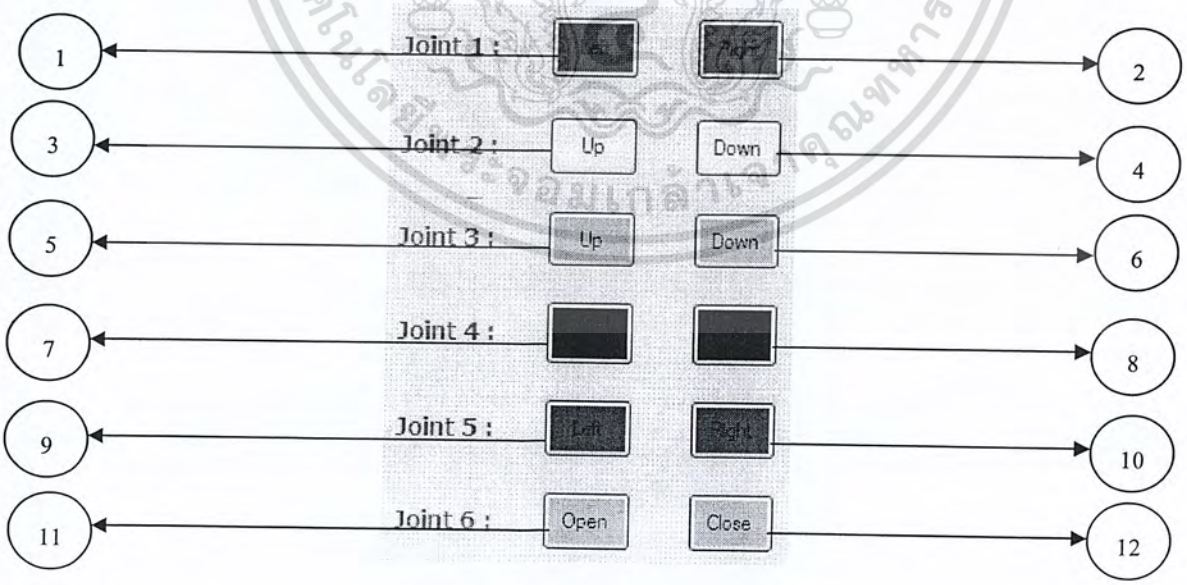
1. แถบเมนู
2. OpenGLControl
3. หน้าต่างบันทึกคำสั่ง
4. ปุ่มบันทึกคำสั่ง
5. ปุ่มเลือกมุมมอง
6. ปุ่มควบคุมแขนกล

ก่อนที่จะจำลองแขนกล เราสามารถความเร็วของการจำลอง ซึ่งมีให้เลือก 3 ระดับ นั่นคือ fast, Normal และ slow



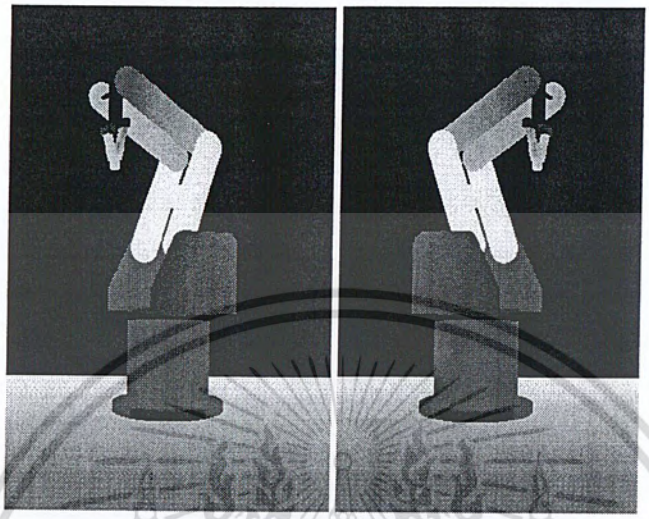
รูปที่ ผข2 วิธีเลือกความเร็ว

1. ปุ่มที่ใช้ในการแสดงการเคลื่อนที่ของแขนกล



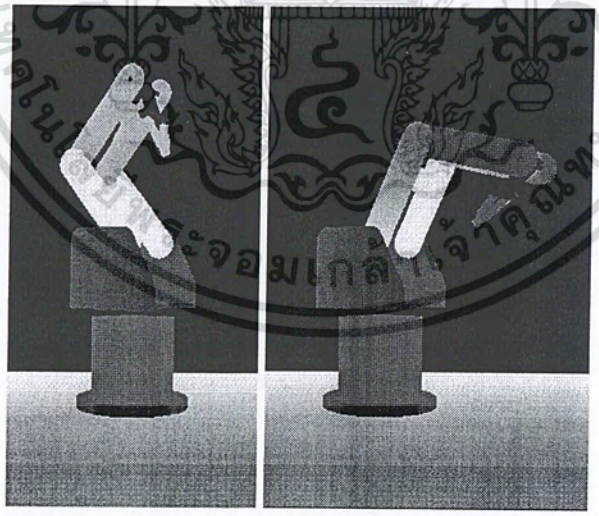
รูปที่ ผข3 ปุ่มควบคุมแขนกล

1.1 ปุ่ม 1 และ 2 ใช้ในการขยับส่วน cover3 ให้หมุน



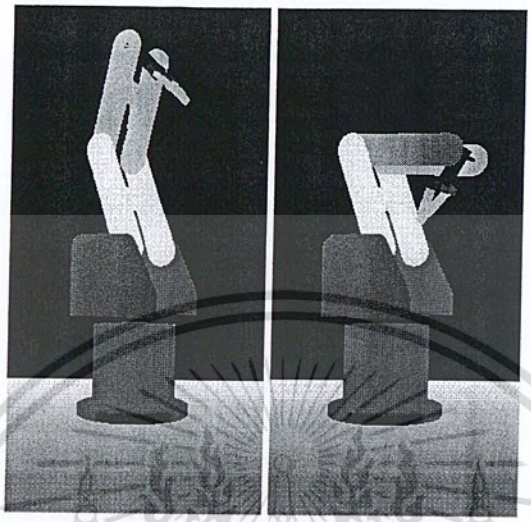
รูปที่ ผข4 ลักษณะการหมุนของ cover3

1.2 ปุ่ม 3 และ 4 ใช้ในการขยับขึ้น – ลง ของแขนท่อนล่าง (Lower Arm)



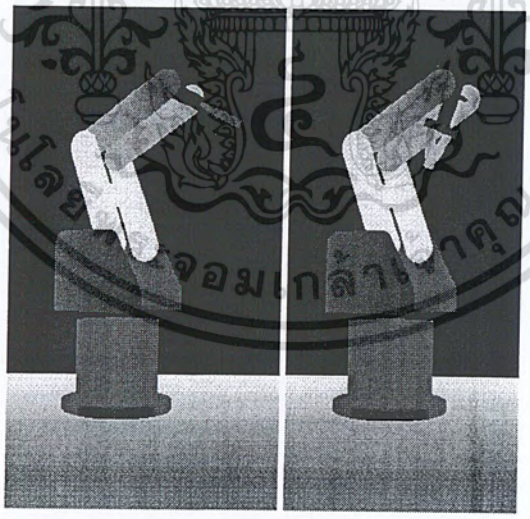
รูปที่ ผข5 ลักษณะการหมุนของแขนท่อนล่าง

1.3 ปุ่ม 5 และ 6 ใช้ในการขยับขึ้น – ลง ของแขนท่อนบน (Upper Arm)



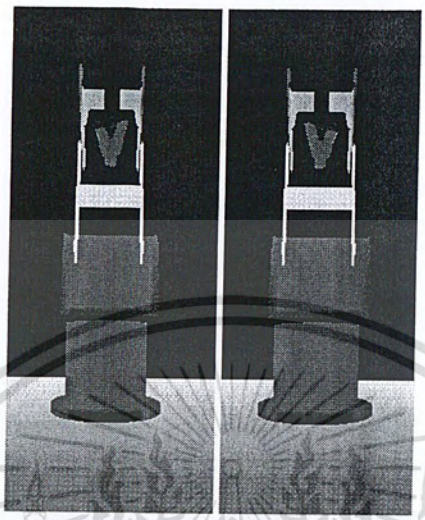
รูปที่ ผข6 ลักษณะการหมุนของแขนท่อนบน

1.4 ปุ่ม 7 และ 8 ใช้ในการขยับขึ้น – ลง ของปากหนีบ (Grip)



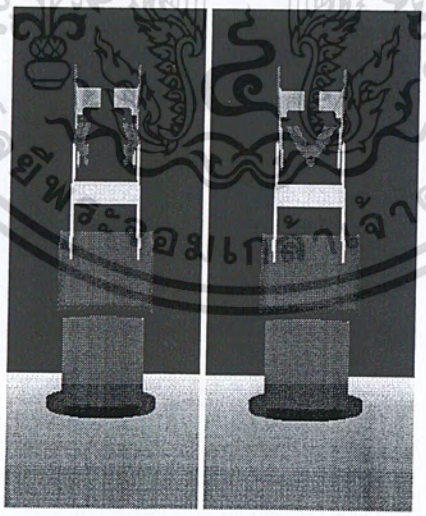
รูปที่ ผข7 ลักษณะการหมุนของปากหนีบแบบขึ้น – ลง

1.5 ปุ่ม 9 และ 10 ใช้ในการหมุนซ้าย – ขวา ของปากหนีบ



รูปที่ ผข8 ลักษณะการหมุนของปากหนีบแบบหมุนซ้าย – ขวา

1.6 ปุ่ม 11 และ 12 ใช้ในการเปิด – ปิด ปากหนีบ



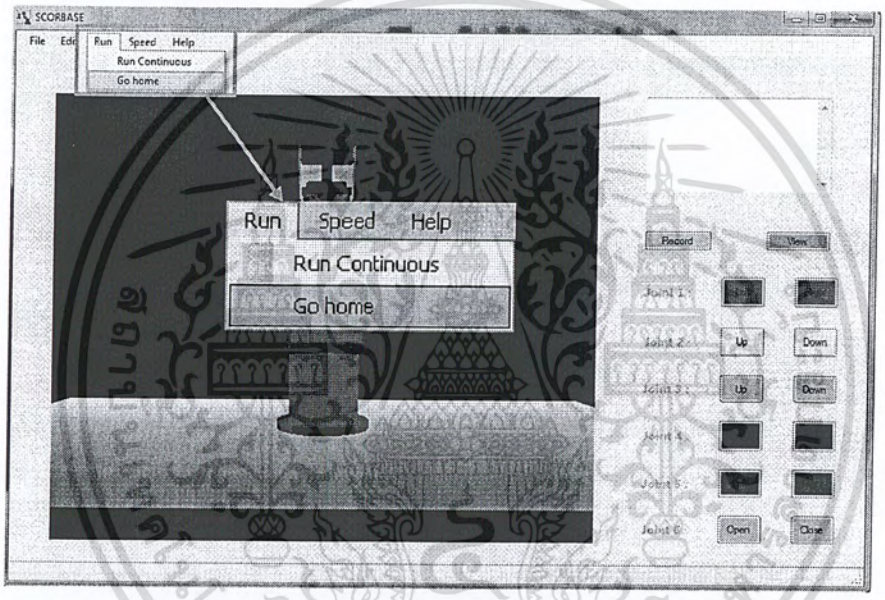
รูปที่ ผข9 ลักษณะการเปิด – ปิดของปากหนีบ

2. วิธีการบันทึกค่าตำแหน่ง

1. เลือกตำแหน่งตามที่ต้องการ
2. กด Record เพื่อบันทึกตำแหน่งนั้น
3. ทำซ้ำ เพื่อให้เป็นการเคลื่อนที่ตามที่เราต้องการ

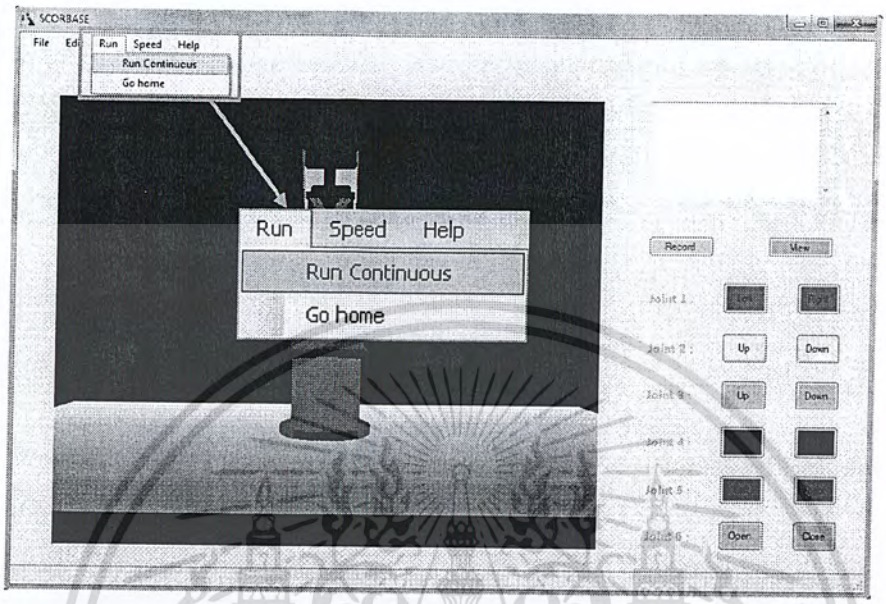
3. วิธีการรันโปรแกรม

1. กด Go home เพื่อให้แขนกลกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น



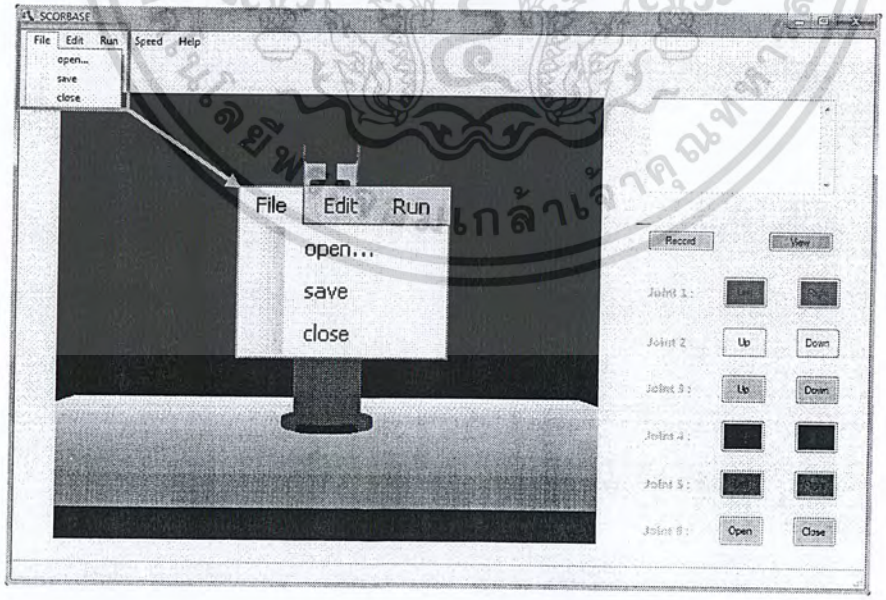
รูปที่ ผข10 แสดงขั้นตอนการเลือกตำแหน่งเริ่มต้น

2. กด Run Continuous หลังจากนั้นภาพการจำลองของแขนกลจะทำงาน



รูปที่ ผข11 แสดงขั้นตอนการเรียกดูการเคลื่อนไหวทั้งหมดของแขนกล

4. วิธีการบันทึกเป็นไฟล์ข้อมูล เปิดไฟล์ข้อมูล และการปิดโปรแกรม

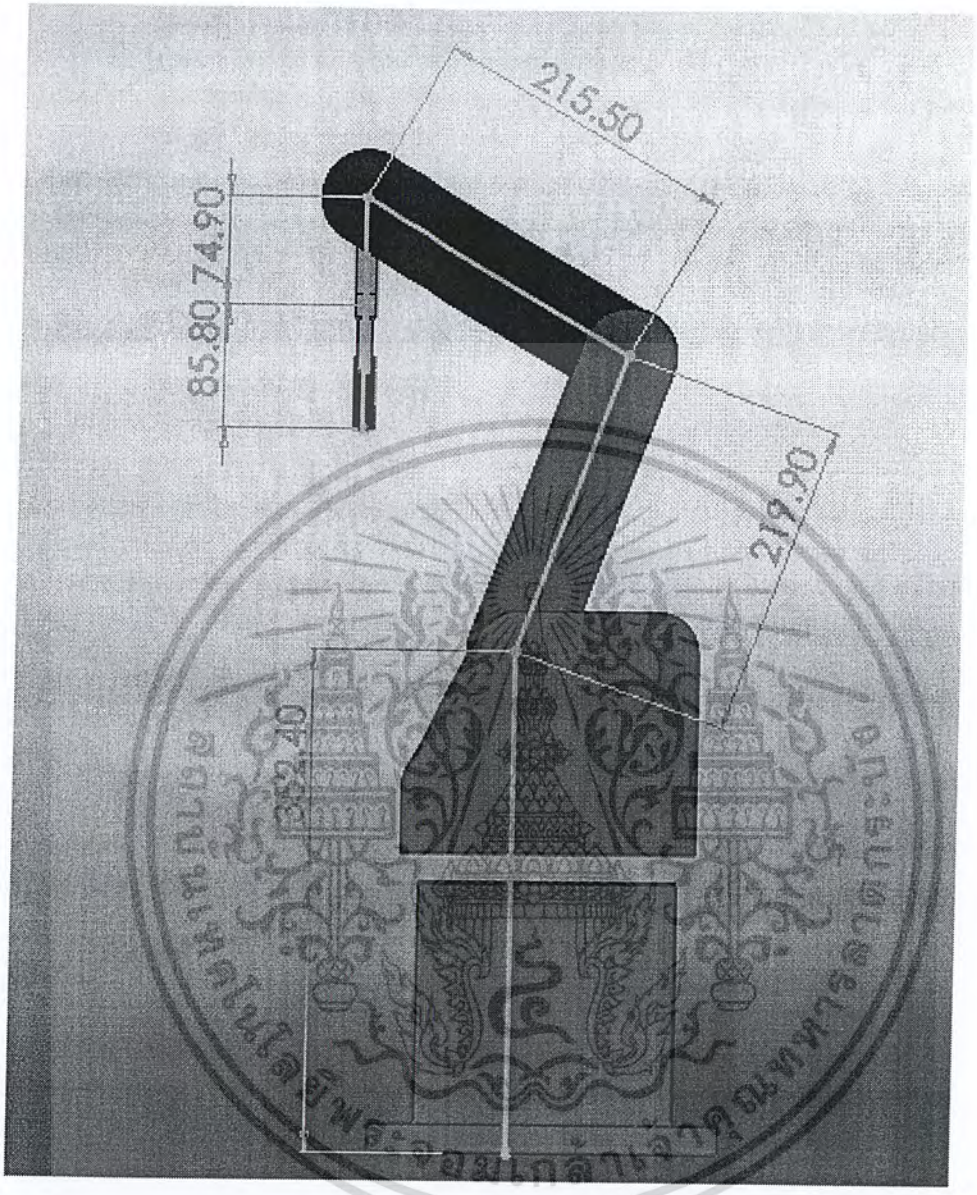


รูปที่ ผข12 แสดงขั้นตอนการบันทึกและเปิดไฟล์

ในการบันทึกเป็นไฟล์ข้อมูล ให้กด File แล้วกด save เช่นเดียวกับการบันทึกข้อมูลทั่วไป การเปิดไฟล์ข้อมูล ให้กด File แล้วกด open ส่วนการปิดโปรแกรม ให้กด File แล้วกด Close หรือกดเครื่องหมายกากบาทด้านขวาของหน้าต่าง

ภาคผนวก ค

ความยาวของข้อต่อต่างๆ



รูปที่ ผค1 ความยาวของข้อต่อต่างๆ