การออกแบบแขนกลความเร็วสูงแบบ 3 องศาอิสระ

Design and Development of a Hi-speed Robot

ทวี งามวิไลกร, พุทธวุฒิ สรรพกิจบำรุง, ชญานิน นิตยะสุข, ชุรีรัตน์ สุนสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
59 หมู่ 1 ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร รหัสไปรษณีย์ 47000
E-mail : fengtwn@ku.ac.th, โทร 0-4272-5033 โทรสาร 0-4272-5034

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างแขนกลที่สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงแบบ 3 องศาอิสระ โครงสร้างแขนกลเป็นโครงสร้างแบบอนุกรม วัสดุที่ใช้สร้างแขนกลคืออลูมิเนียม มอเตอร์หรืออุปกรณ์ขับในงานวิจัยนี้เป็นมอเตอร์กระแสตรงซึ่งถูกติดตั้งที่ฐานของแขนกลเพื่อลดน้ำหนักและความเฉื่อยของแขนกล การขับเคลื่อนแขนกลที่ข้อต่อของแขนกลใช้ระบบสายพานและมูเล่ แขนกลในงานวิจัยนี้ใช้เกียร์ทดที่มีอัตราทดเกียร์ต่ำ อุปกรณ์วัดมุมที่ข้อต่อของแขนกลมีความละเอียด 10000 ppr ความเร็วเชิงมุมสูงสุดของแต่ละแกนของแขนกลที่ทำได้เท่ากับ 90 องศาต่อวินาที ความผิดพลาดของตำแหน่งของแขนกลมีค่าไม่เกิน 1 มิลลิเมตร แขนกลในงานวิจัยนี้ยังเหมาะสมในการนำไปใช้ในการทำงานแบบ มาสเตอร์-สเลฟเนื่องจากมีความสามารถในการขับกลับ

คำหลัก: แขนกล / หุ่นยนต์

Abstract

This paper illustrates a hi-speed robot arm which is a 3-dof manipulator. The configuration is serial robot or open-loop manipulator. All of actuators are dc motor which are located on the base of the robot to reduce the moment of inertia. The power transmission mechanisms are gear-train and tendon-pulley that are designed for hi-speed robot. The resolution of optical encoder is 10,000 lines per revolution. The maximum angular velocity of robot is 90°/sec. The accuracy at the end-effector of the robot is 1 mm. Furthermore, the robot in this research can be use for the master-slave manipulator system. Because of back drive ability of this robot.

Keywords: robot / manipulator

1. บทนำ

ในยุคเริ่มต้นของการส่งเสริมอุตสาหกรรมในประเทศไทยจะเห็นได้ว่ามีโรงงานต่าง ๆ เข้ามาตั้งฐานผลิตในเมืองไทยจำนวนมากทำให้เกิดนิคมอุตสาหกรรมขึ้นหลายแห่ง ทั้งนี้เนื่องจากรัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมอุตสาหกรรมที่ชัดเจน ค่าแรงงานถูก ลดรายจ่ายเนื่องจากภาษีการนำเข้าของสินค้า และวัตถุดิบบางตัว แต่ ณ ปัจจุบันนี้ค่าแรงบ้านเราสูงขึ้น

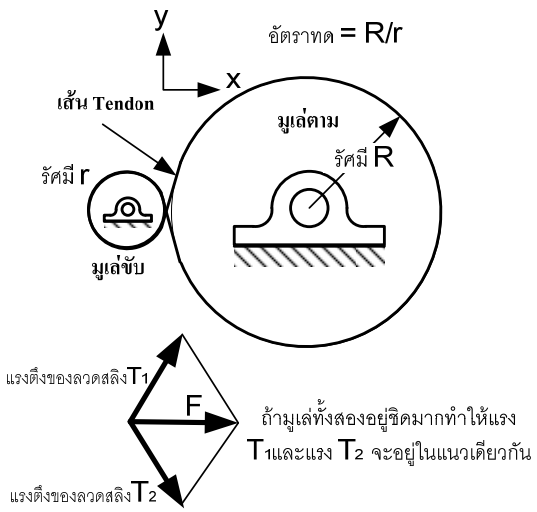
และสูงกว่าประเทศเพื่อนบ้าน เช่น จีน เวียดนาม อินโดนีเซีย ฯลฯ ในขณะเดียวกันคุณภาพแรงงานไม่ได้มาตรฐาน ขาดความรู้และทักษะจึงทำให้หลายบริษัทได้ย้ายฐานการผลิตไปยังประเทศที่มีค่าแรงงานถูกกว่า และอีกหลายบริษัทที่พยายามปรับตัวเอง โดยมีการนำเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติ (Automation Technology) เข้ามาใช้งานเพื่อให้สินค้าสามารถแข่งขันในตลาดโลกได้ทั้งในเรื่องราคา และคุณภาพ โดยเฉพาะในเรื่องคุณภาพ ปัจจุบันโรงงานที่ผลิตสินค้าส่งออกหรือส่งให้กับลูกค้าที่เป็นบริษัทของต่างประเทศมักจะประสบปัญหาในเรื่องคุณภาพ มีทั้งผลิตสินค้าไม่ได้มาตรฐานตามที่ลูกค้ากำหนด หรือผลิตสินค้าไม่ทันตามกำหนดเวลา อาจเนื่องจากมีการเปลี่ยนรุ่นผลิตภัณฑ์อยู่บ่อยๆ ต้องใช้เวลาในการ Set up ปัจจุบันจึงมีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามาใช้ หนึ่งในเทคโนโลยีที่มีความยืดหยุ่นสูง ได้แก่ หุ่นยนต์อุตสาหกรรม เนื่องจากการเปลี่ยนการทำงานสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนโปรแกรม นอกจากนี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอเป็นมาตรฐานเดียวกัน

ปัจจุบันและในอนาคตหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมมากขึ้นโดยจะทำงานแทนมนุษย์ในงานต่าง ๆ เหล่านี้งานที่อันตราย เช่น งานยกเหล็กเข้าเตาหลอมงานที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีงานซ้ำซากน่าเบื่อ เช่น งานยกสินค้าจากสายงานการผลิต งานประกอบ งานบรรจุผลิตภัณฑ์งานที่ต้องการคุณภาพมาตรฐานเดียวกัน เช่น งานเชื่อมงานตัด งานที่ต้องใช้ทักษะความชำนาญสูง เช่น งานเชื่อมแนวเชื่อมเลเซอร์งานที่ต้องใช้ความละเอียดประณีต เช่น งานประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์งานตรวจสอบ (Inspection) ฯลฯในปัจจุบันการวิจัยในด้านต่างๆ เกี่ยวกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้ก้าวหน้าไปมาก มีความต้องการนำหุ่นยนต์มาใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆเป็นจำนวนมาก หุ่นยนต์มีความสามารถทำงานที่มนุษย์ไม่สามารถทำได้ อาทิ งานที่ต้องใช้แรงมาก งานที่ต้องใช้ความแม่นยำสูง และกระบวนการที่ทำซ้ำๆกันเป็นจำนวนมาก อุตสาหกรรมที่หุ่นยนต์เข้าไปมีบทบาทมากได้แก่ งานผลิตชิ้นส่วน งานสร้างแม่พิมพ์ และสายการผลิตอัตโนมัติ ซึ่งแขนกลหรือหุ่นยนต์ที่สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วนั้นก็จะทำให้มีความสามารถให้การแข่งขันและมีความได้เปรียบกับบริษัทคู่แข่งได้

2. การออกแบบแขนกล

รูปแบบโครงสร้างของแขนกลเป็นโครงสร้างแบบอนุกรมที่มี 3 แกนซึ่งประกอบด้วยข้อต่อแบบหมุน (Revolute joint) ทั้งหมด ความยาวของลิงค์ที่ 1 เท่ากับ 45 cm ลิงค์ที่ 2 และ 3 ยาว 75 cm

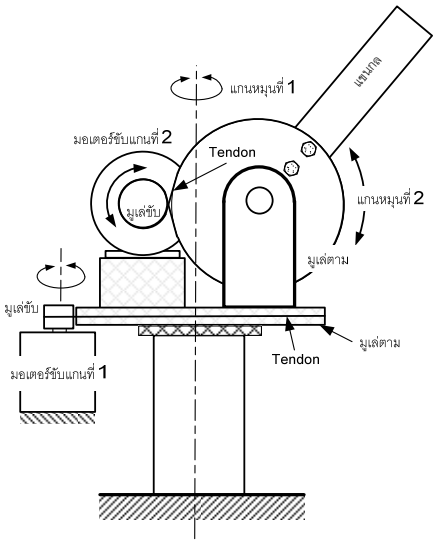
เป้าหมายของการออกแบบแขนกลในงานวิจัยนี้ คือ ต้องการให้แขนกลที่ได้มีความเร็วในการเคลื่อนที่สูง ความเร็วเชิงมุมที่ต้องการให้แขนกลทำได้ประมาณ 240องศาต่อวินาที ในการที่จะทำให้แขนกลเคลื่อนที่ได้เร็วเช่นนั้นต้องทำให้แขนกลมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ แขนกลต้องมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำ มีมวลน้อย แขนกลใช้อุปกรณ์ส่งผ่านกำลังที่มีอัตราทดเกียร์ต่ำ หรือใช้วิธีขับตรง มอเตอร์หรืออุปกรณ์ขับต้องมีขนาดที่เหมาะสม



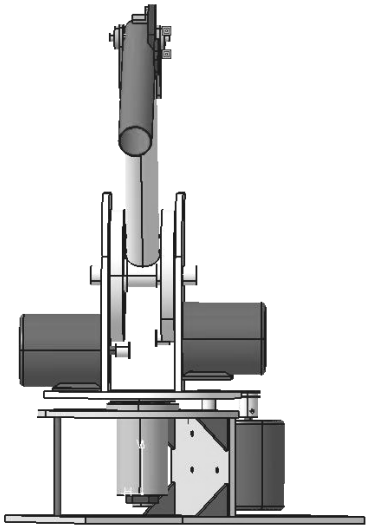
รูปที่ 1 ระบบส่งผ่านกำลัง Tendon Pulley

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้มอเตอร์ของแขนกลทั้ง3 แกนถูกติดตั้งที่ฐานของแขนกลทั้งหมด จากการออกแบบดังกล่าวทำให้ลดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลลงไปได้มาก ในการส่งผ่านกำลังของแขนกลจากมอเตอร์ไปยังลิงค์ต่างๆของแขนกลจะใช้การส่งผ่านกำลังแบบลวดสลิงและมูเล่ (Tendon-and-Pulley system) เป็นหลัก โดยที่มูเล่ขับและมูเล่ตามจะ

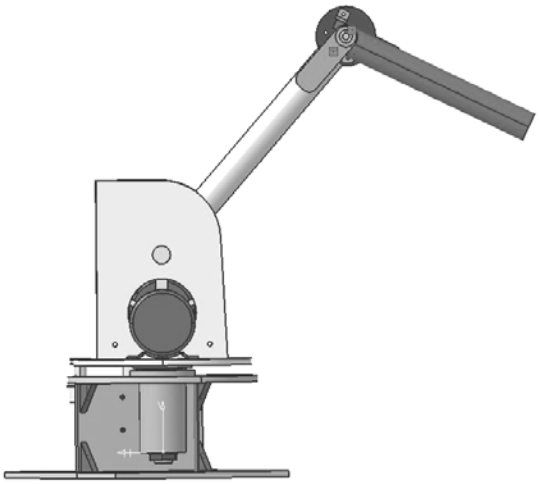
อยู่ชิดกันให้มากที่สุดและมีลวดสลิงหรือ Tendon พันไข้วกันดังรูปที่ 1 การที่มูเล่ทั้งสองอยู่ชิดกันมากทำให้แรงลัพธ์ในแนวแกน x หรือแรงF ของแรงตึงในเส้นลวดสลิงมีค่าน้อยหรือเท่ากับศูนย์ได้ทำให้แรงที่กระทำที่แบริ่งของมูเล่เนื่องมาจากแรงตึงในลวดสลิงมีค่าน้อยมากและระบบส่งผ่านกำลังแบบนี้ยังมีราคาถูก น้ำหนักเบา แรงเสียดทานต่ำและไม่มีแบลกเลช (Backlash) อัตราทดของระบบส่งผ่านกำลังแบบลวดสลิงและมูเล่ในงานวิจัยนี้มีค่าดังนี้ แกนหมุนที่ 1 อัตราทดเท่ากับ 1:20 แกนหมุนที่ 2 และ3 อัตราทดเท่ากับ 1:10 วัสดุที่ใช้สร้างแขนกลคืออลูมิเนียมเป็นหลักเพื่อลดน้ำหนักและความเฉื่อยของแขนกล



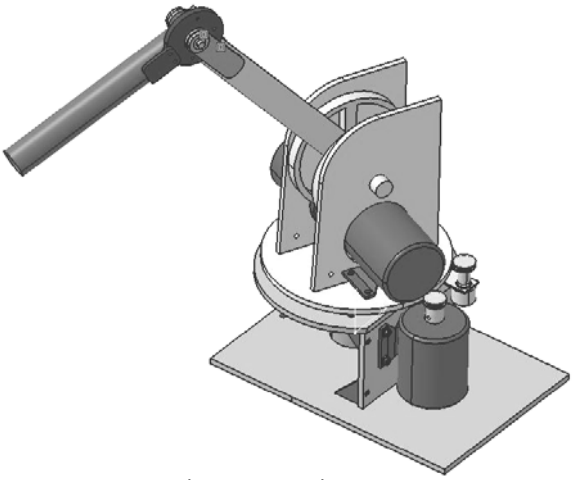
รูปที่ 2 ตำแหน่งการวางมอเตอร์ขับแกนที่ 1 และแกนที่ 2



รูปที่ 3 แขนกลที่ออกแบบ มองจากด้านหน้า



รูปที่ 4 แขนกลที่ออกแบบ มองจากด้านข้าง



รูปที่ 5 แขนกลที่ออกแบบ

2.1 การตั้งแกนของแขนกล

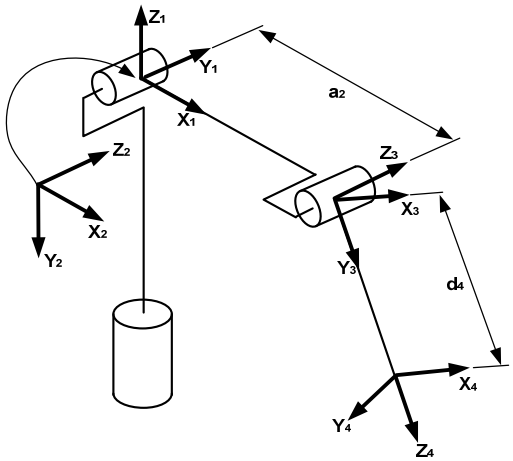
รูปแบบโครงสร้างของแขนกลในงานวิจัยนี้ เป็นแขนกลที่มีโครงสร้างแบบอนุกรม มีองศาอิสระเท่ากับ 3 การตั้งแกนของแขนกลแสดงดังรูปที่ 6

ลิงค์ที่ 1 ของแขนกลมีความยาวเท่ากับ 0

ลิงค์ที่ 2 ของแขนกลมีความยาวเท่ากับ a_2

ลิงค์ที่ 3 ของแขนกลมีความยาวเท่ากับ d_4

จุดกำเนิดของเฟรมที่ 2 อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับจุดกำเนิดของเฟรม 1 ตามลูกศรชี้ จุดกำเนิดของเฟรมที่ 3 อยู่ห่างจากจุดกำเนิดของเฟรมที่ 2 เท่ากับ a_2 จุดกำเนิดของเฟรมที่ 4 อยู่ห่างจากจุดกำเนิดของเฟรมที่ 3 เท่ากับ d_4 ในที่นี้เฟรมที่ 4 คือ tool frame หรือ end-effector ของแขนกล จากการตั้งแกนทำให้สามารถเขียนเมตริกของแกนต่างๆได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6 การตั้งแกนของแขนกล

$$ {}^{0}_{1}T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{2}_{3}T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{3}_{4}T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -s_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

2.2. Kinematic ของแขนกล

Kinematic ของแขนกลประกอบไปด้วย Forward kinematics และ Inverse kinematics โดยที่ Forward kinematics เป็นการหาตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนเมื่อกำหนดค่ามุมของแต่ละข้อต่อมาให้ ส่วน Inverse kinematics ก็คือการหาค่ามุมของแต่ละข้อต่อเมื่อต้องการให้ปลายแขนกล อยู่ในตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการ

Forward kinematics ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลที่สัมพันธ์กับค่ามุมต่างๆที่ข้อต่อ เขียนอยู่ในรูป Transformation matrix ของปลายแขน (T) เทียบกับ แกนนิ่ง (0) ได้ดังสมการ

$$ {}^{0}_{T}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

โดยที่

$$ r_{11} = c_1[c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] + s_1[s_4c_5c_6 + c_4s_6] $$
$$ r_{12} = c_1[-c_{23}(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + s_{23}s_5s_6] - s_1[s_4c_5s_6 - c_4c_6] $$
$$ r_{13} = c_1[c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5] + s_1s_4s_5 $$
$$ r_{21} = s_1[c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] - c_1[s_4c_5c_6 + c_4s_6] $$
$$ r_{22} = s_1[-c_{23}(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + s_{23}s_5s_6] + c_1[s_4c_5s_6 - c_4c_6] $$
$$ r_{23} = s_1[c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5] - c_1s_4s_5 $$
$$ r_{31} = s_{23}[c_4c_5c_6 - s_4s_6] + c_{23}s_5c_6 $$
$$ r_{32} = -s_{23}[c_4c_5s_6 + s_4c_6] - c_{23}s_5s_6 $$
$$ r_{33} = s_{23}c_4s_5 - c_{23}c_5 $$
$$ p_x = c_1[l_5s_{23} + l_2c_2] + r_{13}l_6 $$
$$ p_y = s_1[l_5s_{23} + l_2c_2] + r_{23}l_6 $$
$$ p_z = l_2s_2 - l_5c_{23} + r_{33}l_6 $$

เมื่อ p_x, p_y, p_z แทนตำแหน่งของปลายแขนที่อยู่ห่างจากเฟรม 0 ในแนวแกน X,Y และZตามลำดับ

Inverse kinematics เมื่อต้องการให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งและทิศทางที่กำหนด จำเป็นจะต้องทราบมุมของแต่ละข้อต่อ เมื่อกล่าวในเชิงตัวแปร ก็คือการทราบค่า p_x, p_y, p_z (ตำแหน่ง) และ $r_{11}, r_{12}, ..., r_{33}$ (ทิศทาง) อยู่ก่อน แล้วคำนวณหาค่ามุม θ ต่างๆที่สัมพันธ์กับตำแหน่งและทิศทางนั้นๆ ค่ามุม □ θ ต่างๆ ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งและทิศทางของแขนกลเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$ \theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y - r_{23}l_6}{p_x - r_{13}l_6}\right) $$

$$ \theta_3 = \arctan\left(\frac{s_3}{c_3}\right) $$

$$ s_3 = \frac{-l_2^2 - l_5^2 + (p_x - r_{13}l_6)^2 + (p_y - r_{23}l_6)^2 + (p_z - r_{33}l_6)^2}{2l_2l_5} $$

$$ c_3 = \sqrt{1 - s_3^2} $$

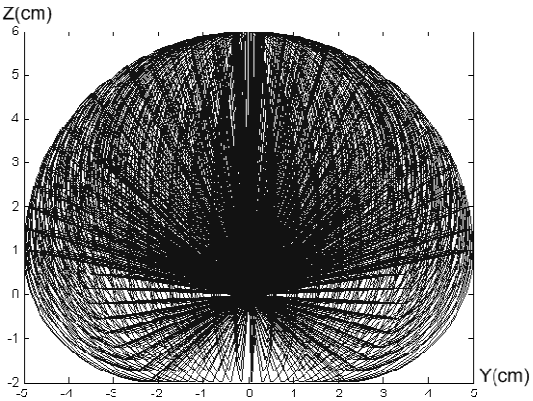
$$ \theta_2 = -\theta_3 + \arctan\left(\frac{s_{23}}{c_{23}}\right) $$

$$s_{23} = \frac{l_2 c_3 (p_z - r_{33} l_6) + [(l_2 s_3 + l_5)(c_1 (p_x - r_{13} l_6) + s_1 (p_y - r_{23} l_6))]}{(p_z - r_{33} l_6)^2 + [c_1 (p_x - r_{13} l_6) + s_1 (p_y - r_{23} l_6)]^2}$$

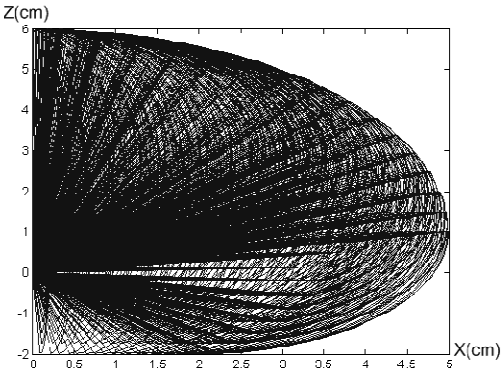
$$c_{23} = \frac{l_2 c_3 [c_1 (p_x - r_{13} l_6) + s_1 (p_y - r_{23} l_6)] - (p_z - r_{33} l_6)(l_2 s_3 + l_5)}{(p_z - r_{33} l_6)^2 + [c_1 (p_x - r_{13} l_6) + s_1 (p_y - r_{23} l_6)]^2}$$

2.3. Workspace ของแขนกล

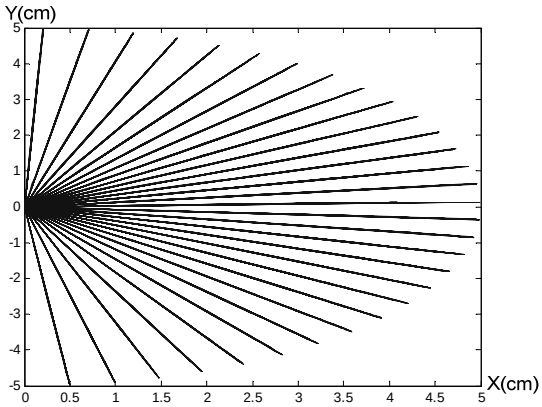
การเคลื่อนที่ของปลายแขนของแขนกลที่สามารถเคลื่อนที่ได้เป็นพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงพื้นที่การทำงานเมื่อมองจากด้านหน้าของแขนกล ระยะในแนวแกน x เท่ากับ 200 cm ระยะตามแนวแกน Z 120 cm รูปที่ 8 แสดงพื้นที่การทำงานเมื่อมองจากด้านข้าง ระยะที่แขนกลยื่นไปข้างหน้าได้มากสุดเท่ากับ 100 cm และระยะที่แขนกลเคลื่อนที่ต่ำสุดคือ 20 cm รูปที่ 10 แสดงพื้นที่การทำงานแบบ 3 มิติ โดยที่รูปที่แสดงพื้นที่การทำงานที่แสดงในงานวิจัยนี้หาโดยใช้โปรแกรม matlab โดยที่รูปพื้นที่การทำงานไม่ได้แสดงสเกลที่แท้จริงไว้



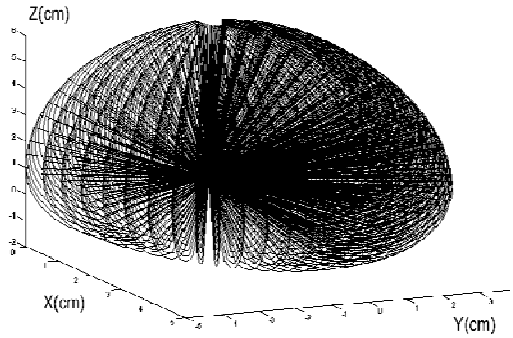
รูปที่ 7 พื้นที่การทำงานมองจากด้านหน้า



รูปที่ 8 พื้นที่การทำงานมองจากด้านข้าง



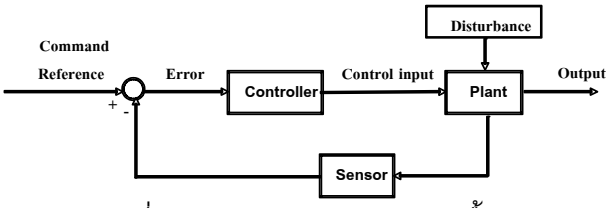
รูปที่ 9 พื้นที่การทำงานมองจากด้านบน



รูปที่ 10 พื้นที่การทำงานแบบ 3 มิติ

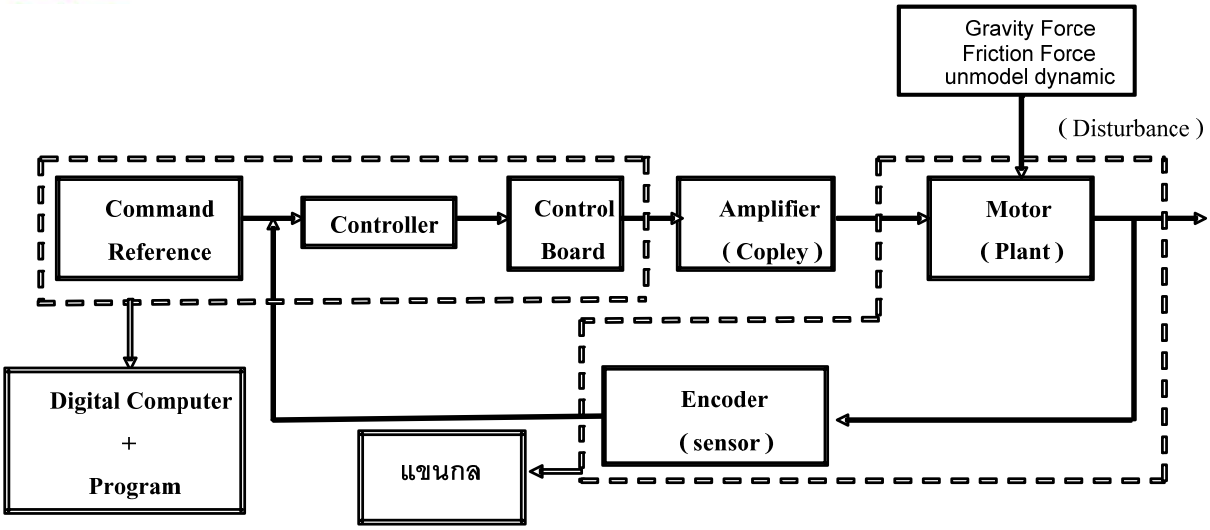
3. การควบคุมตำแหน่งสำหรับแขนกล

ตัวควบคุมสำหรับแขนกลแบบอัตโนมัตินี้ จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบพลศาสตร์ที่จะทำการควบคุม โดยระบบควบคุมแบบอัตโนมัตินี้จะมีส่วนที่ทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดค่าตัวแปร



รูปที่ 11 รูปแบบการควบคุมแบบพื้นฐาน

หรือ State variables จริงของระบบด้วยอุปกรณ์วัด (sensor) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรที่ต้องการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ค่าความแตกต่างนี้จะถูกใช้สำหรับสร้างสัญญาณควบคุมซึ่งจะสามารถลดการเปลี่ยนแปลงหรือลดความผิดพลาดนี้ลง เพื่อให้มีค่าเป็นศูนย์หรือเป็นค่าตัวเลขที่มีขนาดเล็ก การกระทำของระบบควบคุมอัตโนมัติที่สร้างสัญญาณควบคุม (Control signal) นี้เรียกว่ากิริยาควบคุม (Control Action) ตัวควบคุมที่ใช้จะเป็นตัว



รูปที่ 12 ระบบควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ควบคุมแบบ PID (Proportional-Integral-Derivative) รูปที่ 5 แสดงแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ การออกแบบตัวควบคุมก็คือการเลือกค่าเกนที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงการประนีประนอมค่าความเร็วของการตอบสนอง การลดค่าความผิดพลาดจากค่าอ้างอิง และลดค่าโอเวอร์ชูตของการตอบสนอง ตัวควบคุม PID นี้จะมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่ทำงานในรูปแบบ current mode เป็นหลัก เพื่อช่วยให้การตอบสนองเร็วขึ้นและมีความปลอดภัยเมื่อเกิดมีการชนหรือกระแทก นอกจากนั้น ในอนาคตยังสามารถปรับปรุงเพื่อให้สามารถควบคุมแรงกดเข้าร่วมในการเจียระไนด้วย การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID นี้สามารถศึกษารายละเอียดได้จากหนังสือหลายเล่มเช่นเอกสารอ้างอิง [1] เป็นต้น ในทางปฏิบัติแล้วการกำหนดลักษณะเฉพาะสำหรับการออกแบบระบบควบคุมที่ใช้ในตัวควบคุมของแขนกลมีรายละเอียดมากกว่านี้ เช่น การกำหนดความกว้างแถบ (Bandwidth) ที่ทำให้ระบบมีความปลอดภัย ความปลอดภัยในที่นี้หมายถึง ระบบปลอดภัยจากการที่ระบบจะไม่มีเสถียรภาพ หรือไม่มีความสมดุล ซึ่งไม่สามารถรู้ได้แน่ชัดเลย เกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ของระบบเครื่องเจียระไนพลอย ว่ามีค่าถูกต้องแม่นยำหรือมีความแน่นอนเท่าไรตามค่าที่เราใช้ในสมการจำลองการทำงานของระบบ ระบบควบคุมหรือตัวควบคุม (Controller) ชนิดต่าง ๆ หรือที่มีรูปแบบต่างกันเช่นตัวควบคุมแบบ P, PD, PID เป็นต้น) ก็สามารถออกแบบให้ระบบรวมมีความไว (sensitivity) มากน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการออกแบบบางครั้งอาจจะต้องครอบคลุมถึงความไว (sensitivity) ของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ของระบบด้วย เพื่อทำให้ระบบควบคุมโดยรวมมีความปลอดภัยเมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงในขณะที่ระบบกำลังทำงาน

3.2 รูปแบบของสัญญาณอ้างอิงที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่

รูปแบบของสัญญาณอ้างอิงที่ใช้คือ สัญญาณเชิงเส้นผสมพาราโบลา (Linear function with parabolic blend) การเคลื่อนที่แบบนี้จะทำให้ในการเริ่มต้นเคลื่อนนั้นความเร็วจะเป็นศูนย์แล้วค่อย ๆเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับขณะถึงจุดปลาย ความเร็วจะค่อย ๆลดลงจนความเร็วเป็นศูนย์ มีผลให้การเคลื่อนที่ราบเรียบและนุ่มนวลดังรูปที่ 13

ช่วงที่1 (t0 - tb) หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ

$$\theta = \theta_0 + 0.5\ddot{\theta}t^2$$

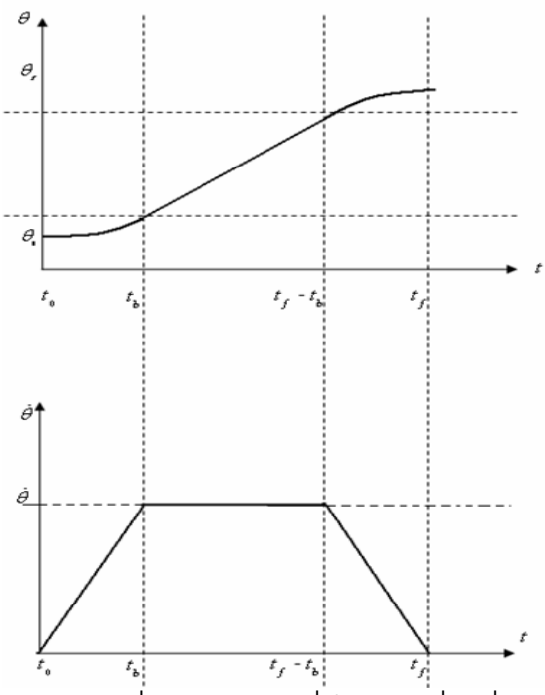
ช่วงที่2 (tb - tf-tb) หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ

$$\theta = \theta_0 + \dot{\theta}(t - .05t_b)$$

ช่วงที่3 (tf-tb - tf) หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ

$$\theta = \theta_0 - 0.5\ddot{\theta}(t^2 - (t_f - t_b)^2) + \dot{\theta}(t - 0.5t_b) + \ldots$$

$\ddot{\theta}t(t_f - t_b)$



รูปที่ 13 รูปแบบคำสั่งในการเคลื่อนที่

$\theta = \theta_0 + \dot{\theta}(t - .05t_b)$

ช่วงที่3 (tf-tb - tf) หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ

$\theta = \theta_0 - 0.5\ddot{\theta}(t^2 - (t_f - t_b)^2) + \dot{\theta}(t - 0.5t_b) + ...$

$\ddot{\theta}t(t_f - t_b)$

หาความเร่งในการเคลื่อนที่จาก

$$\ddot{\theta} = \frac{4(\theta_f - \theta_0)}{t^2} + 1$$

หาตำแหน่งเวลาของการเปลี่ยนกราฟ t_b จาก

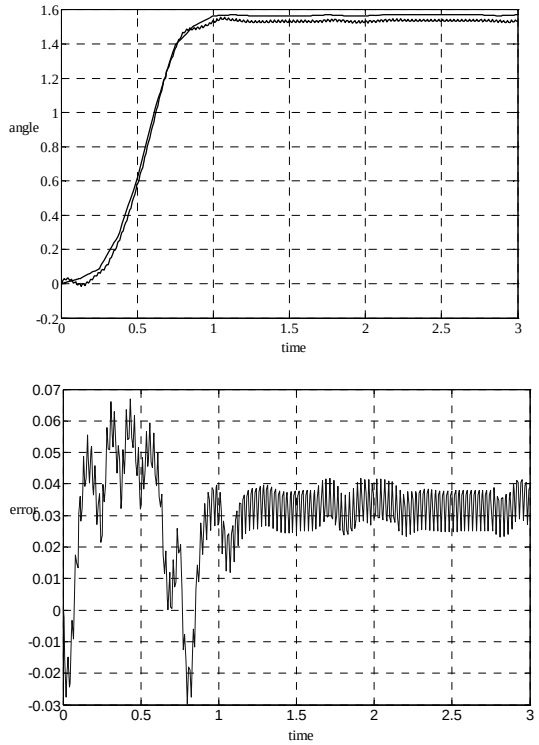
$$t_b = \frac{t}{2} - \frac{\sqrt{\ddot{\theta}t^2 - 4\ddot{\theta}(\theta_f - \theta_0)}}{2\ddot{\theta}}$$

หาความเร็วในช่วงความเร็วคงที่จาก

$\dot{\theta} = \ddot{\theta}t_b$

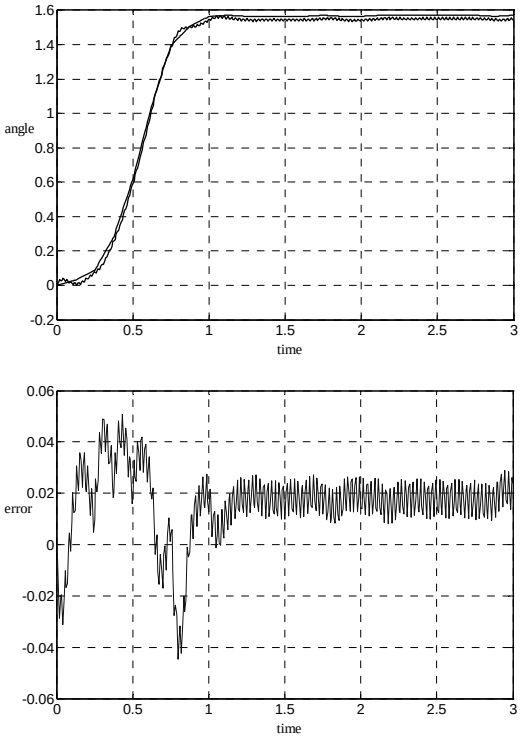
4. การทดสอบการเคลื่อนที่

การทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลกำหนดโดยการสั่งให้มอเตอร์ของแขนกลทั้งสามหมุนไปยังมุมที่กำหนด โดยคำสั่งมุมที่ป้อนให้กับระบบควบคุมแขนกลจะถูกส่งทุกๆ 1 มิลลิวินาที ค่ามุมในแต่มิลลิวินาทีหาได้จากสมการในหัวข้อที่ 3.2 โดยระบบควบคุมที่ใช้เป็นระบบควบคุมแบบ พีไอดี และชดเชยแรงโน้มถ่วงของโลก การทดสอบการเคลื่อนที่ไปของแขนกลกระทำดังนี้ บังคับให้แขนกลเคลื่อนที่ไปโดยให้แกนของแขนกลทั้งสามแกนหมุนไปเป็นมุม 90 องศา ด้วยความเร็วเชิงมุมเฉลี่ย 90 องศาต่อวินาที

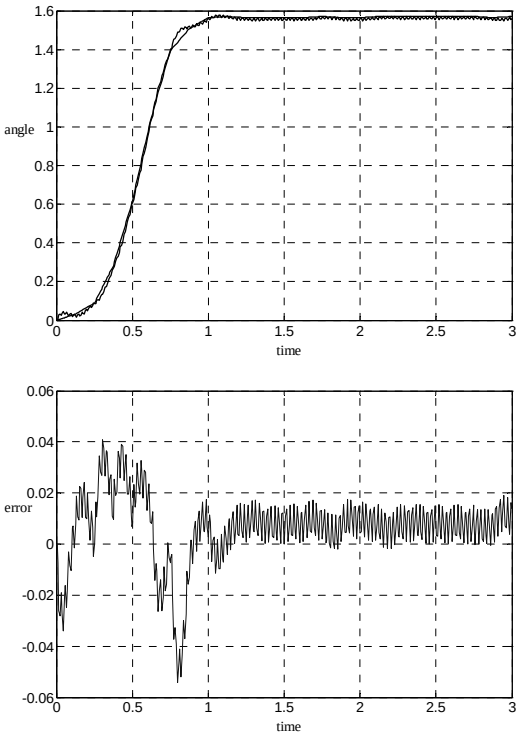


รูปที่ 14 ผลการทดสอบแกนที่ 1 (บน)ตำแหน่งมุมที่เคลื่อนที่จริงกับตำแหน่งอ้างอิง (ล่าง)ค่าความผิดพลาดของมุมที่เกิดขึ้น

จากกราฟในรูปที่ 14 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของแกนที่ 1 พบว่ามีโอเวอร์ชูตเกิดขึ้นในช่วงแรกของการเคลื่อนที่เล็กน้อย หลังจากนั้นแขนกลจึงเข้าสู่ค่ามุมอ้างอิงโดยค่าความผิดพลาดของมุมที่สภาวะคงตัวประมาณ 0.03 องศา จากกราฟในรูปที่ 15 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของแกนที่ 2 พบว่ามีโอเวอร์ชูตเกิดขึ้นในช่วงแรกของการเคลื่อนที่เล็กน้อย หลังจากนั้นแขนกลจึงเข้าสู่ค่ามุมอ้างอิงโดยค่าความผิดพลาดของมุมที่สภาวะคงตัวประมาณ 0.02 องศา จากกราฟในรูปที่ 16 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของแกนที่ 3 พบว่ามีโอเวอร์ชูตเกิดขึ้นในช่วงแรกของการเคลื่อนที่เล็กน้อย หลังจากนั้นแขนกลจึงเข้าสู่ค่ามุมอ้างอิงโดยค่าความผิดพลาดของมุมที่สภาวะคงตัวประมาณ 0.01 องศา



รูปที่ 15 ผลการทดสอบแกนที่ 2 (บน)ตำแหน่งมุมที่เคลื่อนที่จริงกับตำแหน่งอ้างอิง (ล่าง)ค่าความผิดพลาดของมุมที่เกิดขึ้น



รูปที่ 16 ผลการทดสอบแกนที่ 3 (บน)ตำแหน่งมุมที่เคลื่อนที่จริงกับตำแหน่งอ้างอิง (ล่าง)ค่าความผิดพลาดของมุมที่เกิดขึ้น

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบแขนกลแบบสามแกนเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงตามที่กำหนด ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทำงานของระบบส่งผ่านกำลังแบบ Tendon-Pulley สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพไม่มีการไถลเกิดขึ้นระหว่างลวดสลิงและมูเล่
2. ความผิดพลาดของแขนกลที่สภาวะคงตัวมีค่าไม่เกิน 1 มิลลิเมตรโดยวัดตำแหน่งที่ปลายแขนกลในทุกการทดสอบ
3. ความเร็วเชิงมุมสูงสุดของแขนกลที่เหมาะสมในการใช้งานมีค่าไม่เกิน 90 องศาต่อวินาทีเนื่องจากถ้าความเร็วเชิงมุมมากกว่านี้การเคลื่อนที่ของแขนกลจะเกิดโอเวอร์ชูตมากเกินไปถึงแม้ว่าจะปรับค่าเกนของระบบควบคุมให้เหมาะสมแล้วก็ตาม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริที่ได้ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการการทำวิจัยและ สวพ. มก.ฉกส. ที่ให้ทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

7.1 บทความจากวารสาร (Journal)

[1] Sangveraphunsiri, V., Ngamvilaikorn, T. (2005). Design and Analysis of A 6-DOF Haptic Device for Teleoperation Using the Singular-free Parallel Mechanism. Thammasat International Journal of Science and Technology, pp. 60-70.

7.2 บทความจากเอกสารประกอบการประชุม (Proceedings)

[1] Sangveraphunsiri, V., Ngamvilaikorn, T. (2002). Design and Development of a Six DOF Master-Slave Human Assisted Manipulator Arm. JSAE Annual Congress.Yokohama Japan.

[2] Sangveraphunsiri, V., Ngaojaruwong, T. (2004). Design and Analysis of A 6-DOF Haptic Device Using the Singular-free Parallel Mechanism. Proc. The Third AUN/SEED-NET

FILEDWISE SEMINAR in Manufacturing and Material Processing. KualaLumpur Malaysia.

7.3 หนังสือ

[1] วิบูลย์ แสวีระพันธุ์ศิริ (2548). การควบคุมระบบพลศาสตร์ ,พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[2] Craig J.J. 1986. Introduction to Robotic, Mechanics and Control. 2nd Edition: Addison Wesley.

[3] Tsai, L. 1999. Robot Analysis The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. A Wiley-Interscience Publication.

[4] Ngamvilaikorn, T. 2002. Design and Development of a Master arm for Force-Reflecting system. Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, April 2002.