

การออกแบบและการควบคุมแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจิวต์

Design and Control of a Stewart Platform Manipulator

รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ ร.อ.ประสาทพร วงษ์คำซัง
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พญาไท กรุงเทพฯ 10330
โทร 022186389, โทรสาร 022521513, E-Mail Viboon.s@eng.chula.ac.th

Viboon Sangveraphunsiri and Prasartporn Wongkamchang
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Tel: 022186389, Fax: 022521513

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนของการพัฒนาหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่มีโครงสร้างเป็นแบบขนาน รูปทรงของโครงสร้างนี้มีชื่อว่าโครงสร้างแบบสจิวต์ (Stewart platform) ซึ่งประกอบด้วยส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่ โดยทั้งสองส่วนมีลักษณะเป็นแผ่นรูป 6 เหลี่ยม และมีตัวขับเคลื่อนที่เคลื่อนที่แบบเชิงเส้นจำนวน 6 ชุดเชื่อมต่อกับส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่ ทำให้ส่วนที่เคลื่อนที่นี้สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ (6 Degree of Freedom) ในการออกแบบโครงสร้างนั้นพิจารณาจากวิธีการวิเคราะห์วงรีของความเฉื่อย (Inertia Ellipsoid) การทดลองจะครอบคลุมถึงการหา Inverse Kinematics และการประมาณค่า Forward Kinematics ซึ่งผลการทดลองได้ผลเป็นที่น่าพอใจโดยคำนึงถึงความเร็วและความผิดพลาดของการเคลื่อนที่

Abstract

This work is a part of the design and development of the parallel manipulator arm, the Stewart platform. The configuration is consisted of a base frame and a motion frame. Both frames are hexagons. There are six linear actuators connect both frames to form a six degree of freedom manipulator arm. The inertia ellipsoid will be applied for helping in analyzing and designing the structure. The Inverse kinematics and the approximate of the forward kinematics are explored. From the experimental results, the motion and accuracy obtained indicate the promising of the development.

1. บทนำ

การพัฒนากระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพนั้นเป็นปัจจัยหลักของการแข่งขันในอุตสาหกรรม ซึ่งการแข่งขันนี้เป็นตัวขับเคลื่อนให้เกิดการพัฒนาในด้านความเร็ว ความถูกต้อง และ ความสามารถของเครื่องจักรให้ทำงานได้หลายอย่าง จึงเป็นแรงบันดาลใจให้นักวิจัยได้

ทำการพัฒนาและคิดค้นเครื่องจักรแบบใหม่ๆ ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาหุ่นยนต์มาใช้งานในอุตสาหกรรมดังที่เราสามารถพบเห็นในปัจจุบันนี้ และหุ่นยนต์ที่มีใช้ทั่วไปนั้นเรียกว่า "Serial Robot Manipulator" ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างคือที่ปลายของแขนกลแต่ละส่วนนั้นจะเชื่อมกันด้วยข้อต่อ หุ่นยนต์แบบนี้เป็นที่นิยมแพร่หลายในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก นอกจากหุ่นยนต์แบบเปิดหรืออนุกรมนี้แล้ว ก็ยังมีหุ่นยนต์อีกรูปแบบหนึ่งที่เรียกว่าหุ่นยนต์แบบขนาน หรือ "Parallel Robot Manipulator" ซึ่งกำลังได้รับความสนใจมากในขณะนี้เช่นเดียวกัน หุ่นยนต์แบบขนานนี้มีคุณสมบัติที่ได้เปรียบหุ่นยนต์แบบ Serial Robot คือ มีโครงสร้างที่มีความแข็งแรงกว่า สามารถที่จะรับแรงหรือทอร์กที่สูงกว่าเนื่องจากแรงนั้นจะกระจายไปบนตัวขับเคลื่อนแต่ละตัวของหุ่นยนต์ และมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า จากข้อได้เปรียบดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาให้หุ่นยนต์แบบขนานนี้นำมาใช้งานมากยิ่งขึ้น

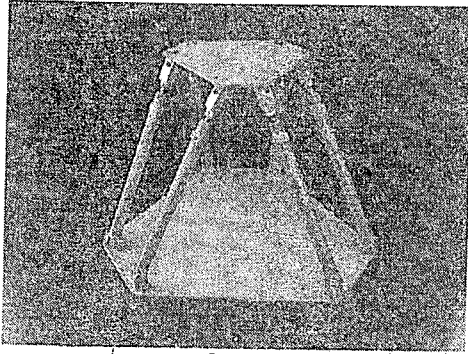
แขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจิวต์ (Stewart Platform Manipulator) นั้นเป็นหุ่นยนต์แบบขนานแบบหนึ่งซึ่งถูกนำเสนอครั้งแรกโดย D. Stewart ในปี ค.ศ.1965 เขาใช้ในการพัฒนาโครงสร้างของเครื่องจำลองการบิน (Flight Simulator) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ (Degree of freedom) และในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาโครงสร้างแบบนี้มาพัฒนาเพื่อใช้งานด้านต่างๆ เช่น เครื่องกัดที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องจำลองการบิน เป็นต้น

2. หุ่นยนต์แบบขนาน (Parallel Robot Manipulator)

หุ่นยนต์แบบขนาน (Parallel Robot Manipulator) นั้นเป็นโครงสร้างแบบปิดซึ่งปลายของแขนกล (End effector) เชื่อมต่อกับฐานโดยใช้ตัวขับเคลื่อนแบบเส้นตรง (Linear Actuator) ตัวขับเคลื่อนนี้จะเชื่อมต่อระหว่างฐานกับส่วนที่เคลื่อนที่โดยข้อต่อที่มีอิสระในการเคลื่อนที่อย่างน้อย 2 ทิศทาง จำนวนองศาอิสระ (Degree of freedom) ของโครงสร้างแบบขนานนี้มีจำนวนเท่ากับจำนวนของตัวขับเคลื่อนที่เชื่อมติดกับ

ฐานของตัวหุ่นยนต์ ในปัจจุบันนี้ได้มีการออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์แบบขนานนี้เพื่อนำมาใช้งานด้านต่างๆ เป็นจำนวนมาก

แขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต (Stewart Platform Manipulator) นั้นที่เราให้ความสนใจอยู่นี้เป็นหุ่นยนต์แบบขนานที่มีลักษณะแสดงในรูปที่ 1 มีอิสระในการเคลื่อนที่ได้ 6 ทิศทาง โดยจะเป็นตำแหน่ง (position) 3 ทิศทางและการเรียงตัว (Orientation) อีก 3 ทิศทาง



รูปที่ 1 แขนกลโครงสร้างแบบสจ๊วต

จากรูปที่ 1 แผ่นด้านบนนั้นจะเชื่อมติดกับส่วนที่เป็นฐานโดยตัวขับเคลื่อนที่เคลื่อนที่แบบเชิงเส้นจำนวน 6 ชุด ในการควบคุมตำแหน่งและการเรียงตัว (Orientation) กระทำได้โดยการเปลี่ยนความยาวของตัวขับเคลื่อนทั้ง 6 ชุดนี้ เพื่อให้ส่วนที่เคลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งและทิศทางที่เรากำหนดได้

3. การวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่

3.1 คิเนมาติกส์แบบผกผัน (The Inverse Kinematics)

เมื่อกำหนดตำแหน่งและทิศทางของจุดกึ่งกลางของปลายแขนกลที่ต้องการคือทำกับ x, y, z, α, β และ γ โดยที่ α, β และ γ คือมุม roll, pitch และ yaw ตามลำดับ จากตำแหน่งที่กำหนดให้ดังกล่าว เราสามารถนำมาคำนวณหาความยาวที่ตัวขับเคลื่อนแบบเชิงเส้นนั้นจะต้องเคลื่อนที่ไปได้จากสมการต่อไปนี้

$$l_i^2 = x^2 + y^2 + z^2 + r_p^2 + r_b^2 + 2(r_{11}p_{ix} + r_{12}p_{iy})(x - b_{ix}) + 2(r_{21}p_{ix} + r_{22}p_{iy})(y - b_{iy}) + 2(r_{31}p_{ix} + r_{32}p_{iy})z - 2(xb_{ix} + yb_{iy})$$

เมื่อ x, y, z เป็นตำแหน่งอ้างอิงที่เราต้องการ ส่วนทิศทางที่ต้องการนั้นกำหนดโดย Roll (α)-Pitch (β)-Yaw (γ) angles ดังนั้น

$${}^B_P R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\gamma - \sin\alpha\gamma & \cos\alpha\sin\beta\gamma + \sin\alpha\gamma \\ \sin\alpha\cos\beta & \sin\alpha\sin\beta\gamma + \cos\alpha\gamma & \sin\alpha\sin\beta\gamma - \cos\alpha\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta\gamma & \cos\beta\gamma \end{bmatrix}$$

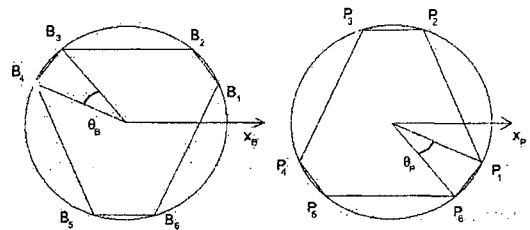
กำหนด r_p และ r_b คือรัศมีของส่วนที่เคลื่อนที่ (End-effector) และส่วนที่อยู่กับที่ (Base) ตามลำดับ และให้ตำแหน่งของส่วนที่เคลื่อนที่ P_i บนระนาบ $\{P\}$ เขียนแทนด้วย ${}^P P_i = [p_{ix} \ p_{iy} \ p_{iz}]^T$ และตำแหน่งของ B_i บนระนาบ $\{B\}$ เขียนแทนด้วย ${}^B B_i = [b_{ix} \ b_{iy} \ b_{iz}]^T$

3.2 คิเนมาติกส์แบบเดินหน้า (The Forward Kinematics)

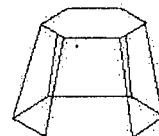
เมื่อกำหนดความยาวของตัวขับเคลื่อนแต่ละตัวคือ l_i เมื่อ $i=1, 2, \dots, 6$ เราสามารถหาตำแหน่ง x, y, z และทิศทางคือมุม α, β, γ โดยใช้หลักการของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) รายละเอียดตามเอกสารอ้างอิงที่ [2]

4. การออกแบบแขนกล

ในการออกแบบแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตนั้น ในตอนแรกจะทำการศึกษเกี่ยวกับโครงสร้างแขนกลแบบสจ๊วตที่มีรูปแบบต่าง ๆ โดยแบบที่จะทำการศึกษานั้นมี 3 แบบ แต่ละแบบจะมีรูปร่างที่แตกต่างกันตามมุมระหว่างเส้นตรงที่ลากผ่านจุดกึ่งกลางของส่วนฐานไปยังจุดต่างๆทั้ง 6 จุดที่อยู่บนส่วนฐาน (θ_B) และมุมระหว่างเส้นตรงที่ลากผ่านจุดกึ่งกลางของส่วนเคลื่อนที่ไปยังจุดต่างๆทั้ง 6 จุดที่อยู่บนส่วนเคลื่อนที่ (θ_P) ดังรูปที่ 2 รูปที่ 3 แสดงรูปโครงสร้างของแขนกลแบบสจ๊วตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุม θ_B และค่ามุม θ_P ซึ่งในการออกแบบนั้นจะพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบต่าง ๆ เหล่านี้



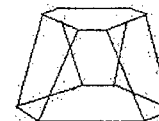
รูปที่ 2 มุม θ_B ที่อยู่บนส่วนฐานและมุม θ_P บนส่วนที่เคลื่อนที่



โครงสร้างแบบที่ 1

$$\theta_B = 0^\circ$$

$$\theta_P = 0^\circ$$



โครงสร้างแบบที่ 2

$$\theta_B = 30^\circ$$

$$\theta_P = 30^\circ$$



โครงสร้างแบบที่ 3

$$\theta_B = 30^\circ$$

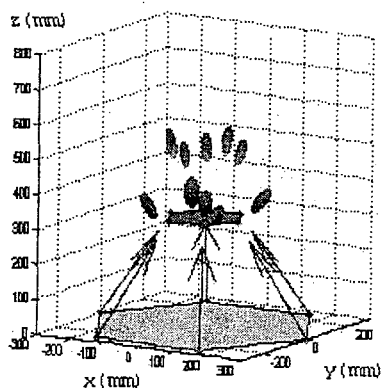
$$\theta_P = 60^\circ$$

รูปที่ 3 โครงสร้างของแขนกลแบบสจ๊วตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุม θ_B และค่ามุม θ_P

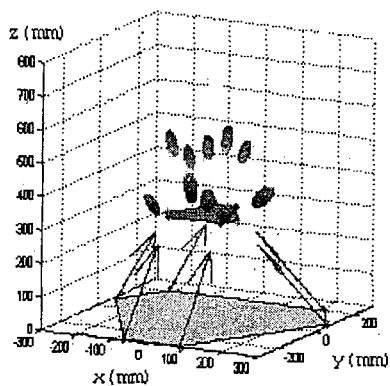
5. Manipulability Ellipsoid

ในการออกแบบโครงสร้างของแขนกลนั้นจะใช้ทฤษฎีของการเคลื่อนที่ หรือ Manipulability Ellipsoid ซึ่งเป็นการสร้างรูปทรงรีโดยแกนหลักคือค่าเวกเตอร์เจาะจงของเมตริกซ์ที่กำลังสนใจ การออกแบบจะทำการพิจารณา ณ จุดต่างๆ ในพื้นที่การทำงานของแขนกล โดยดูว่ารูปร่างของ Manipulability Ellipsoid นั้นมีลักษณะเป็นอย่างไร โครงสร้างของแขนหุ่นยนต์ที่ดีนั้นจะต้องพยายามทำให้รูปทรงรี ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กันมีลักษณะใกล้เคียงทรงกลมมากที่สุด ซึ่งหมายความว่าแขนกลความสามารถในการถูกขับเคลื่อนที่แต่ละทิศทางไม่แตกต่างกันมากเกินไป ในการศึกษาวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างของแขนกลจะใช้ทฤษฎีของการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการบอกถึงประสิทธิภาพของแขนกลคือ Force Manipulability Ellipsoid นอกจาก Force Manipulability Ellipsoid แล้ว ยังมีแบบอื่นอีกเช่น Velocity Manipulability Ellipsoid เป็นต้น

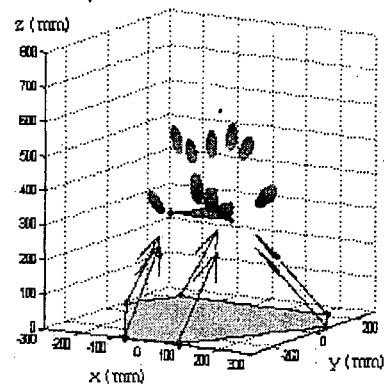
Force Manipulability Ellipsoid หมายถึง ความสามารถในการรับแรงที่ปลายของแขนกลเนื่องมาจากการส่งถ่ายแรงจากกลุ่มของตัวขับของแขนกล โดยความสัมพันธ์นี้แทนด้วยรูปทรงรีเช่นเดียวกับ Velocity manipulability ellipsoid แต่แตกต่างกันในส่วนของคุณค่าเจาะจงและเวกเตอร์เจาะจงนั้นคำนวณจากเมตริกซ์ $J(q)J^T(q)$ เมื่อ $J(q)$ แทนเมตริกซ์จาโคเบียนของแขนกล รายละเอียดตามเอกสารอ้างอิงที่ [6] จากการวิเคราะห์โครงสร้างของแขนกลแบบสจิวต์ ในการเลือกแบบที่จะสร้างนั้นพิจารณาจากโครงสร้าง 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 4 - 6



รูปที่ 4 Force ellipsoid ของโครงสร้างแบบที่ 1



รูปที่ 5 Force ellipsoid ของโครงสร้างแบบที่ 2

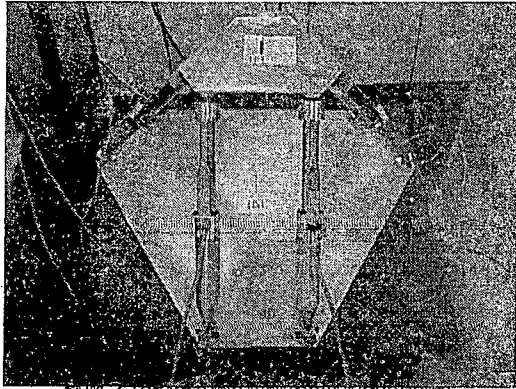


รูปที่ 6 Force ellipsoid ของโครงสร้างแบบที่ 3

จากรูปที่ 4-6 นั้นแสดงถึงรูปทรงรีของแรงของโครงสร้างทั้ง 3 แบบ จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าแขนกลแบบที่ 2 และแบบที่ 3 นั้นมีรูปทรงรีของความเฉื่อยใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับทรงกลมมากกว่าแบบอื่น แต่อย่างไรก็ตามในการสร้างแขนกลตามโครงสร้างแบบที่ 3 นั้นค่อนข้างที่จะสร้างได้ลำบาก เนื่องจากส่วนที่เคลื่อนที่นั้นเป็นรูปสามเหลี่ยมในการนำตัวขับทั้งสองตัวมาเชื่อมต่อกับส่วนนี้นั้นจะต้องออกแบบข้อต่อเป็นพิเศษ ดังนั้นในการพัฒนาแขนกลนี้เราจึงเลือกแบบที่ 2

Velocity Manipulability Ellipsoid หมายถึง ความสามารถในการเปลี่ยนตำแหน่งของปลายแขนกลไปยังตำแหน่งต่างๆ ภายในพื้นที่การทำงาน ซึ่งจะสัมพันธ์กับความเร็วของตัวขับของแขนกล ความสัมพันธ์นี้จะแสดงได้ด้วยรูปทรงรีโดยความยาวของแกนหลักจะมีขนาดเท่ากับรากที่สองของคุณค่าเจาะจง (Eigenvalue) และมีทิศทางไปตามเวกเตอร์เจาะจง (Eigenvector) ของเมตริกซ์ $J^{-1}(q)J^{-T}(q)$ เมื่อ $J(q)$ แทนเมตริกซ์จาโคเบียนของแขนกล จะเห็นว่า Velocity Manipulator Ellipsoid นั้นเป็นส่วนกลับของ Force Manipulator Ellipsoid ซึ่งจะยังไม่กล่าวถึงในบทความนี้

โครงสร้างของแขนกลแบบจุฬา-สจิวต์ (Chula-Stewart Parallel Platform) ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 7 ทั้งนี้เนื่องจากว่าถ้าเราศึกษาในเรื่องของ Inertia Ellipsoid แล้วเราจะพบว่าแบบที่ 2 นี้มี Inertia Ellipsoid เหมาะสมที่สุด ซึ่งหมายความว่าความควบคุมเชิงพลศาสตร์นั้นในแบบที่ 2 นี้มีการกระจายความหน่วง (Inertia) หรือแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์มีขนาดใกล้เคียงกันในทุกทิศทางเคลื่อนที่ต่าง ๆ ที่แขนกลแบบสจิวต์แบบนี้สามารถเคลื่อนที่ครอบคลุมได้



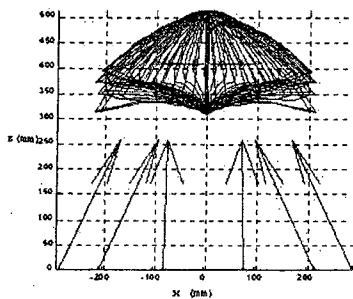
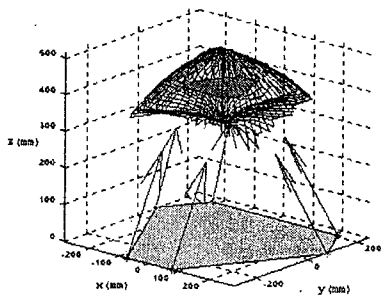
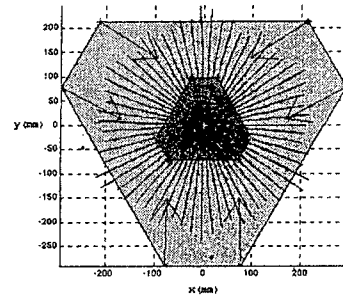
รูปที่ 7 โครงสร้างของแขนกลแบบสจวิดจุฬา

6. พื้นที่การทำงาน (Workspace)

ในการคำนวณหาพื้นที่การทำงานของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจวิดนั้น จะมีเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

- 1) ระยะการเคลื่อนที่ที่จำกัดของตัวขับ
- 2) มุมที่ข้อต่อสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุด
- 3) การชนกันระหว่างตัวขับแต่ละตัว

จากเงื่อนไขทั้งสามประการนี้สามารถนำไปเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการตรวจสอบว่าตำแหน่งที่กำหนดนั้นอยู่ภายในพื้นที่การทำงานหรือไม่ และเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการค้นหาขอบเขตพื้นที่การทำงานของแขนกลรายละเอียดตามเอกสารอ้างอิงที่ [7] เมื่อทำการทดสอบโปรแกรมที่ตำแหน่งที่กำหนดให้การเรียงตัวหรือ Orientation ของส่วนที่เคลื่อนที่ให้มีค่าคงที่ โดยให้เท่ากับ $\text{roll}=0^\circ$, $\text{pitch}=0^\circ$, $\text{yaw}=0^\circ$ ผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 8 - 10

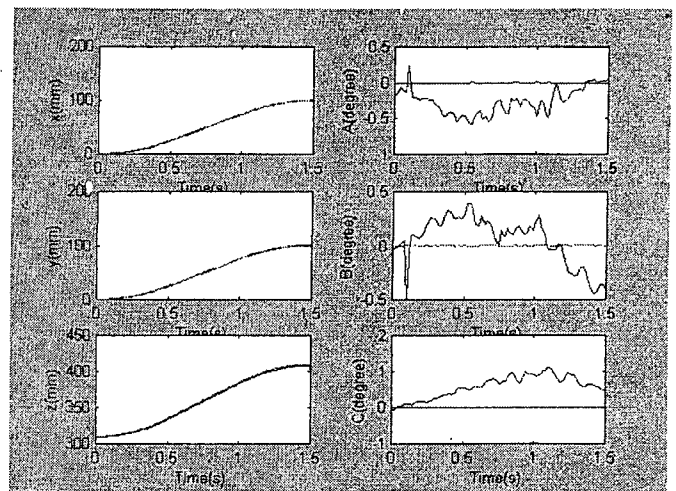
รูปที่ 8 ภาพด้านข้างของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจวิดที่ทิศทาง $\text{roll}=0^\circ$, $\text{pitch}=0^\circ$, $\text{yaw}=0^\circ$ รูปที่ 9 ภาพสามมิติของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจวิดที่ทิศทาง $\text{roll}=0^\circ$, $\text{pitch}=0^\circ$, $\text{yaw}=0^\circ$ รูปที่ 10 ภาพด้านบนของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจวิดที่ทิศทาง $\text{roll}=0^\circ$, $\text{pitch}=0^\circ$, $\text{yaw}=0^\circ$

7. การทดสอบ

การทดสอบเพื่อดูความละเอียดและความแม่นยำในการขับเคลื่อนโดยการควบคุมตำแหน่งของตัวขับเคลื่อนแต่ละตัว ในตอนเริ่มต้นจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่ (Moving frame) ของแขนกลจะอยู่ที่ตำแหน่ง HOME ซึ่งที่ตำแหน่งนี้อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0$, $y = 0$, $z = 310$ mm, $\text{roll} = 0^\circ$, $\text{pitch} = 0^\circ$, $\text{yaw} = 0^\circ$ และทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของส่วนที่เคลื่อนที่โดยกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งและทิศทางแต่ละจุดของเส้นทางตลอดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วและความเร่งที่กำหนด การทดสอบนั้นจะทำการกำหนดตำแหน่งและทิศทางของการเคลื่อนที่ทั้งหมด 5 ตำแหน่ง คือ

7.1 ตำแหน่งที่ 1 การเคลื่อนที่แบบเลื่อนตัว (Sliding motion)

ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง $x = 100$, $y = 100$, $z = 410$ mm, $\text{roll} = 0^\circ$, $\text{pitch} = 0^\circ$, $\text{yaw} = 0^\circ$ ด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที และความเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.2 เมตร/วินาที² ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 11

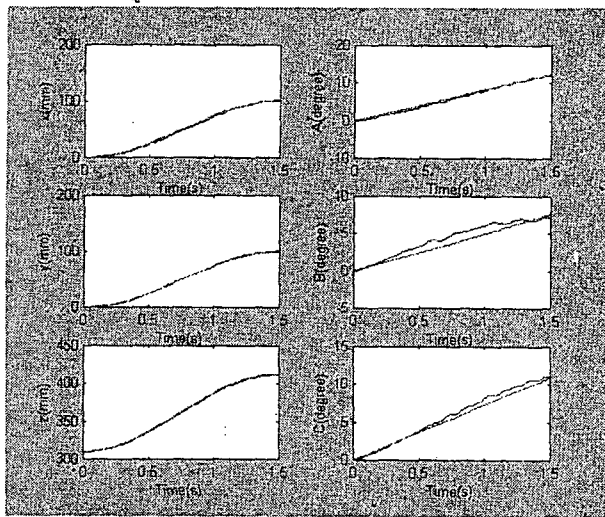
รูปที่ 11 ผลการทดลองเมื่อปลายแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่ง $x = 100$, $y = 100$, $z = 410$ mm

รูปที่ 11 เป็นการทดสอบการเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่โดยลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะตามแนวแกน x

= 100, $y = 100$, $z = 100$ mm โดยไม่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนคือรักษามุมของส่วนที่เคลื่อนที่ไว้คงที่เท่ากับ $\text{roll} = 0^\circ$, $\text{pitch} = 0^\circ$, $\text{yaw} = 0^\circ$ จะเห็นว่าส่วนที่เคลื่อนที่นั้นสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้แต่จะมีค่าผิดพลาดในระหว่างการเคลื่อนที่โดยมีความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน x เท่ากับ 1.5 มม. ความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน y เท่ากับ 1.5 มม. ความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน z เท่ากับ 2.0 มม. ความผิดพลาดสูงสุดของมุม roll เท่ากับ 1.1 องศา ความผิดพลาดสูงสุดของมุม pitch เท่ากับ 0.5 องศา ความผิดพลาดสูงสุดของมุม yaw เท่ากับ 0.6 องศา

7.2 ตำแหน่งที่ 2 การเคลื่อนที่แบบเลื่อนตัวและแบบหมุน

ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง $x = 100$, $y = 100$, $z = 410$ mm, $\text{roll} = 10^\circ$, $\text{pitch} = 10^\circ$, $\text{yaw} = 10^\circ$ ด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที และความเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.2 เมตร/วินาที² ความเร็วเชิงมุมสูงสุดเท่ากับ 10 องศา/วินาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 12

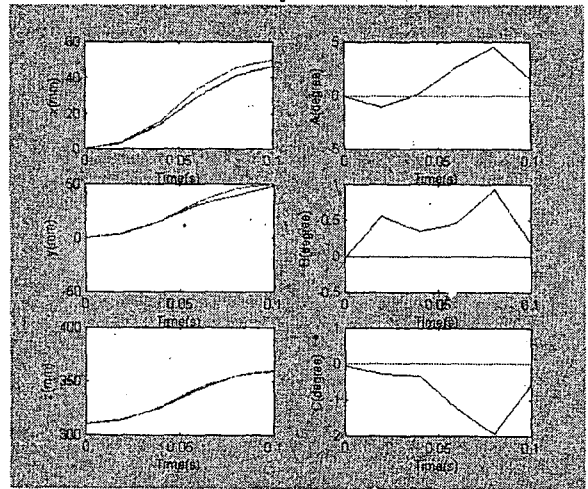


รูปที่ 12 ผลการทดลองเมื่อปลายแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่ง $x = 100$, $y = 100$, $z = 410$ mm, $\text{roll} = 10^\circ$, $\text{pitch} = 10^\circ$, $\text{yaw} = 10^\circ$

รูปที่ 12 เป็นการทดสอบการเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่โดยลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะตามแนวแกน $x = 100$, $y = 100$, $z = 100$ mm และมีการเคลื่อนที่แบบหมุนโดยมุมของส่วนที่เคลื่อนที่หมุนเป็นมุมเท่ากับ $\text{roll} = 10^\circ$, $\text{pitch} = 10^\circ$, $\text{yaw} = 10^\circ$ จะเห็นว่าส่วนที่เคลื่อนที่นั้นสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้แต่จะมีค่าผิดพลาดในระหว่างการเคลื่อนที่โดยมีความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน x เท่ากับ 2.8 มม. ความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน y เท่ากับ 1.4 มม. ความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน z เท่ากับ 1.6 มม. ความผิดพลาดสูงสุดของมุม roll เท่ากับ 1.0 องศา ความผิดพลาดสูงสุดของมุม pitch เท่ากับ 1.3 องศา ความผิดพลาดสูงสุดของมุม yaw เท่ากับ 0.3 องศา

7.3 ตำแหน่งที่ 3 การเคลื่อนที่แบบเลื่อนตัว

ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง $x = 50$ mm, $y = 50$ mm, $z = 360$ mm, $\text{roll} = 0^\circ$, $\text{pitch} = 0^\circ$, $\text{yaw} = 0^\circ$ ด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1 เมตร/วินาที และความเร่งสูงสุดเท่ากับ 20 เมตร/วินาที² ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 13

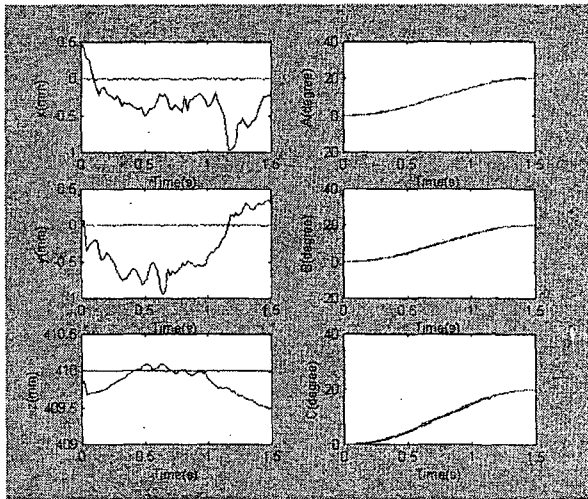


รูปที่ 13 ผลการทดลองเมื่อปลายแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่ง $x = 50$ mm, $y = 50$ mm, $z = 360$ mm

รูปที่ 13 เป็นการทดสอบการเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่โดยลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะตามแนวแกน $x = 50$, $y = 50$, $z = 50$ mm โดยไม่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน แต่มีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที จะเห็นว่าส่วนที่เคลื่อนที่นั้นสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้แต่จะมีค่าผิดพลาดในระหว่างการเคลื่อนที่โดยมีความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน x เท่ากับ 4.8 มม. ความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน y เท่ากับ 6.8 มม. ความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน z เท่ากับ 1.1 มม. ความผิดพลาดสูงสุดของมุม roll เท่ากับ 4.5 องศา ความผิดพลาดสูงสุดของมุม pitch เท่ากับ 0.9 องศา ความผิดพลาดสูงสุดของมุม yaw เท่ากับ 2.0 องศา

7.4 ตำแหน่งที่ 4 การเคลื่อนที่แบบหมุน

ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง $x = 0$, $y = 0$, $z = 410$ mm, $\text{roll} = 0^\circ$, $\text{pitch} = 0^\circ$, $\text{yaw} = 0^\circ$ ไปยังตำแหน่ง $x = 0$, $y = 0$, $z = 410$ mm, $\text{roll} = 20^\circ$, $\text{pitch} = 20^\circ$, $\text{yaw} = 20^\circ$ ด้วยความเร็วเชิงมุมสูงสุดเท่ากับ 20 องศา/วินาที และความเร่งเชิงมุมสูงสุดเท่ากับ 40 องศา/วินาที² ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ผลการทดลองเมื่อปลายแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่ง roll = 20°, pitch = 20°, yaw = 20°

รูปที่ 14 เป็นการทดสอบการเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่โดยลักษณะการเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ xy และไม่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน จะเห็นได้ว่าส่วนที่เคลื่อนที่นั้นสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้แต่จะมีค่าผิดพลาดในระหว่างการเคลื่อนที่โดยมีความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน x เท่ากับ 4.4 มม. ความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน y เท่ากับ 6.6 มม. ความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน z เท่ากับ 2.0 มม. ความผิดพลาดสูงสุดของมุม row เท่ากับ 1.3 องศา ความผิดพลาดสูงสุดของมุม pitch เท่ากับ 2.2 องศา ความผิดพลาดสูงสุดของมุม yaw เท่ากับ 2.0 องศา

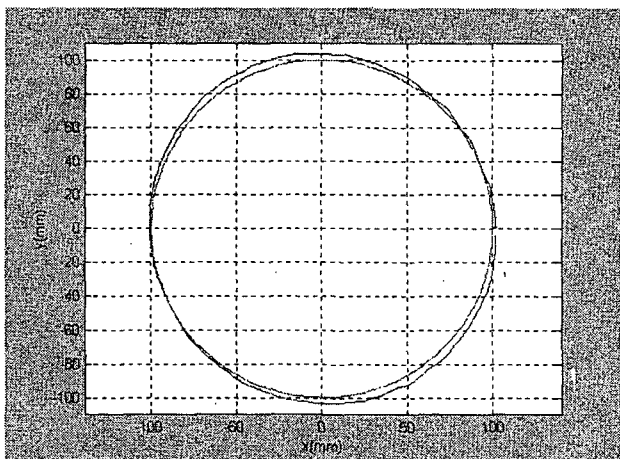
7.5 ตำแหน่งที่ 5 การเคลื่อนที่เป็นวงกลม

ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลมดังสมการ

$$x(t) = 100 \cos(3.14t)$$

$$y(t) = 100 \sin(3.14t)$$

โดยรักษาระดับความสูงที่ $z = 410$ mm และมุมคงที่เท่ากับ roll = 0°, pitch = 0°, yaw = 0° ตำแหน่งเริ่มต้นอยู่ที่ $x = 100$, $y = 0$, $z = 410$ mm, roll = 0°, pitch = 0°, yaw = 0° ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ผลการทดลองเมื่อปลายแขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลม

รูปที่ 15 เป็นการทดสอบการเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่โดยลักษณะการเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ xy และไม่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน จะเห็นได้ว่าส่วนที่เคลื่อนที่นั้นสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้แต่จะมีค่าผิดพลาดในระหว่างการเคลื่อนที่โดยมีความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน x เท่ากับ 2.4 มม. ความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน y เท่ากับ 5.0 มม. ความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นตามแกน z เท่ากับ 1.65 มม. ความผิดพลาดสูงสุดของมุม row เท่ากับ 1.2 องศา ความผิดพลาดสูงสุดของมุม pitch เท่ากับ 0.85 องศา ความผิดพลาดสูงสุดของมุม yaw เท่ากับ 1.0 องศา

8. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนานคือ มีโครงสร้างเป็นแบบปิดโดยรูปแบบของโครงสร้างนั้นเรียกว่า “โครงสร้างแบบสจ๊วต” ในการออกแบบนั้นจะคำนึงถึงการกระจายความหน่วงโดยการคำนวณหา Inertia Ellipsoid จากโครงสร้างที่มีรูปร่างต่างกัน 3 แบบ แล้วเลือกแบบที่เหมาะสม

จากการทดสอบโครงสร้างที่สร้างขึ้นนี้ ได้ทำการทดสอบ โดยใช้จุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่ (Moving frame) เป็นตำแหน่งที่พิจารณา โดยกำหนดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งต่างๆ 5 ตำแหน่งแล้วบันทึกค่าความยาวของตัวขับแต่ละตัว นำค่าที่ได้นี้มาคำนวณโดย Forward Kinematics จะได้ค่าตำแหน่ง (position) และการเรียงตัว (Orientation) ในช่วงเวลาของการเคลื่อนที่ ผลการคำนวณคือส่วนที่เคลื่อนที่ที่สามารถเคลื่อนที่แบบเลื่อนตัวด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1.0 เมตรต่อวินาที และการเคลื่อนที่แบบหมุนด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 20 องศาต่อวินาทีได้ โดยมีความผิดพลาดของระยะการเคลื่อนที่ไม่เกิน 6.8 มิลลิเมตร ในระยะการเคลื่อนที่ 100 มิลลิเมตร และความผิดพลาดเชิงมุมสูงสุดไม่เกิน 4.5 องศา การทดสอบนี้เป็นการทดสอบที่มีความเร็วค่อนข้างสูง และค่าความผิดพลาดดังกล่าวนี้เป็นค่าความผิดพลาดรวม ซึ่งส่วนหนึ่งก็ขึ้นอยู่กับค่าประมาณค่าในส่วนของ Forward Kinematics โดยใช้การประมาณค่าของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method). ซึ่งในวิจัยต่อไปจะปรับปรุงส่วนของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ข้อตัวขับเคลื่อนให้ดียิ่งขึ้นและการปรับปรุงการหา Forward Kinematics

เอกสารอ้างอิง

- [1] Walter F. Smith, Jackson and Tull, Charles C. Nguyen, "Mechanical Analysis And Design Of A Six-Degree-Of-Freedom Robotic Wrist For Space Assembly", IEEE Journal of Robotics and Automation, pp.177-181, 1991
- [2] Charles C. Nguyen, Zhen-Lei Zhou, Sami S. Antrazi, Charles E. Campbell "Efficient Computation of Forward Kinematics and Jacobian Matrix of A Stewart Platform- Based Manipulator", IEEE Journal of Robotics and Automation, pp.869-874, 1991

- [3] Oren Masory, Jian Wang, and Hanqi Zhuang, "On the Accuracy of A Stewart Platform-Part II Kinematics Calibration and Compensation", IEEE Journal of Robotics and Automation, pp.725-731, 1993
- [4] S.E. Salcudean, P.A. Drexel, "A Six Degree-of-Freedom, Hydraulic, One Person Motion Simulator", IEEE Journal of Robotics and Automation, pp.2437-2443, 1994
- [5] Lorenzo Sciavicco, Bruno Siciliano, "Modeling and Control of Robot Manipulators", McGraw-Hill
- [6] Kazuhiro Kosuge, Minoru Okuda, "Input/Output Force Analysis of Stewart Platform Type of Manipulators", Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, 1993.
- [7] Joseph P. Conti, Charles M. Clinton, "Workspace variation of a Heaped Machine Tool", National Institute of Standard and Technology