

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การออกแบบและวิเคราะห์หุ่นยนต์โครงสร้างขนานหกแกนแบบ HEXA R-S-S Limb สำหรับงานขึ้นรูปชิ้นงานสามมิติ

วรพจน์ ศตเดชากุล¹ และ ณัฐ จันทร์ครบ²

¹ ศูนย์นวัตกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ (IMERs) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140
* ติดต่อ: โทรศัพท์: 034 355 310, โทรสาร: 034 355 310, E-mail: fengwpsk@ku.ac.th

² ห้องวิจัยวิทยาการควบคุมอัตโนมัติและระบบหุ่นยนต์ (CARL LAB)
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 19/1 หนองค้างพลู หนองแขม กรุงเทพฯ 10160

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์หุ่นยนต์โครงสร้างขนานหกแกนแบบ HEXA R-S-S Limb ซึ่งสำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ขึ้นรูปชิ้นงานสามมิติ ด้วยระดับความเป็นอิสระเท่ากับหก(6-DOF) ทั้งในการเคลื่อนที่เชิงเส้น(Translation) และเชิงมุม(Rotation) โดยในการวิเคราะห์พิจารณาจลนศาสตร์ผกผัน(Inverse Kinematics) ความสัมพันธ์เชิงความเร็ว(Velocity Relationship)และปริมาตรการปฏิบัติงาน(Working Space) ส่วนการออกแบบโครงสร้างเลือกใช้ข้อต่อหมุนแบบหัวกลม(Spherical Joint)ทั้งหมดรวมถึงต้นกำลังแบบหมุนด้วย เพื่อให้ส่งผลดีต่อกระบวนการสร้างความแข็งแรงและต้นทุนในการผลิต การวิเคราะห์และออกแบบดังกล่าวได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงานที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์ชนิดนี้ ซึ่งโครงสร้างมีความซับซ้อนน้อยกว่าแต่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับหุ่นยนต์โครงสร้างขนานที่ใช้ต้นกำลังเชิงเส้น(Linear Actuator)
คำหลัก: หุ่นยนต์โครงสร้างขนาน จลนศาสตร์ผกผัน ปริมาตรการปฏิบัติงาน ต้นกำลังเชิงเส้น

Abstract

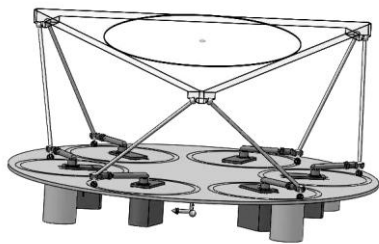
This research paper proposes an analysis and design of Hexa R-S-S Limb parallel robot for 3-D part shaping process with 6 degree of freedom that included both translation and rotation. This work considers inverse kinematics, velocity relationship and working space. Hexa R-S-S Limb parallel robot consist of low cost spherical and revolute joint that cause a better strength and economical budget to build it for many application. Our analysis can show some advantage of this robot that has a simple configuration, low cost and equally performance with other parallel robot.

Keywords: parallel robot, inverse kinematics, working space, linear actuator.

1. บทนำ

หุ่นยนต์โครงสร้างขนาน(Parallel Robot) ได้ถูกออกแบบและใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในวงการอุตสาหกรรม การแพทย์ และวงการบันเทิง มากกว่าสามทศวรรษ รูปของโครงสร้างมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง หุ่นยนต์โครงสร้างขนานนั้นมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างจากหุ่นยนต์โครงสร้างอนุกรม (Serial Robot) ที่เด่นชัดที่สุดคือตำแหน่งปลายสุดของหุ่นยนต์ (End Effector) ซึ่งหุ่นยนต์โครงสร้างขนานมีแขน(Limb)ล้อมรอบแบบปลายปิด โดยแต่ละแขนมีการติดตั้งต้นกำลังต้นกำลังเชิงเส้น(Linear Actuator) หรือต้นกำลังเชิงมุมหมุน (Rotating Actuator) หรือใช้ทั้งสองชนิดผสมกัน แต่ต้นกำลังมักต้องรับภาระจากน้ำหนักรวมโดยตรงทำให้ต้นกำลังต้องมีกำลังและแรงบิดที่มากพอ และมักใช้ชิ้นส่วนที่ซับซ้อนต้องสร้างเฉพาะ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาออกแบบให้หุ่นยนต์Hexa R-S-S Limb มีคุณลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับหุ่นยนต์โครงสร้างขนานแบบอื่นๆแต่หลีกเลี่ยงข้อจำกัดทั้งสองข้างต้น

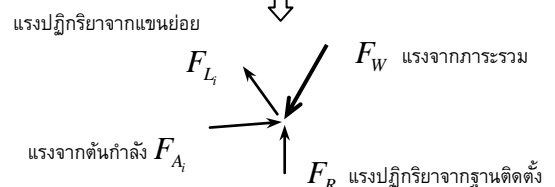
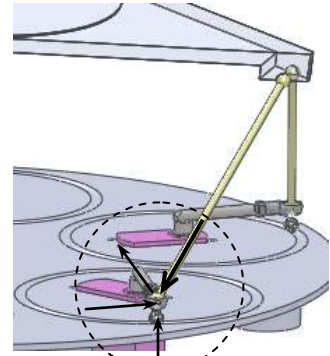
2. การออกแบบโครงสร้าง



รูปที่ 2-1 แสดงโครงสร้างของหุ่นยนต์ Hexa R-S-S

หุ่นยนต์ Hexa R-S-S Limb ถูกออกแบบด้วยเป้าหมายหลักสองประการ คือ ประการแรก มุ่งต้องการให้ภาระที่เกิดจากน้ำหนักของฐานเคลื่อนที่และชิ้นงานที่ติดตั้งบนฐานนั้นไม่กลายเป็นภาระโดยตรงกับต้นกำลัง เพื่อลดขนาดของต้นกำลัง ประการที่สอง คือ โครงสร้างต้องสร้างง่าย แข็งแรงและต้นทุนประหยัด แต่มีประสิทธิภาพเทียบเคียงได้กับหุ่นยนต์

โครงสร้างขนาน 6 แกนทั่วไป (เช่น Stewart Platform) จึงได้รูปแบบของหุ่นยนต์ที่ประกอบด้วยแขนหลัก 6 แขน โดยที่แต่ละแขนหลักมีสองแขนย่อยที่ต่อเชื่อมด้วยข้อต่อหมุนหั่วกลม ส่วนที่ปลายแขนย่อยเชื่อมต่อกับต้นกำลังหมุนที่ติดตั้งให้แนวแกนหมุนอยู่ในแนวตั้ง ดังรูปที่ (2-1) และที่ปลายอีกด้านของแขนย่อยต่อกับฐานเคลื่อนที่ด้วยข้อต่อหมุนหั่วกลมจากโครงสร้างข้างต้นภาระน้ำหนักรวมของฐานเคลื่อนที่ ที่ส่งผ่านมายังแขนนั้นตกอยู่กับฐานติดตั้งเป็นส่วนใหญ่ และส่วนที่เหลือส่งผ่านไปยังชิ้นส่วนแขนย่อยที่ติดตั้งกับต้นกำลังดังรูปที่ (2-2)



รูปที่ 2-2 แสดงโครงสร้างการรับภาระน้ำหนักของหุ่นยนต์

Hexa R-S-S Limb

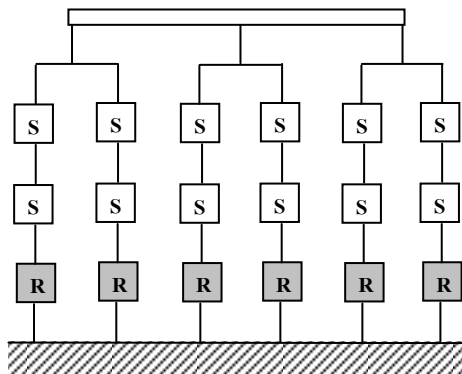
เมื่อต้นกำลังทั้งหกเคลื่อนที่ภาระทั้งแบบสถิตย์จากน้ำหนักและภาระพลศาสตร์ในขณะเคลื่อนที่ส่งผ่านไปยังฐานติดตั้งเป็นส่วนใหญ่ แรงบิด (Torque) ของต้นกำลังจึงไม่ต้องรับภาระทั้งหมด ขนาดของต้นกำลังจึงลดลง ส่วนการตรวจสอบระดับความเป็นอิสระเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ต้องตรวจสอบเพื่อให้โครงสร้างของหุ่นยนต์มีค่าเหมาะสมถูกต้องจากแผนภาพโครงสร้างในที่นี้ คือ ระดับ 6 (Mobility=6) โดยใช้กฎของ Gruber-Euler [1] ดังนี้

$$M = \lambda(n - j - 1) + \sum_i f_i \quad (1)$$

เมื่อ

- M คือ ระดับความเป็นอิสระของหุ่นยนต์
- n คือ จำนวนแขนย่อยทั้งหมดรวมฐาน
- j คือ จำนวนข้อต่อ
- f_i คือ ระดับความเป็นอิสระของข้อต่อ
- λ คือ ระดับความเป็นอิสระของปริภูมิปฏิบัติงาน

เมื่อทำการคำนวณระดับความเป็นอิสระของหุ่นยนต์ Hexa R-S-S Limb โดยจำนวนแขนย่อยรวมฐานหรือ $n=4$ ส่วนจำนวนข้อต่อ หรือ $j=18$ ส่วนผลรวมของ $\sum_i f_i = (6 + 6(3) - 6(2))$ จึงได้ผลของ $M = 6(14 - 18 - 1) + (6 + 6(3) - 6(2))$



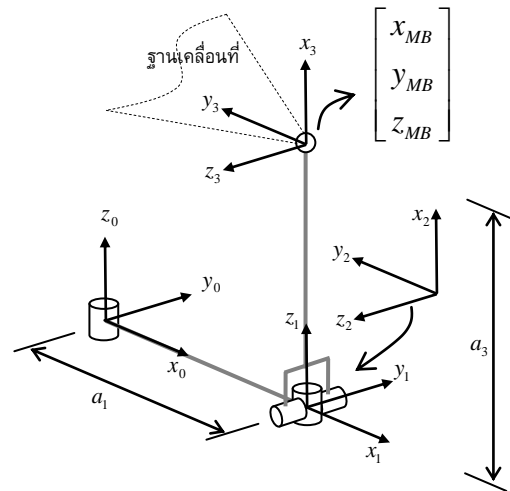
- ข้อต่อติดตั้งต้นกำลัง
- ข้อต่อไม่ติดตั้งต้นกำลัง

รูปที่ 2-3 แสดงแผนภาพโครงสร้างของหุ่นยนต์ Hexa R-S-S Limb

3. การวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์

ด้วยหุ่นยนต์โครงสร้างขนานแบบ HEXA R-S-S Limb นี้มีลักษณะทางกลของแขนที่คล้ายกันทั้งหกแขนทำให้การวิเคราะห์จลนศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematics) ของแต่ละแขนมีรูปแบบที่เหมือนกันแตกต่างกันตรงตำแหน่งเริ่มต้นของแต่ละแขนเท่านั้นในการวิเคราะห์จลนศาสตร์ผกผันของหุ่นยนต์

โครงสร้างขนานนิยมใช้วงรอบเวกเตอร์ในการวิเคราะห์ส่วนในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอเสนอวิธีการวิเคราะห์ของหุ่นยนต์อนุกรม หรือในแบบของเดนาวิตท์และฮาเทินเบิร์ก (Denavit-Hartenberg) ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณและการทำความเข้าใจ โดยกำหนดให้ข้อต่อหมุนหัวกลม มีโครงสร้างทางกายภาพเทียบเคียงกับข้อต่อหมุนสองแกน จึงสามารถสร้างแผนภาพพิกัดแกน ดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 แสดงแผนภาพพิกัดแกน ของหุ่นยนต์ Hexa R-S-S Limb

มีตัวแปร D-H Parameter ดังตารางด้านล่าง

ข้อต่อที่	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	a_1	0	θ_1
2	$\pi/2$	0	0	$\theta_2 + \pi/2$
3	0	a_3	0	θ_3

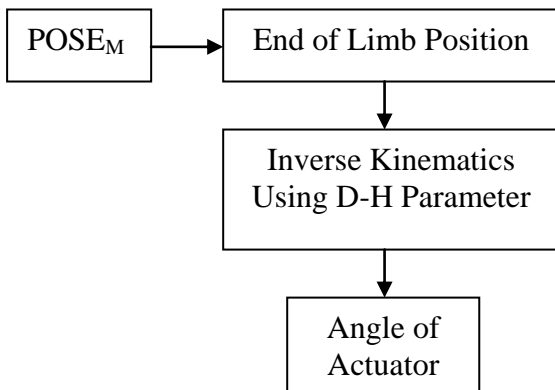
ด้วยแผนภาพข้างต้นและตารางตัวแปร D-H Parameter สามารถนำมาคำนวณเมตริกส์ถ่ายโอนตำแหน่งรวม (Homogenous Transform) ของแขนได้เป็นดังสมการที่ (2)

$$A_L = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 = \begin{bmatrix} -c\theta_3 s\theta_{12} & s\theta_3 s\theta_{12} & -c\theta_{12} & a_1 c\theta_1 - a_3 c\theta_3 s\theta_{12} \\ c\theta_3 s\theta_{12} & s\theta_3 c\theta_{12} & -s\theta_{12} & a_3 c\theta_3 c\theta_{12} + a_1 s\theta_1 \\ -s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & -a_3 s\theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมตริกส์ถ่ายโอน A มีในคอลัมภ์ที่สามอยู่สามพจน์ ซึ่งแต่ละพจน์ คือตำแหน่งปลายของแขนตำแหน่งเดียวกับจุดยึดกับฐานเคลื่อนที่ ทำให้สามารถสร้างสมการตำแหน่งเป็นดังสมการ

$$\begin{bmatrix} x_{MB} \\ y_{MB} \\ z_{MB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 c \theta_1 - a_3 c \theta_3 s \theta_{12} \\ a_3 c \theta_3 c \theta_{12} + a_1 s \theta_1 \\ -a_3 s \theta_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

สมการทั้งสามนำไปสู่การหาคำตอบของมุม θ_1 ซึ่งเป็นมุมของต้นก้านในแต่ละแขนของหุ่นยนต์ โดยทุกแขนมีขั้นตอนแบบเดียวกัน แต่การนำไปใช้ต้องมีการคำนวณการถ่ายโอนตำแหน่งและองศาการวางตัวของฐานเคลื่อนที่ (Position and Orientation of Moving Base , $POSE_{MB}$) มายังตำแหน่งปลายแขนย่อยทุกแขน แล้วจึงใช้ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสรุปเป็นขั้นได้ตามแผนภาพ ต่อไปนี้



รูปที่ 3-2 แสดงแผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์จลนศาสตร์ผกผันของหุ่นยนต์ Hexa R-S-S Limb

ในส่วนของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความเร็วระหว่างฐานเคลื่อนที่กับองศาต้นก้านนั้นสามารถนำสมการ (3) มาทำการหาอนุพันธ์นำไปสู่ความสัมพันธ์ความเร็ว ดังนี้

$$[\dot{POSE}_{MB}] = J[\dot{\theta}_L] \quad (4)$$

$$[\dot{\theta}_L] = J^{-1}[\dot{POSE}_{MB}] \quad (5)$$

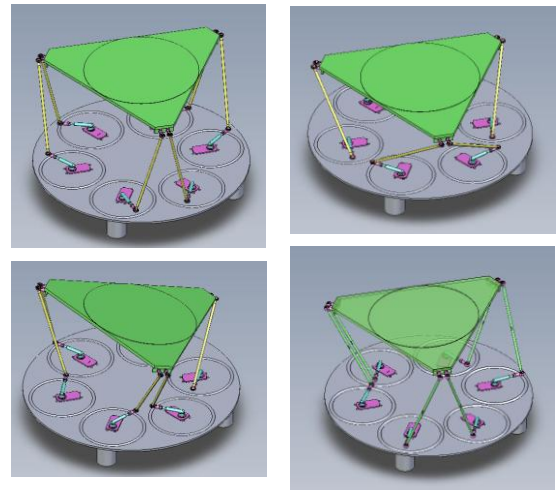
โดย

$[\dot{\theta}_L]$ คือ อนุพันธ์ขององศาการหมุนของต้นก้าน

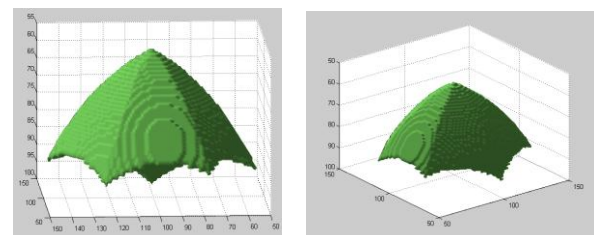
$[POSE_{MB}]$ คือ อนุพันธ์ของตำแหน่งและองศาการวางตัวของฐานเคลื่อนที่

4. ผลการทดสอบต้นแบบ

หุ่นยนต์ต้นแบบได้ถูกสร้างจากชิ้นส่วนที่มีราคาประหยัด สามารถหาได้ในท้องตลาด พร้อมได้ทำการจำลองการเคลื่อนที่ด้วยคอมพิวเตอร์และทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์โดยใช้ต้นก้านมอเตอร์เซอร์โว กระแสตรงขนาดเล็กควบคุมด้วยโปรแกรม LABView ซึ่งทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์และส่งการควบคุมตำแหน่งมายังมอเตอร์ หุ่นยนต์จึงมีปฏิสัมพันธ์การทำงานเป็นรูปประจักษ์กว่าดังแสดงในรูปด้านล่าง



รูปที่ 4-1 แสดงการเคลื่อนที่ในปฏิภูมิของหุ่นยนต์ Hexa R-S-S



รูปที่ 4-2 แสดงปฏิภูมิทำงานของหุ่นยนต์ Hexa R-S-S

ซึ่งแสดงให้เห็นความสามารถในการทำงานเช่นเดียวกับหุ่นยนต์โครงสร้างขนานแบบอื่นๆที่มีส่วนประกอบโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าทั้งทางด้านการสร้างและการวิเคราะห์จลนศาสตร์

5. สรุปและแผนงานในอนาคต

หุ่นยนต์โครงสร้างขานแบบ Hexa-RSS Limb มีความซับซ้อนทางโครงสร้างน้อยกว่าหุ่นยนต์แบบอื่น ซึ่งส่วนสามารถจัดสร้างขึ้นจากชิ้นส่วนมาตรฐานที่หาได้ง่าย (Commercial Part) ซึ่งหุ่นยนต์นี้สามารถนำมาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานสามมิติเช่นเดียวกับหุ่นยนต์ขานแบบอื่นๆ สร้างความพอใจในขั้นต้นให้กับคณะวิจัย ซึ่งมีแผนในการพัฒนาในส่วนของจลนศาสตร์ดำเนินไปข้างหน้า (Forward Kinematics) และการควบคุมแรงบนฐานเคลื่อนที่เพื่อให้นำหุ่นยนต์ Hexa-RSS Limb ไปใช้ให้กว้างขวางขึ้นในงานอุตสาหกรรมหรือรวมถึงการนำไปใช้ในงานด้านบันเทิงที่ใช้ฐานเคลื่อนที่สำหรับการแสดงสมัยใหม่

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหัวหน้าศูนย์วิจัยศูนย์นวัตกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ (IMERs) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และหัวหน้าห้องวิจัยวิทยาการควบคุมอัตโนมัติและระบบหุ่นยนต์(CARL LAB) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ ที่เอื้อเฟื้อทั้งข้อมูล สถานที่ และบุคลากรในการทำวิจัยร่วมกันจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Fundamentals of Robotics Analysis and Control , Robert J.Schilling, Prentice Hall., 1990.
[2] Boiadjev G., 1996, "Kinematic sensible directions of manipulating systems", Proceedings of the 6th Interational Symposium on Measirment and Control in Robotics, Brussels, 77-82.
[3] Boiadjev G., Kostadinov K., Coefficients and Directions of Dynamic Sensibility for Robot Manipulators. International Workshop on Advanced Robotics and Intelligent Machins, Manchester, Uk, 1997, PN7, pp.1-11, ISSN 11363-2698.

[4] Lilov L., Boiadjev G., " Dynamics and control of robot-manipulators", University press "St. K. Ohridski", Sofia, 1997, 236p., ISBN 954-07-11134.
[5] Vassileva D., Boiadjev G., "Coefficients and directions of kinematic senibility for orientation of redundant robot-manipulators" Edition of Scientific Machine Union, Vol. 3, Drjanovo, 1999, p.1.43-1.49, ISSN 1310-3946
[6] Vassileva D., Boiadjev G., "Control of kinematic senibility parameters for planar robot-manipulators with redundancy" Edition of Scientific Machine Union, Vol. 3, Drjanovo, 2000, p. 3.27-3.33, ISSN 1310-3946 (in Bulgarian).
[7] Vassileva D., Hristov K., Boiadjev G., "Mathematical techniques at Sensibility Analyses of Mechanical Manipulative Structures", Int. Journal "Information - Theories&Applications", vol 7, N 2, p. 69-83, 2000, ISSN 1310-0513.
[8] Vassileva D., "Sensibility of Mechatronic Systems with Planar Manipulative Structures", Proc. First Baltic-Bulgarian Conf. on Mechanics, Biomechanics and Bionics, vol. 1, p. 71-76, Varna, 2000, ISBN 9984-681-74-2.
[9] Vassileva D., Boiadjev G, "Sensibility Analysis of Manipulative Structures with Redundancy", Edition of Scientific Machine Union, vol 3 (54), Year VII, 2000, p. 211-216, 1310-3946 (in Bulgarian).
[10] Vassileva D., Boiadjev G., "Homomorphisms in Sensibility of Mechatronic Systems. Analysis of the kernel with respect of redundancy for positioning.", Int. Conf. on Bionics, Biomechanics and Mechanics, Varna 2001, p. 67 –69, ISBN 9984-681-09-2