การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21
17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี

จลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับรูปได้

A Kinematics of Transformable Collaborative Robot

ศุภพน จันทร์พัฒน์ และ วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์*
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพมหานคร 10330, โทร 0-2218-6610-1, โทรสาร 0-2252-2889
E-mail: supaphon.c@student.chula.ac.th,witaya.w@chula.ac.th
*Co-response author

Supaphon Chanpat and Witaya Wannasuphoprasit*
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Bangkok 10330, Thailand, Tel. 0-2218-6610-1, Fax 0-2252-2889
E-mail: supaphon.c@student.chula.ac.th,witaya.w@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาระบบจลน์ศาสตร์การปรับขนาดของหุ่นยนต์โคบอท ซึ่งเป็นหุ่นยนต์โคบอทที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้อย่างปลอดภัย การพัฒนาให้โคบอทสามารถปรับขนาดได้ เป็นการเพิ่มความสามารถในการปรับขนาดของโคบอทให้สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมต่างๆได้อย่างเหมาะสม และยังเป็นการเพิ่มศักยภาพของหุ่นยนต์โคบอทให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น การอธิบายระบบจลน์ศาสตร์จะเริ่มจากจลน์ศาสตร์ของล้อ ซึ่งก็คือหุ่นยนต์โคบอทที่ทำงานด้วยล้อเพียงหนึ่งล้อ มีพื้นที่การทำงานบนระนาบ จากนั้นจึงกล่าวถึงจลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทที่ประกอบขึ้นจากล้อสามล้อ และอธิบายถึงจลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทที่สามารถปรับรูปได้ จลน์ศาสตร์ทั้งหมดถูกนำมาจำลองการทำงานเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และนำจลน์ศาสตร์ไปทดสอบกับหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้น ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองกล่าวถึงในเนื้อหาของบทความ

Abstract

This paper purpose a development of kinematics of Transformable Collaborative Robot. Collaborative Robot:Cobot is a advance robot which intend to co-operate with human operator directly. The development of Transformable cobot intends to enhance the flexibility of Cobot that improve Cobot performance. Kinematics of single wheel and Scooter Cobot are described and developed to Kinematics of Transformable Cobot. Kinematics is checked by simulation on computer before apply to the prototype of Transformable Cobot. The experiment result is shown.

1. บทนำ

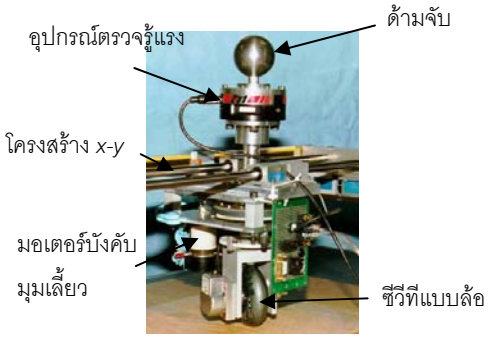
หุ่นยนต์โคบอทเป็นหุ่นยนต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย [1] เพื่อให้เป็นหุ่นยนต์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อทำงานร่วมกับมนุษย์โดยตรง ตัวอย่างของงานประเภทนี้ได้แก่ งานด้าน Haptic, อุปกรณ์เสริมการทำงานของมนุษย์ (Human assistance device) รวมถึงงานด้านกายภาพบำบัด จุดเด่นของหุ่นยนต์โคบอท คือ โคบอทเป็นอุปกรณ์แพสซีฟอย่างแท้จริง มีความปลอดภัยสูงเมื่อทำงานร่วมกับมนุษย์โดยตรง หุ่นยนต์โคบอทใช้อุปกรณ์ปรับอัตราทดของการเคลื่อนที่ระหว่างข้อต่อของหุ่นยนต์แทนการใช้อุปกรณ์ต้นกำลังในการขับข้อต่อของหุ่นยนต์โดยตรง ผลที่ได้คือหุ่นยนต์โคบอทสามารถควบคุมทิศทางปลายแขนหุ่นยนต์ โดยไม่ส่งถ่ายกำลังเชิงกลไปโดยตรง ในการออกแบบมิได้ใช้ระบบควบคุมหรือการจำกัดพลังงานเพื่อสร้างความเป็นแพสซีฟ ดังนั้นหุ่นยนต์โคบอทจึงคงปลอดภัยถึงแม้ว่าระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทจะเสียเสถียรภาพก็ตาม

ในปัจจุบันหุ่นยนต์โคบอทได้ถูกสร้างขึ้นมาในหลายลักษณะ [1],[2],[3],[5],[6],[7],[8],[10] ซึ่งทุกตัวมีรูปร่างคงที่ ไม่สามารถปรับตัวให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในการทำงานได้ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการสร้างและจลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทที่สามารถปรับเปลี่ยนตัวเองให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในการทำงานได้ การพัฒนาหุ่นยนต์โคบอทแบบต่างๆ ต้องพัฒนาจลน์ศาสตร์สำหรับหุ่นยนต์ตัวนั้นๆควบคู่กันไป ในบทความนี้จะขอกล่าวถึงจลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทที่มีปริภูมิการทำงานบนระนาบเท่านั้น เนื่องจาก

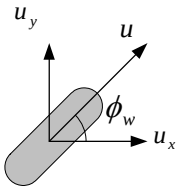
งานวิจัยนี้ใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาจลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับรูปได้ที่มีพื้นที่การทำงานบนระนาบได้ และสามารถปรับรูปได้ขณะเคลื่อนที่

2. หลักการทำงานของโคบอท

การทำงานร่วมกันของมนุษย์และหุ่นยนต์โคบอท มนุษย์จะเป็นผู้ออกแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ในขณะที่หุ่นยนต์โคบอททำหน้าที่ในการนำทิศทางการเคลื่อนที่ตามที่กำหนด ในกรณีที่ใช้หุ่นยนต์โคบอทเป็นอุปกรณ์เสริมการทำงานของมนุษย์ (Human Assistance Device) เช่น การประกอบชิ้นงาน โคบอทสามารถรับภาระที่เกิดจากน้ำหนักและความเฉื่อยของชิ้นงานแทนมนุษย์ และนำชิ้นงานเข้าประกอบในตำแหน่งที่ถูกต้องแม่นยำ พร้อมกับอนุญาติให้ผู้ใช้สามารถควบคุมแรงในการประกอบได้ จึงทำให้การประกอบมีคุณภาพที่ดีกว่าการใช้มนุษย์หรือหุ่นยนต์ทำงานเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 1 หุ่นยนต์ยูนิไซเคิลโคบอท [1]



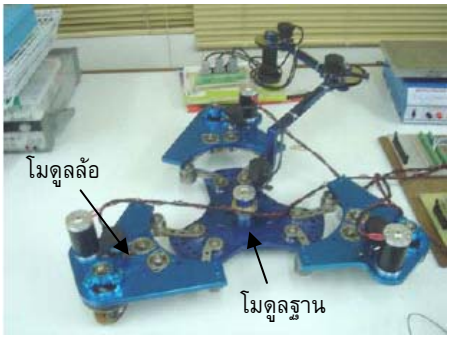
รูปที่ 2 อัตราทดของล้อ

หุ่นยนต์โคบอทใช้อุปกรณ์ปรับอัตราทดในการควบคุมอัตราส่วนการเคลื่อนที่ระหว่างข้อต่อของหุ่นยนต์โคบอท การปรับอัตราทดอย่างเหมาะสมเป็นการปรับทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนโคบอท แต่มิได้ทำให้โคบอทเคลื่อนที่ อุปกรณ์ปรับอัตราทดดังกล่าวเป็นระบบส่งกำลังที่สามารถปรับอัตราทดได้ต่อเนื่องและมีอัตราทดตั้งแต่ $-\infty$ ถึง ∞ เรียกว่าระบบส่งกำลังปรับอัตราทดต่อเนื่อง (Continuously Variable Transmission; CVT) เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทได้ง่ายขึ้นจึงยกตัวโคบอทที่มีหลักการทำงานง่ายที่สุด คือ ยูนิตไซเคิลโคบอท[1] ที่แสดงในรูปที่ 1 ยูนิตไซเคิลโคบอทประกอบด้วยล้อ, โครงสร้าง x-y, มอเตอร์บังคับเลี้ยว, และอุปกรณ์วัดแรง มอเตอร์บังคับเลี้ยวเป็นอุปกรณ์ต้นกำลังเพียงตัวเดียวในตัวยูนิตไซเคิลโคบอทและทำหน้าที่ในการปรับมุมเลี้ยวเท่านั้น และไม่สามารถขับเคลื่อนโคบอทให้เคลื่อนที่ได้ในทุกกรณี หุ่นยนต์โคบอทมีลักษณะการทำงานอยู่สองรูปแบบหลัก คือ การเคลื่อนที่อิสระ (free mode) และแบบนำการเคลื่อนที่ (path mode) ในการทำงานแบบเคลื่อนที่อิสระเมื่อมนุษย์เคลื่อนโคบอท โคบอทจะวัดแรงที่มนุษย์กระทำและเลี้ยวล้อให้ขนานไปกับทิศทางของแรง ทำให้มนุษย์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในระนาบ x-y และเมื่อต้องการนำการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด โคบอทจะทำงานในแบบนำการเคลื่อนที่ โดยบิดล้อให้อยู่ในแนวสัมผัสของเส้นทางการเคลื่อนที่ที่กำหนด ส่งผลให้โคบอทซึ่งตั้งอยู่บนล้อเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางถูกต้อง

ล้อของยูนิไซเคิลโคบอท ถือเป็นระบบส่งกำลังปรับอัตราทดต่อเนื่องที่ทำหน้าที่ในการปรับอัตราทดระหว่างความเร็วในแกน x และแกน y ของหุ่นยนต์โคบอท ตามในรูปที่ 2 ระบบส่งกำลังปรับอัตราทดต่อเนื่องสามารถต่อเข้าด้วยกันทั้งแบบขนานและอนุกรม เพื่อนำไปควบคุมหุ่นยนต์โคบอทที่มีมิติการทำงานมากขึ้น ดังเช่น หุ่นยนต์สกูตเตอร์โคบอท[2] ที่พัฒนาขึ้นจากหุ่นยนต์ยูนิตไซเคิลโคบอท โดยมีล้อเพิ่มขึ้นเป็น 3 ล้อ และมีมิติการทำงานเพิ่มขึ้นเป็น 3 มิติ

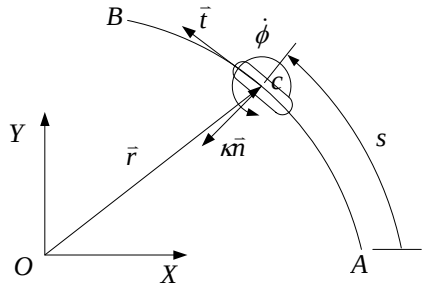
3.หุ่นยนต์โคบอทปรับรูปได้

รูปที่ 3 ต้นแบบโคบอทปรับรูปได้ขนาดปกติ



รูปที่ 4 ต้นแบบโคบอทปรับรูปได้ขณะขยายออก

ต้นแบบของหุ่นยนต์โคบอท[9] ที่สร้างขึ้นประกอบงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3 และ 4 โครงสร้างส่วนใหญ่ขึ้นรูปจากอะลูมิเนียมผสมเพื่อลดน้ำหนัก ส่วนที่เป็นแขนปรับขนาดและข้อต่อต่างๆขึ้นรูปจากเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อความแข็งแรง โครงสร้างของโคบอทจะแบ่งออกเป็น 4 โมดูล คือ โมดูลล้อจำนวน 3 โมดูล และโมดูลฐานกลางจำนวน 1 โมดูล โมดูลล้อมีส่วนประกอบสำคัญ คือ มอเตอร์บังคับเลี้ยว, เอนโคดเดอร์วัดมุมเลี้ยว และล้อ โมดูลฐานประกอบด้วย ด้ามจับที่ติดตั้งบริเวณตรงกลางของตัวโคบอท ใต้ฐานของด้ามจับจะติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงเพื่อวัดแรงจากผู้ใช้ ตำแหน่งของหุ่นยนต์โคบอทจะถูกวัดด้วยแขนวัดตำแหน่งตามในรูป ระบบควบคุมของหุ่นยนต์โคบอทจะใช้คอมพิวเตอร์ PC ติดตั้งแผงวงจรควบคุม และทำงานบนระบบปฏิบัติการเวลาจริง QNX 6



รูปที่ 5 จลน์ศาสตร์ของล้อ

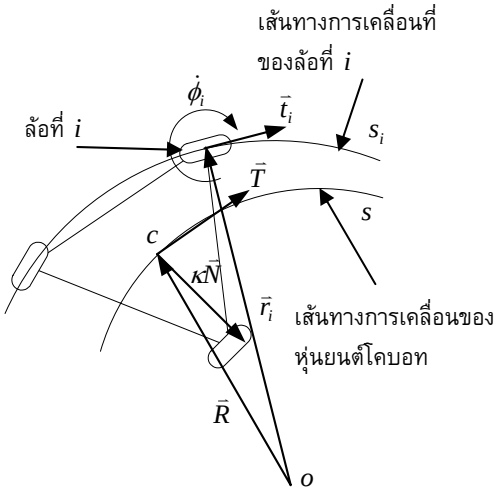
4. จลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอท

4.1 จลน์ศาสตร์ของล้อ

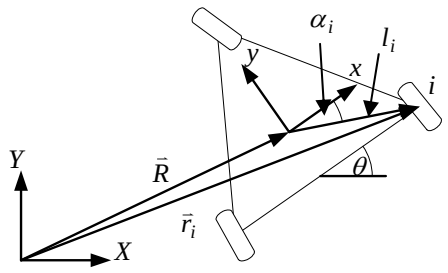
ในรูปที่ 5 แสดงการเคลื่อนที่ของล้อตามส่วนโค้ง AB พิกัดของล้อแสดงด้วยเวคเตอร์ตำแหน่ง $\vec{r} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^T$ วัดจากจุดอ้างอิง O ไปที่จุด c ความยาวส่วนโค้ง ณ ตำแหน่ง $\vec{r}$ คือ s เวคเตอร์สัมผัสโค้ง $\vec{t}$ แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของล้อ $\kappa\vec{n}$ คือ เวคเตอร์ความโค้งของส่วนโค้ง(Curvature vector) อัตราเร็วของการเคลื่อนที่เท่ากับ u ซึ่งเป็นผลมาจากแรงกระทำของผู้ใช้ ความเร็วเชิงมุม $\dot{\phi}$ คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\dot{\phi} = u\vec{t} \times \kappa\vec{n} \tag{1}$$

ความเร็วเชิงมุม $\dot{\phi}$ เป็นความเร็วของการเลี้ยวล้อเมื่อล้อเคลื่อนที่ตามสวนโค้ง AB



รูปที่ 6 จลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับรูปได้



รูปที่ 7 ค่าพารามิเตอร์ของโคบอทปรับรูปได้

4.2 หุ่นยนต์สกูตเตอร์โคบอท

หุ่นยนต์สกูตเตอร์โคบอทเป็นโคบอทที่พัฒนาขึ้นจากยูนิตไซเคิลโคบอท ประกอบด้วยล้อจำนวน 3 ล้อ เพื่อให้สามารถทรงตัวอยู่ได้ด้วยตัวเอง และเพื่อกำจัดจุดเอกนิยม (Singularity point) [4] สกูตเตอร์โคบอทจะมีมิติการทำงานเป็น 3 มิติบนระนาบ คือ X, Y, θ จลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์สกูตเตอร์โคบอทใช้หาความเร็วเชิงมุมในการปรับมุมเลี้ยวของล้อแต่ละล้อ $\dot{\phi}_i$ จากเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลาง c ของหุ่นยนต์โคบอท รูปที่ 6 แสดงเวคเตอร์ตำแหน่งของโคบอท คือ $\vec{R} = \begin{bmatrix} X, Y, l\theta \end{bmatrix}$ ขณะที่โคบอทกำลังเคลื่อนที่ตามส่วนโค้ง s ล้อที่ i จะเคลื่อนที่ตามส่วนโค้ง s_i ตำแหน่งของล้อที่ i แสดงด้วยเวคเตอร์ตำแหน่ง $\vec{r}_i$ หาได้จากความสัมพันธ์

$$\vec{r}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = L_i(\vec{R}) = \begin{bmatrix} X + l_i \cos(\theta + \alpha_i) \\ Y + l_i \sin(\theta + \alpha_i) \end{bmatrix} \tag{2}$$

โดยที่ l_i เป็นระยะจากจุดศูนย์กลางของโคบอทไปถึงแกนการเลี้ยวของล้อที่ i , α_i เป็นมุมของล้อที่ i วัดเทียบจากแกน x ตามในรูปที่ 7 ในสกูตเตอร์โคบอท l_i และ α_i มีค่าคงที่ดังนี้ $l_1 = l_2 = l_3 = 0.2$ เมตร, $\alpha_1 = -\frac{\pi}{6}$ เรเดียน, $\alpha_2 = \frac{\pi}{2}$ เรเดียน , $\alpha_3 = \frac{7\pi}{6}$ เรเดียน เวคเตอร์สัมผัสโค้งของล้อที่ i คือ $\vec{t}_i$ หาได้จากความสัมพันธ์

$$\vec{t}_i = \frac{d\vec{r}_i}{ds_i} = \frac{\partial L_i(\vec{R})}{\partial \vec{R}} \frac{d\vec{R}}{ds} \frac{ds}{ds_i} \tag{3}$$

โดยที่ $\frac{\partial L_i(\vec{R})}{\partial \vec{R}}$ เป็นจาโคเบียนเมตริกมีค่า

$$\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_i \sin(\theta + \alpha_i) \\ 0 & 1 & l_i \cos(\theta + \alpha_i) \end{bmatrix} \tag{4}$$

$\frac{d\vec{R}}{ds} = \vec{T}$ เป็นเวคเตอร์สัมผัสโค้งของส่วนโค้งการเคลื่อนที่ของโคบอท และ

$$\frac{ds}{ds_i} = \frac{1}{\left\| \mathbf{J}_i \vec{T} \right\|} \tag{5}$$

เวคเตอร์สัมผัสโค้ง $\vec{t}_i$ จึงลดรูปเป็น

$$\vec{t}_i = \mathbf{J}_i \vec{T} \frac{ds}{ds_i} = \frac{\mathbf{J}_i \vec{T}}{\left\| \mathbf{J}_i \vec{T} \right\|} \tag{6}$$

การหาเวคเตอร์ความโค้ง $\kappa_i \vec{n}_i$ หาได้จากอนุพันธ์ของเวคเตอร์สัมผัสโค้ง $\vec{t}_i$ เทียบกับความยาวส่วนโค้ง s_i

$$\frac{d\vec{t}_i}{ds_i} = \frac{d\mathbf{J}_i}{ds_i} \vec{T} \frac{ds}{ds_i} + \kappa \mathbf{J}_i \vec{N} \left(\frac{ds}{ds_i} \right)^2 + \mathbf{J}_i \vec{T} \frac{d^2 s}{ds_i^2} \tag{7}$$

แยกพิจารณาทีละพจน์และจัดรูปจะได้ เวคเตอร์ความโค้งดังสมการ

$$\kappa_i \vec{n}_i = \frac{\left(\mathbf{I} - t_i t_i^T \right)}{\left\| \mathbf{J}_i \vec{T} \right\|^2} \left\{ \begin{bmatrix} \vec{T}^T \mathbf{H}_{ix} \\ \vec{T}^T \mathbf{H}_{iy} \end{bmatrix} \vec{T} + \kappa \mathbf{J}_i \vec{N} \right\} \tag{8}$$

โดยที่ $\mathbf{H}_{ix}$ และ $\mathbf{H}_{iy}$ คือ เฮสเสียนเมตริก (Hessian matrix) หาได้จาก $\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{ix} \\ \mathbf{H}_{iy} \end{bmatrix} = \frac{\partial \mathbf{J}_i}{\partial \vec{R}}$

$$\mathbf{H}_{ix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -l_i \cos(\theta + \alpha_i) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{H}_{iy} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -l_i \sin(\theta + \alpha_i) \end{bmatrix} \quad (10)$$

ความเร็วเชิงมุมของมุมเลี้ยว $\dot{\phi}_i$ ของล้อที่ i เมื่อหุ่นยนต์โคบอทถูกกำหนดให้เคลื่อนที่ตามเส้นโค้ง s หาได้จากผลของการคูณเชิงเวคเตอร์ของความเร็วเชิงเส้น $u_i\vec{t}_i$ กับเวคเตอร์ความโค้ง $\kappa_i\vec{n}_i$ ดังสมการ

$$\dot{\phi}_i = u_i\vec{t}_i \times \kappa_i\vec{n}_i \quad (11)$$

โดยที่ u_i คือ ขนาดของความเร็วล้อที่ i

4.3 หุ่นยนต์โคบอทปรับรูปได้

หุ่นยนต์โคบอทปรับรูปได้ถูกพัฒนาต่อเนื่องจากหุ่นยนต์สกูตเตอร์โคบอท โดยระยะ l_i และ α_i สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามการเคลื่อนที่ ระยะดังกล่าวถูกกำหนดให้เปลี่ยนแปลงตามเวคเตอร์ตำแหน่ง $\vec{R}$ โครงสร้างของจลน์ศาสตร์ของโคบอทปรับรูปได้นั้น จะมีโครงสร้างเช่นเดียวกับหุ่นยนต์สกูตเตอร์โคบอท แต่โอเปอร์เรเตอร์ $L_i(\bullet)$, จาโคเบียนเมตริก J_i และเฮสเสียนเมตริก จะแตกต่างกัน ถ้ากำหนดให้มุม α_i เป็นค่าคงที่เช่นเดียวกับสกูตเตอร์โคบอท ระยะ l_i เป็นฟังก์ชั่นของ θ ตามสมการ

$$l_i = \varepsilon \sin(\theta) \quad (12)$$

ซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์โคบอทขยายและลดขนาดจากขนาดปกติตามแนว l_i ในช่วง $\pm\varepsilon$ ตำแหน่งของล้อที่ i จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$\vec{r}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = L_i(\vec{R}) = \begin{bmatrix} X + l_i \cos(\theta + \alpha_i) \\ Y + l_i \sin(\theta + \alpha_i) \end{bmatrix} \quad (13)$$

จาโคเบียนเมตริกจะอยู่ในรูป

$$J_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{\partial l_i}{\partial \theta}\cos(\theta + \alpha_i) - l_i \sin(\theta + \alpha_i) \\ 0 & 1 & \frac{\partial l_i}{\partial \theta}\sin(\theta + \alpha_i) + l_i \cos(\theta + \alpha_i) \end{bmatrix} \quad (14)$$

และเฮสเสียนเมตริกจะเป็น

$$H_{ix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{\partial^2 l_i}{\partial \theta} - l_i\right)\cos(\theta + \alpha_i) - 2\frac{\partial l_i}{\partial \theta}\sin(\theta + \alpha_i) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$H_{ix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{\partial^2 l_i}{\partial \theta} - l_i\right)\sin(\theta + \alpha_i) + 2\frac{\partial l_i}{\partial \theta}\cos(\theta + \alpha_i) \end{bmatrix} \quad (16)$$

5. การจำลองระบบจลน์ศาสตร์

ในการจำลองระบบจลน์ศาสตร์ด้วยคอมพิวเตอร์ กำหนดให้หุ่นยนต์โคบอทเคลื่อนที่ตามส่วนโค้งเฮลิกซ์(Helix) ซึ่งจะเห็นจุดศูนย์กลางโคบอทเคลื่อนที่เป็นวงกลมและโคบอทจะหมุนรอบตัวเองตามความสัมพันธ์

$$\vec{R} = \begin{bmatrix} a\cos\left(\frac{s}{\sqrt{a^2+b^2}}\right) \\ a\sin\left(\frac{s}{\sqrt{a^2+b^2}}\right) \\ b\frac{s}{\sqrt{a^2+b^2}} \end{bmatrix} \quad (4.14) \quad (17)$$

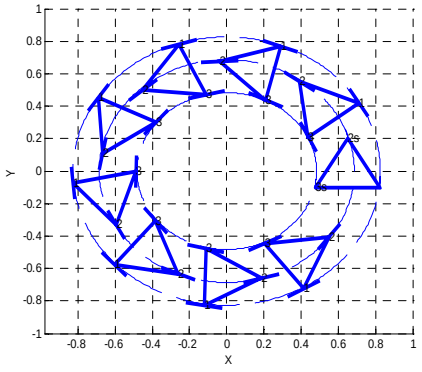
โดยที่ $a = 0.65$ และ $b = 1$ มีเวคเตอร์สัมผัสโค้งเป็น

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} -\frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}\sin\left(\frac{s}{\sqrt{a^2+b^2}}\right) \\ \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}\cos\left(\frac{s}{\sqrt{a^2+b^2}}\right) \\ \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

และมีเวคเตอร์ความโค้งเป็น

$$\kappa\vec{N} = \begin{bmatrix} -\frac{a}{(a^2+b^2)}\cos\left(\frac{s}{\sqrt{a^2+b^2}}\right) \\ -\frac{a}{(a^2+b^2)}\sin\left(\frac{s}{\sqrt{a^2+b^2}}\right) \\ \frac{b}{(a^2+b^2)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

ความเร็วในการเคลื่อนที่กำหนดให้เป็น 2 เมตร/วินาที ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 8 สามเหลี่ยมที่เป็นเส้นหนาแสดงโครงสร้างของโคบอทที่ตำแหน่งต่างๆขณะเคลื่อนที่ เส้นตรงที่มุมของสามเหลี่ยมแสดงแนวการวางตัวของล้อที่ความได้จากจลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทสมการที่ 11 และเส้นประแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของล้อที่หาได้จากการพลอตพิกัดของล้อที่ความยาวส่วนโค้ง s ต่างๆโดยตรงด้วยสมการที่ 2

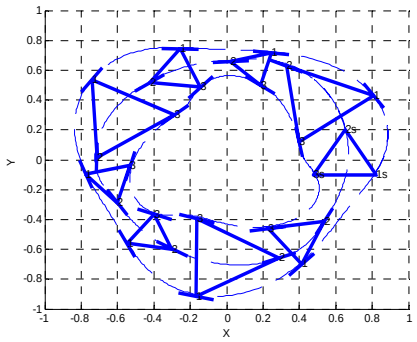


รูปที่ 8 ผลการจำลองการทำงานของลกูตเตอร์โคบอท

จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่า โคบอทเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด ความถูกต้องของการจำลองตรวจสอบได้จากแนวการวางตัวของล้อที่อยู่ในแนวเดียวกับเวคเตอร์สัมผัสโค้งของเส้นแสดงการเคลื่อนที่ของล้อตลอดการเคลื่อนที่

การจำลองจลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับรูป กำหนดหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามส่วนโค้งเฮลิกซ์ด้วยความเร็ว 2 เมตร/วินาที เช่นเดียวกับสกูตเตอร์โคบอท พร้อมกับให้หุ่นยนต์ปรับระยะ l_i ตามสมการที่ 12 โดยกำหนดให้ $\varepsilon = 0.1$ ผลการจำลองของจลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โค

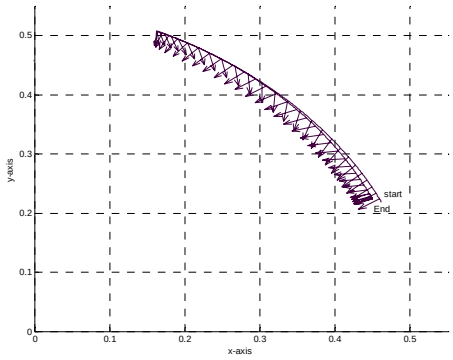
บอทปรับรูปได้แสดงในรูปที่ 9 จะเห็นว่าหุ่นยนต์โคบอทปรับขนาดเข้าออกขณะเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดและแนวล้อของหุ่นยนต์โคบอทอยู่ในแนวสัมผัสส่วนโค้งแสดงการเคลื่อนที่ของล้อนั้น ซึ่งได้จากการพลอตพิกัดของล้อที่ความยาวส่วนโค้ง s ต่างๆโดยตรงด้วยสมการที่ 12 และ 13



รูปที่ 9 ผลการจำลองการทำงานของโคบอทปรับรูปได้

6. ผลการทดลอง

การทดสอบการทำงานของโคบอท จะกำหนดให้โคบอทเคลื่อนที่ตามแนววงกลมรัศมี 0.516 เมตร ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 10 ลูกศรในรูปแสดงแรงของผู้ใช้ที่พยายามผลักโคบอทออกนอกเส้นทาง ขนาดแรงสูงสุด 15.6171 นิวตัน, ขนาดแรงต่ำสุด 10.2873 นิวตัน



รูปที่ 10 ผลการทดสอบจลน์ศาสตร์กับโคบอทต้นแบบ

7. สรุป

บทความนี้ได้กล่าวถึงการพัฒนาจลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอท โดยเริ่มจากการอธิบายจลน์ศาสตร์ของล้อ, จลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทแบบสกูตเตอร์, และจลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทปรับรูปได้ จากนั้นได้ทำการจำลองการทำงานของจลน์ศาสตร์ของสกูตเตอร์โคบอทและโคบอทปรับรูปได้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องจลน์ศาสตร์การปรับรูปที่ได้พัฒนาขึ้น รวมทั้งได้ดำเนินการทดสอบจลน์ศาสตร์ของหุ่นยนต์สกูตเตอร์โคบอทกับหุ่นยนต์ต้นแบบที่สร้างขึ้นประกอบการวิจัย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของจลน์ศาสตร์ ซึ่งจะได้พัฒนาจลน์ศาสตร์การปรับรูปและทำการทดลองกับหุ่นยนต์ต้นแบบต่อไป

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับการสนับสนุนงานวิจัยชิ้นนี้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

[1]. Colgate, J. E., W. Wannasuphoprasit and M. A. Peshkin, (1997), Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators, International Mechanical Engineering Congress and Exposition ASME, Atlanta. pp. 433-440.

[2]. Wannasuphoprasit, W., Gillespie, R. Brent, Colgate, J. E. and Peshkin, M. A., 1997, Cobot Control, IEEE International Conference on Robotics and Automation,Albuquerque, Vol. 4, pp. 3571-3576.

[3]. Moore, C. A., Peshkin M. A. and Colgate J. E., (1999), Design of a 3R Cobot Using Continuously Variable Transmissions, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation.

[4]. M.A. Peshkin., J.E. Colgate, C.A. Moore. W. Wannasuphoprosit. R.B. Gillespie. and P. Akella, Cobot Architecture, IEEE Trans. Robot. Automat. vol.17, 2001, pp377-389.

[5]. Wannasuphoprasit, W., and Sirikasemsuk, S., The Design and Development Of 3DP Cobotic Manipulato, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New Orleans, USA, IMECE 02-33839, 2002

[6]. Wannasuphoprasit, W., and Chanpat S., A Study and Develop of Fluid Cobot, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New Orleans, USA, IMECE 02-33840, 2002 .

[7]. E.L., Colgate, J.E.; Peshkin, M.A., A high performance 6-DOF haptic Cobot, . A high performance 6-DOF haptic Cobot IEEE Trans. Robot. Automat. vol.2, 2004, pp1980 – 1985.

[8]. Eric L., Faulring, J. E. , Colgate and M. A. Peshkin, 2004, A High Performance 6-DOF Haptic Cobot, Proceedings of the 2004 IEEE, International Conference Robotics & Automation, New Orleans, LA, April 2004.

[9]. วิทยา วัณณสุโภประสิทธ์ และ ศุภพน จันทร์พัฒน์, 2548, การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์โคบอทปรับรูปได้, การประชุมวิชาการทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ 2548 (CRIT 2005). สมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย, อิมแพค, เมืองทองธานี, นนทบุรี, 16-17 มิถุนายน 2548.

[10]. ภาวิต สุวจิตตานนท์ และ วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์, 2549, การจำลองเส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ Pantograph Cobot, การประชุมวิชาการทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ 2549 (CRIT 2006). สมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย, ศูนย์ประชุมไบเทค, บางนา, กรุงเทพมหานคร, 1-2 มิถุนายน 2549, หน้า 67-73.