

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์งูบนพื้นที่มีความลาดเอียง Climbing Gaits of a Wheel Snake Robot on a Slope

ธัญญ์นิธิ ขุนนิธิวรวัฒน์ และ ถวิดา มณีวรรณ

สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ท่าพระ กรุงเทพฯ 10140

chokdna@hotmail.com, praew@fibo.kmutt.ac.th

Thunniti Khunnithiwarat and Thavida Maneewarn

Institute of Field roBotics, King Mongkut's University of Technology Thonburi,

Thungkru, Bangkok, 10140, Thailand

chokdna@hotmail.com, praew@fibo.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์งูบนพื้นที่มีความลาดเอียง การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นั้นอาศัยการสร้างรูปคลื่นโดยตัวหุ่นยนต์เพื่อให้เกิดแรงเสียดทานในทิศทางที่ต้านแรงโน้มถ่วงที่กระทำกับหุ่นยนต์ ความสูงและเฟสของลูกคลื่นมีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์งู ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนที่สามรูปแบบคือ การเคลื่อนที่ที่อาศัยล้อขับเคลื่อนเพียงอย่างเดียวโดยหุ่นยนต์อยู่ในลักษณะเส้นตรง การเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์ซึ่งอาศัยเฉพาะการบิดลำตัวโดยไม่ใช้ล้อ และการเคลื่อนที่แบบร่วมกันทำงานซึ่งอาศัยแรงจากการบิดตัวร่วมกับการขับเคลื่อนของล้อ ซึ่งผลการทดลองพบว่าในพื้นที่ราบนั้นการเคลื่อนที่แบบร่วมกันทำงานมีความเร็วสูงกว่าการเคลื่อนที่อีกสองแบบ เมื่อมุม basis angle ของรูปคลื่นหุ่นยนต์มีค่าสูงหุ่นยนต์จะมีความสามารถในการขึ้นพื้นเอียงมากขึ้น แต่ในการขึ้นพื้นเอียงนั้นการเคลื่อนที่แบบร่วมกันทำงานไม่สามารถรักษาให้ล้อสัมผัสพื้นได้ตลอดเวลา ทำให้หุ่นยนต์เกิดการลื่นไถลขึ้นหากพื้นเอียงมีมุมเกิน 20 องศา

คำสำคัญ ; หุ่นยนต์งู, การเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์, active wheel snake robot locomotion

Abstract

This research aims to study the climbing motion of a wheel snake robot on slope. The wheel snake robot uses sinusoidal gaits to create the friction force to oppose the gravitational force. The amplitude and phase of the sinusoidal gaits affects the climbing performance of a wheel snake robot. In this work, three climbing gaits were compared: the active wheel with straight body, the sinusoidal gait with passive wheel and the combination

of sinusoidal gait and active wheel. The experimental results showed that the robot can move at the highest speed on flat ground with the combination gait. The basis angle in the combination gait directly relates to the climbing ability on slope. However, the combination gait cannot keep all wheels to stay contact with the ground, thus the robot was starting to slip when the slope is greater than 20 degrees.

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาหุ่นยนต์งูหลากหลายรูปแบบ ซึ่งโดยทั่วไปหุ่นยนต์งูจะมีลักษณะเป็นหุ่นยนต์หลายข้อต่อที่มีความซ้ำซ้อนกัน (Hyper-redundant robot) ซึ่งในงานวิจัยต่าง ๆ จะเน้นในเรื่องของการเคลื่อนที่ในสภาพพื้นผิวต่างๆ และสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป Hirose[1] ได้พัฒนาหุ่นยนต์โดยอาศัยหลักการ ACM ที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการบิดตัวและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ ต่อมาได้พัฒนาหุ่นยนต์ ACM-R3 เพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ให้เคลื่อนที่ 3 มิติได้ ทำให้มีความสามารถในการเคลื่อนที่ที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น Howie Choset[2] ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์หลายข้อต่อโดยอาศัยการควบคุมแบบ Differentiable และ Piecewise Differentiable Gaits ซึ่งทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ในสภาพพื้นผิวที่มีความขรุขระและพื้นต่างระดับได้ Johann Borenstein [3] ได้พัฒนาหุ่นยนต์ที่มีชื่อว่า OmniTread 4 เป็นหุ่นยนต์หลายข้อต่อที่มีสายพานในการขับเคลื่อนรอบตัวของหุ่นยนต์สามารถใช้ขึ้นอุปสรรคที่สูงกว่าตัวหุ่นยนต์และมีสภาพพื้นผิวขรุขระได้เป็นอย่างดี นายบุญเลิศ มณีฉาย[4] ได้พัฒนาหุ่นยนต์หลายข้อต่อในการเคลื่อนที่ในท่อแนวตั้ง ซึ่งรูปร่างและท่าทางการเคลื่อนที่ จะมีผล

โดยตรงต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งใช้หลักการกำหนดท่าทาง (Motion shape code) ในการออกแบบท่าทางการเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่โดยทั่วไปของหุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในสภาพพื้นผิวที่เรียบ และไม่มีแรงมากระทำในทิศทางที่สวนกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เราจึงได้พัฒนาหุ่นยนต์ที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ที่มากขึ้นโดยเพิ่มส่วนการขับเคลื่อนโดยใช้ล้อ เพื่อเพิ่มแรงในการเคลื่อนที่ให้มากขึ้น โดยอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างการบิดตัวของหุ่นยนต์และแรงขับเคลื่อนของล้อ ซึ่งในรายงานนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นเอียงของการเคลื่อนที่แบบการเคลื่อนที่ที่อาศัยล้อในการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์และการเคลื่อนที่แบบร่วมกันทำงาน (active wheel snake robot locomotion) ของหุ่นยนต์งู

2. ภาพรวมของระบบ

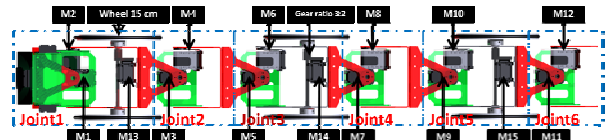
2.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์

การพัฒนาหุ่นยนต์งูล้อเพื่อเคลื่อนที่บนพื้นที่ต่างระดับได้พัฒนาหุ่นยนต์งู ซึ่งหุ่นยนต์มีความยาว 98 เซนติเมตร ความกว้าง 15 เซนติเมตร และความสูง 15 เซนติเมตร ประกอบไปด้วย 6 ข้อต่อ ซึ่งแต่ละข้อต่อจะมีองศาอิสระข้อต่อละ 2 องศาอิสระจำนวน 3 ข้อต่อคือข้อต่อที่ 2, 4 และ 6 และ 3 องศาอิสระ จำนวน 3 ข้อต่อ (เพิ่มล้อที่ใช้ในการขับเคลื่อน) คือข้อต่อที่ 1, 3 และ 5 โดยนำเอาข้อต่อของการเคลื่อนที่แบบล้อมาผสมกับการเคลื่อนที่ของงู โดยใช้ล้อเป็นตัวขับเคลื่อนหลักและใช้ท่าทางของงูในการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งแยกส่วนการขับเคลื่อนออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนขับเคลื่อนที่ด้วยล้อเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และส่วนควบคุมท่าทางของหุ่นยนต์ ซึ่งทั้งสองส่วนใช้เซอร์โวมอเตอร์ (Robotis AX-12) เป็นตัวขับเคลื่อนหลัก ซึ่งใช้มอเตอร์ทั้งหมด 15 ตัว

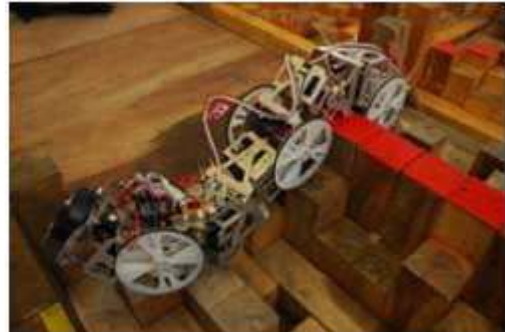


รูปที่ 1 CAD model ของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์มี 6 ข้อต่อ ซึ่งแต่ละข้อต่อจะมีองศาอิสระข้อต่อละ 2 องศาอิสระ สามารถแยกมอเตอร์เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมออกเป็นสองส่วนคือมอเตอร์ที่ควบคุมท่าทางของหุ่นยนต์ในแนวแกน Pitch และ Yaw โดยในส่วนของมอเตอร์ในแนวแกน Pitch มีมอเตอร์หมายเลข M2, M4, M6, M8, M10 และ M12 ซึ่งใช้ในการควบคุมท่าทางของหุ่นยนต์ในแต่ละข้อต่อในแนวตั้ง และส่วนของมอเตอร์ในแนวแกน Yaw มีมอเตอร์หมายเลข M1, M3, M5, M7, M9 และ M11 ซึ่งใช้ในการควบคุมท่าทางของหุ่นยนต์ในแต่ละข้อต่อในแนวนอน ในส่วนของการขับเคลื่อนที่ของล้อ มีจำนวนล้อทั้งหมด 6 ล้อซึ่งประกอบอยู่ใน 3 ข้อต่อ โดยที่ล้อนี้นั้นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ผ่านเฟืองทดส่งกำลัง ที่มีอัตราส่วน 3 : 2 ไปยังเพลาลูกเบี้ยวอยู่สองข้าง ซึ่งมีความเร็ว 0.05-0.25 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2



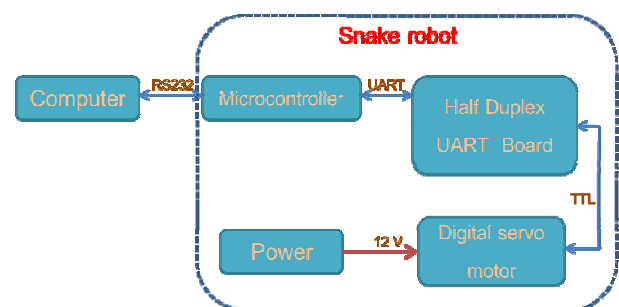
รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งของมอเตอร์ของหุ่นยนต์



รูปที่ 3 หุ่นยนต์ที่จัดสร้างขึ้น

2.2 ระบบการทำงานของหุ่นยนต์

ระบบของหุ่นยนต์ประกอบไปด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ บอร์ดแปลงสัญญาณ HALF DUPLEX UART แบตเตอรี่และหุ่นยนต์งู โดยที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านหน้าจอแสดงผล GUI ซึ่งระบบที่ควบคุมเป็นการควบคุมแบบระบบปิด การส่งข้อมูลผ่านทาง RS232 ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (ATMEL ATGEGA128) ผ่านบอร์ดส่งข้อมูลแบบ HALF DUPLEX UART ไปยังมอเตอร์ทุกตัว ซึ่งมอเตอร์ทุกตัวจะต่อแบบอนุกรมถึงกันหมด การควบคุมจะตรวจสอบจากหมายเลขของมอเตอร์ และตัวแปรที่ใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์แต่ละข้อต่อประกอบไปด้วย หมายเลขของมอเตอร์ ค่าตำแหน่งของมอเตอร์ และช่วงเวลาในการส่งข้อมูล ซึ่งข้อมูลที่ส่งไปนั้นจะเป็นชุดคำสั่งตามด้วยรูปแบบของมอเตอร์



รูปที่ 4 แผนผังระบบการทำงานของหุ่นยนต์

3 การเคลื่อนที่พื้นฐานของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์สามารถทำการควบคุมการเคลื่อนที่ได้ 2 รูปแบบคือ

3.1 การเคลื่อนที่แบบแยกส่วนการทำงาน

การเคลื่อนที่แบบนี้จะเป็นการทำงานของมอเตอร์เพียงแค่ส่วนเดียวในแต่ละครั้งของการทำงาน ซึ่งมีด้วยกัน 2 รูปแบบ

3.1.1 การเคลื่อนที่โดยการขับเคลื่อนของล้อ

การเคลื่อนที่โดยการขับเคลื่อนของล้อ ซึ่งการทำงานในโหมดนี้จะใช้การจัดเรียงลำดับล้อให้อยู่ในตำแหน่ง ที่ต้องการก่อน จึงสั่งการทำงานของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อให้เกิดการเคลื่อนที่ไปในทิศทางต่าง

- การเคลื่อนที่ไปด้านหน้าและถอยหลัง การทำงานของการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือถอยหลังนั้น เริ่มจากการปรับลำดับล้อให้อยู่ในตำแหน่งที่ 0 องศา และให้มอเตอร์รักษาตำแหน่งนั้นไว้ จากนั้นสั่งมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อให้ทำงานตามคำสั่งที่ให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือถอยหลัง ซึ่งเรียกว่า Forward Train และ Backward Train ตามลำดับ
- การเคลื่อนที่เลี้ยวซ้ายและเลี้ยวขวา การทำงานของการเคลื่อนที่ซ้ายและเลี้ยวขวา นั้น เริ่มจากการยกตัวเพื่อปรับลำดับล้อให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการเลี้ยวและให้มอเตอร์ปลดการทำงาน จากนั้นสั่งมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อให้ทำงานตามคำสั่งที่ให้เคลื่อนที่ไปตามทิศทางของลำดับ ตามแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งรูปหมายเลข 1 คือการปรับลำดับของการเลี้ยว และหมายเลข 2 คือ ทิศทางของลำดับหลังจากการเคลื่อนที่เลี้ยว



รูปที่ 5 แสดงลำดับการทำงานของหุ่นยนต์ในการเลี้ยวซ้ายและขวา

3.1.2 การเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์

การเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์ จะใช้หลักการขับเคลื่อนจากแรงในการบิดตัวเพื่อสร้างการเคลื่อนที่ไปในทิศทางต่างๆ โดยที่แรงในการบิดตัวนั้นเกิดจากการสร้างรูปคลื่นในลำดับของหุ่นยนต์ให้มีรูปแบบต่างๆ เพื่อสร้างแรงให้มีทิศทางตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยใช้หลักการของ motion shape code [4] ซึ่งเป็นวิธีการในการกำหนดท่าทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อยู่ อย่างหนึ่ง การกำหนดท่าทางการบิดลำดับล้อให้เกิดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือการกำหนดรูปร่าง (shape) และการกำหนดการเคลื่อนที่ (motion) ซึ่งการกำหนดรูปร่าง จะกำหนดด้วยมุม basis angle (α) สามารถรู้ได้จาก ความยาวของข้อต่อ และขนาดรูปคลื่นที่ต้องการ ส่วนการกำหนดการเคลื่อนที่ที่จะกำหนด shifting operation ด้วยเวลา คือการส่งข้อมูลไปยังแต่ละข้อต่อตามด้วย delay time หรือการหน่วงเวลาในการส่งข้อมูล เพื่อให้เกิดความเร็วของรูปคลื่นที่แตกต่างกัน การกำหนดท่าทางการเคลื่อนที่ที่จะอาศัยเวกเตอร์กำหนดท่าทาง หรือเรียกว่า motion shape vector จะเป็นเวกเตอร์ของแต่ละข้อต่อตามความยาวของหุ่นยนต์ ซึ่งงานวิจัยนี้จะกำหนดเวกเตอร์ของแต่ละข้อต่อเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม คือ -1,0,1 และมุมที่ใช้ควบคุมมอเตอร์จะได้จากชุดของ motion shape vector คูณกับค่า basis angle ดังสมการ

$$\theta_i = C_i * \alpha \quad (1)$$

เมื่อ θ_i คือตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ i

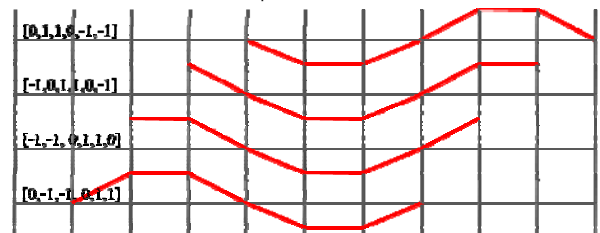
C_i คือ จำนวนเต็มตัวที่ i ของ motion shape vector

α คือ basis angle

ซึ่งค่า basis angle เป็นตัวแปรที่ใช้ปรับมุมแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ ในการกำหนดความสูงของรูปคลื่น (amplitude) แสดงในรูปที่ 6 เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนให้เกิดทิศทางแรงเสียดทานในการเคลื่อนที่แตกต่างกัน เพื่อสร้างแรงยึดเกาะขณะเคลื่อนที่



รูปที่ 6 แสดงรูปคลื่นของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ส่วนการส่งข้อมูลไปยังแต่ละข้อต่อเป็นการทำให้หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ โดยส่งงานไปยังมอเตอร์แต่ละข้อต่อทุก ๆ เวลาที่กำหนดไว้ เมื่อทำงานครบ 1 รอบแล้ว จะทำการเลื่อนข้อมูลของ motion shape vector หนึ่งครั้ง การเลื่อนตำแหน่งของข้อมูล ของ motion shape vector(cyclic shifting) เป็นการส่ง motion จากข้อต่อเดิมไปข้อต่อใหม่ ไปทางซ้าย - ขวา นั้นขึ้นอยู่กับทิศทางของการเคลื่อนที่ที่ต้องการ จากรูปที่ 7 แสดงการเคลื่อนที่ของรูปคลื่น และมีการการเลื่อนตำแหน่งของข้อมูล (cyclic shifting) ไปทางขวา จึงทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากด้านขวามาด้านซ้าย



รูปที่ 7 แสดงการเลื่อนของรูปคลื่นของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ซึ่งจากการกำหนดรูปแบบของรูปคลื่น ทำให้เราได้การเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์ ซึ่งในการเคลื่อนที่ที่รูปแบบนี้ หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ไป ได้แต่ความเร็วในการเคลื่อนที่ค่อนข้างช้า เพราะว่าล้อของหุ่นยนต์ไม่มีการทำงาน ทำให้แรงขับเคลื่อนที่เกิดจากแรงเสียดทานเหลือน้อยลง เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานของล้อกับพื้นผิวสัมผัส

3.2 การเคลื่อนที่แบบร่วมการทำงาน

การเคลื่อนที่แบบร่วมการทำงาน จะใช้หลักการขับเคลื่อนจากแรงในการบิดตัวและแรงจากมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อในการเคลื่อนที่ไปในทิศทางต่างๆ โดยที่แรงในการบิดตัวนั้นเกิดจากการสร้างรูปคลื่นในลำดับของหุ่นยนต์ให้มีรูปแบบต่างๆ เพื่อสร้างแรงให้มีทิศทางตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งจากการกำหนดรูปแบบของรูปคลื่น ทำให้เราได้การเคลื่อนที่แบบใหม่เพื่อมาใช้ในการเคลื่อนที่ร่วมกับแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของล้อของหุ่นยนต์ เพื่อทำให้เร็วในทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่เร็วขึ้น เมื่อทำการทดลองเคลื่อนที่บนพื้นเรียบ ทำให้เราได้ผลการทดลองตามตารางที่ 1 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าหากไม่มีการเคลื่อนที่ของล้อมาช่วย การเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์จะเคลื่อนที่ได้ช้า แต่หากนำมาทำงานร่วมกันจะได้ประสิทธิภาพของการเคลื่อนที่ที่ดีที่สุด

ตารางที่ 1 แสดงความเร็วของการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆ

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	Vmean(m/s)	Vmin(m/s)	Vmax(m/s)
การเคลื่อนที่โดยการขับเคลื่อนของล้อไปด้านหน้า	0.127	0.123	0.130
การเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์	0.051	0.049	0.046
การเคลื่อนที่ร่วมกันทำงาน	0.132	0.130	0.136

จากการทดลอง พบว่าการเคลื่อนที่ด้วยรูปคลื่นในขณะที่ไม่ทำงานใน ในขณะที่หุ่นยนต์หุ่นยนต์ปิดตัว แต่ล้อหยุดนิ่งทำให้แรงที่เกิดจากแรงเสียดทานในทิศการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์น้อยกว่าการเคลื่อนที่ด้วยรูปคลื่นในขณะที่ไม่ทำงานร่วมกัน ที่แรงขับเคลื่อนจากล้อมาเสริมทำให้เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ที่เป็นการเคลื่อนที่เวลาเท่ากันแต่การเคลื่อนที่แบบทำงานร่วมกันสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า ซึ่งเราเรียกการเคลื่อนที่แบบนี้ว่า active wheel snake robot locomotion



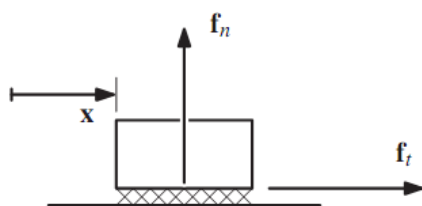
รูปที่ 8 แสดงการเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์



รูปที่ 9 แสดงการเคลื่อนที่ active wheel snake robot locomotion

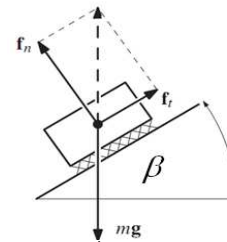
4 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นเอียง

ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นั้น ต้องอาศัยการออกแรงกระทำพื้นผิว ในการเคลื่อนที่ไปในทิศทางต่างๆ กล่าวคือ แรงเสียดทานสถิตจะเป็นแรงที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ ตามกฎของ coulomb ซึ่งเมื่อออกแรงดึงวัตถุบนพื้นราบ f_a จึงทำให้เกิดแรงเสียดทาน f_f ซึ่งจะมีค่าเท่ากับเมื่อวัตถุไม่มีการเคลื่อนที่ และค่าแรงเสียดทานที่มากที่สุดคือ f_t



รูปที่ 10 แสดงแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำกับวัตถุ

จากรูปที่ 10 เมื่อพิจารณาแรงเสียดทานของวัตถุที่สัมผัสพื้น เมื่อมีแรงมากระทำทำให้วัตถุมีการเคลื่อนที่ไปบนระนาบ เมื่อ x คือระยะทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ f_n คือแรงในแนวตั้งฉากกับพื้นสัมผัสของวัตถุ และ f_t คือแรงในแนวสัมผัสของพื้นกับวัตถุ จากกฎของ coulomb นั้นมีเงื่อนไขของแรง จะขึ้นอยู่กับลักษณะในการเคลื่อนที่ เมื่อเราสนใจการรักษาวัตถุไม่ให้ไถลบนพื้นเอียง เมื่อทำการทดสอบหามุมที่มากที่สุดของพื้นเอียงที่กระทำกับพื้นราบ β ที่ทำให้วัตถุอยู่นิ่งบนพื้นเอียง ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงการลื่นไถลของวัตถุบนพื้นเอียง

เพื่อที่จะหาแรงในแนวสัมผัสและแรงในแนวตั้งฉาก สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$f_n = mg \cos \beta \quad (2)$$

$$f_t = mg \sin \beta \quad (3)$$

ที่วัตถุอยู่นิ่ง $|f_t| \leq \mu f_n$ นั้นจะได้ค่า β มากสุดเมื่อ

$$f_t = \mu f_n \quad (4)$$

แทนค่า

$$mg \sin \beta = \mu mg \cos \beta \quad (5)$$

$$\beta = \tan^{-1} \mu \quad (6)$$

มุม β บางครั้งเรียกว่ามุม friction cone หรือมุมของแรงเสียดทาน หรือมุมพิง (angle of repose) การกำหนดกรวยเสียดทานนั้นเป็นไปตามกฎของ coulomb สำหรับวัตถุที่ไม่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 7 ดังนี้

$$|f_t| \leq \mu f_n \quad (7)$$

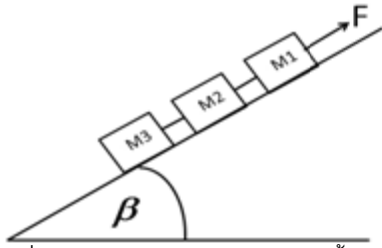
ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานของวัตถุเป็นส่วนสำคัญในการคำนวณหามุม friction cone วัสดุต่างๆ นั้นสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานของพื้นผิววัสดุ แต่ละชนิดนั้นๆ ได้จากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานได้จาก $\mu = \tan \beta$ ซึ่งทำการทดสอบตามรูปที่ 11

จากการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างล้อของหุ่นยนต์กับพื้นไม้ ตามรูปที่ ได้มุม β เท่ากับ 27 องศา ดังนั้น มุม friction cone คำนวณจาก

$$\mu = \tan \beta \quad (8)$$

$$\mu = 0.452$$

ซึ่งแต่ละจุดสัมผัสของล้อของหุ่นยนต์ที่สัมผัสกับพื้นเอียง จะต้องออกแรงให้มันค้ำอยู่ในมุม friction cone หรือมากกว่า เพื่อที่จะให้เกิดแรงเสียดทานสถิตในการยึดเกาะของหุ่นยนต์ให้อยู่กับที่โดยไม่เกิดการลื่นไถล ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งตัวหุ่นยนต์มีจุดที่สัมผัสพื้นเอียง 3 ข้อต่อ



รูปที่ 12 แสดง model ของหุ่นยนต์บนพื้นเอียง เมื่อพิจารณาหุ่นยนต์ให้เป็นวัตถุ 3 ก้อนตามจุดสัมผัส จะได้

$$f_{t1} = m_1 g \sin \beta - \mu m_1 g \cos \beta \quad (9)$$

$$f_{t2} = m_2 g \sin \beta - \mu m_2 g \cos \beta \quad (10)$$

$$f_{t3} = m_3 g \sin \beta - \mu m_3 g \cos \beta \quad (11)$$

ฉะนั้น แรงที่หุ่นยนต์สามารถทรงตัวอยู่บนพื้นเอียงโดยไม่เกิดการลื่นไถลคือ

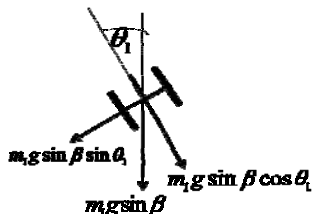
$$F \geq f_{t1} + f_{t2} + f_{t3} \quad (12)$$

จากรูปที่ 12 และสมการที่ 9-11 หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่บนพื้นเอียงได้ และไม่เกิดการลื่นไถล หุ่นยนต์จะต้องมีขับเคลื่อน มากกว่าผลรวมของแรงเสียดทาน f_{t1} , f_{t2} และ f_{t3} และเมื่อหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่เป็นรูปคลื่น ทำให้ล้อของหุ่นยนต์ทำมุมกับแนวตั้งของพื้นเอียงที่ค่าต่างๆ ซึ่งมีผลในการยึดเกาะของล้อกับพื้นเอียง



รูปที่ 13 แรงทิศทางที่ล้อกระทำกับพื้น

จากรูปที่ 13 เมื่อนำหุ่นยนต์ไปเคลื่อนที่บนพื้นเอียง เราต้องการทราบ ว่าทิศทางของล้อมีผลต่อการยึดเกาะ จึงนำไปคิดหา แรงเสียดสถิตที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ในขณะที่ยุคดิ่งบนพื้นเอียง ทำให้เกิดแนวแรงตามรูปที่ 14



รูปที่ 14 ทิศทางแรงที่ล้อใน 1 ข้อต่อ

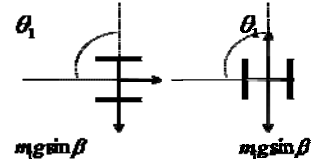
ซึ่งเขียนออกมาเป็นสมการดังนี้

$$f_{t1} = m_1 g \sin \beta \cos \theta_1 - \mu m_1 g \cos \beta \quad (13)$$

$$f_{t2} = m_2 g \sin \beta \cos \theta_2 - \mu m_2 g \cos \beta \quad (14)$$

$$f_{t3} = m_3 g \sin \beta \cos \theta_3 - \mu m_3 g \cos \beta \quad (15)$$

แรงที่เกิดขึ้นกับล้อจะมีแค่ทิศทางเดียวเท่านั้น คือในการกลิ้งตามผิวโค้งของล้อแต่จะไม่มีการกระทำด้านข้างของล้อ ซึ่งเมื่อค่าของ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ มีค่ามากเท่าไร จะทำให้แรงที่ใช้ในการทรงตัวบนพื้นเอียงของหุ่นยนต์น้อยลง ซึ่งจากรูปที่ 15 แสดงให้เห็นว่า ที่ $\theta_1 = 90^\circ$ จะทำให้ $m_i g \sin \beta$ ไม่มีผลต่อการยึดเกาะของหุ่นยนต์ทำให้สามารถที่อยู่บนพื้นเอียงโดยไม่ต้องออกแรงขับ ในขณะที่เดียวกัน $\theta_1 = 0^\circ$ จะทำให้ $m_i g \sin \beta$ มีค่าเท่ากับ $m_i g$ ซึ่งเป็นค่าของแรงเสียดทานที่ต้องใช้แรงในการขับเคลื่อนมากที่สุด



รูปที่ 15 แสดงการวางตัวของล้อในตำแหน่งที่ $\theta_1 = 90^\circ$ และ $\theta_1 = 0^\circ$

ตามลำดับ

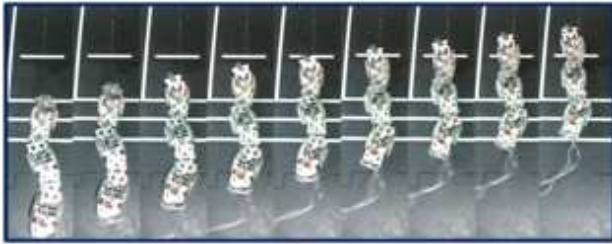
ซึ่งจากข้อสมมติฐานดังกล่าวเราจึงทำการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อยู่บนพื้นเอียงเพื่อที่จะได้ตรวจสอบว่ามุม θ จะมีผลการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์หรือไม่ ซึ่งมุม θ คือค่า basis angle (α) ของการเคลื่อนที่แบบ active wheel snake robot locomotion

3.การทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นเอียง

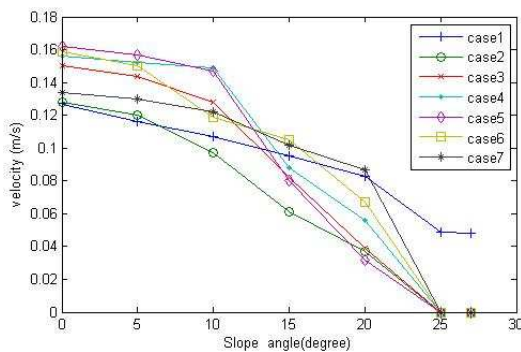
การเคลื่อนที่บนพื้นเอียงของหุ่นยนต์ ต้องอาศัยแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นสัมผัสของพื้นเอียง จะต้องมีความเพียงพอที่จะรับน้ำหนักไม่ให้หุ่นยนต์เกิดการลื่นไถลที่จุดสัมผัส ซึ่งในระดับของพื้นเอียงที่มากขึ้นย่อมอาศัยแรงเสียดทานที่มากขึ้น ในการรับแรงที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ขึ้นได้ ซึ่งทิศทางของการวางตัวของล้อมีส่วนในการเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะบนพื้นเอียง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่ามุมของ basis angle เพื่อที่จะได้ตรวจสอบว่าการวางตัวของล้อ ที่องศาต่างๆนั้นมีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่บนพื้นเอียงหรือไม่ จึงได้ทดสอบค่าของ basis angle นั้นมีผลอย่างไรกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นระยะทางบนพื้นเอียง 1 เมตรแล้วบันทึกเวลาในการเคลื่อนที่เพื่อที่จะได้ความเร็วในการเคลื่อนที่บนพื้นเอียงระดับต่างๆ ซึ่งพื้นเอียงที่ใช้ในการทดสอบ มีขนาด 120×240 เซนติเมตร ซึ่งสามารถปรับมุมของการเอียงได้ตั้งแต่ $0-50$ องศา (β) ในการทดลองเราต้องการศึกษาว่าทิศทางของล้อที่กระทำกับพื้นเอียงมีผลต่อความสามารถของการเคลื่อนที่บนพื้นเอียงหรือไม่ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือค่าของ basis angle ที่แตกต่างกัน ซึ่งจากความสามารถของหุ่นยนต์ที่ทำมุมบิดได้สูงสุดที่ ± 55 องศา เราจึงได้กำหนดการเคลื่อนที่ทั้งหมดเป็น 7 กรณีตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงตัวแปรที่ใช้กำหนดการเคลื่อนที่ของแต่ละกรณี

motion	basis angle α (deg)	shift time (ms)	speed wheel
Case 1	0	0	400
Case 2	9	10	400
Case 3	18	15	400
Case 4	27	20	400
Case 5	36	20	400
Case 6	45	30	400
Case 7	54	30	400



รูปที่ 16 แสดงการเคลื่อนที่บนพื้นเอียงของหุ่นยนต์งู



รูปที่ 17 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วในการเคลื่อนที่กับองศาของพื้นเอียง ของการเคลื่อนที่แต่ละกรณี

ซึ่งผลการทดลองเป็นการเปรียบเทียบความเร็วของการเคลื่อนที่บนพื้นเอียงของแต่ละระดับ ซึ่ง การทดลองทำให้ทราบว่า case 1 ที่เป็นการเคลื่อนที่ตรงขึ้นพื้นเอียงนั้น สามารถที่จะเคลื่อนที่ขึ้นพื้นเอียงได้สูงสุดที่ 37 องศา แต่ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่พื้นที่มีความลาดเอียงน้อยจะเคลื่อนที่ได้ค่อนข้างช้า หากเทียบกับการเคลื่อนที่ในกรณีอื่นๆ แต่เมื่อการเคลื่อนที่แบบ active wheel snake robot locomotion ที่มีค่าของ basis angle ที่แตกต่างกันออกไปพบว่า เมื่อองศาของความลาดเอียงยิ่งเยอะ case 6 และ case 7 สามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่ากรณีอื่น ซึ่งเนื่องจากองศาของล้อที่กระทำกับพื้นเอียงทำมุมกับแนวตั้งมากกว่ากรณีอื่นๆ ทำให้มีแรงยึดเกาะที่มากกว่า แต่ที่องศาที่ 25 องศา การเคลื่อนที่แบบ active wheel snake robot locomotion ไม่มีกรณีใดเลยที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นขึ้นไปได้ เนื่องจากในขณะที่มีการเคลื่อนที่มีล้อของหุ่นยนต์กลายชิ้นมาทำให้จุดสัมผัสของหุ่นยนต์น้อยลง จึงเกิดการสั่นไถลบนพื้นเอียงทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ใน เมื่อทำการทดสอบเรื่องของการยกตัวของล้อมีผลต่อการความสามารถหรือไม่ ปรากฏว่าเมื่อแกน Pitch รัศมีตำแหน่งที่ 0 องศาตลอดเวลานั้นทำให้ล้อสัมผัสพื้นทั้งหกล้อ แต่ทำให้ การเคลื่อนที่มีความเร็วที่ช้าลง เพราะว่าหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นล้อที่มีเพลาร่วมกัน

ของล้อซ้ายและขวา ทำให้ในขณะที่สร้างแรงบิดที่ตัวล้อซ้ายและขวา จะไม่เท่ากันแต่เมื่อมีเพลาร่วมกันทำให้ล้ออีกด้านเป็นภาระให้ล้ออีกหนึ่งแทน แต่ในกรณีที่แกน Pitch ที่ไม่รัศมีตำแหน่ง โดยการปลดแรงบิดของมอเตอร์ให้เท่ากับศูนย์ สามารถเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงกับการทดลองแรก จึงทำทราบว่าในกรณีที่หุ่นยนต์งูที่ใช้เพลาร่วมระหว่างล้อซ้ายและล้อขวาในการเคลื่อนที่ในแบบ active wheel snake robot locomotion ระหว่างการเคลื่อนที่ล้อบางล้อจะถูกแรงยกให้ลอยจากพื้นเพื่อใช้ล้ออีกล้อหนึ่งให้เคลื่อนที่ไปได้

6. สรุป

ในงานวิจัยนี้เราศึกษาทิศทางการวางตัวของล้อของหุ่นยนต์ ว่ามีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่บนพื้นที่แตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองปรากฏว่า การเคลื่อนที่แบบ active wheel snake robot locomotion เมื่อมีองศาของพื้นเอียงมีค่ามากขึ้น การเคลื่อนที่ที่มีมุมของ basis angle เท่ากับ 45 องศา มีความสามารถในการเคลื่อนที่ที่ดีที่สุดในการเคลื่อนที่ลักษณะนี้ แต่เนื่องด้วยหุ่นยนต์ที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะของเพลาร่วมกันของล้อซ้ายและขวา ทำให้ในขณะที่เคลื่อนที่หุ่นยนต์มีการยกตัวของล้อด้านนอกของรูปคลื่น ทำให้เมื่อพื้นเอียงมีความชันที่มากขึ้น จุดสัมผัสของหุ่นยนต์น้อยลงจึงมีความสามารถในการเคลื่อนที่น้อยกว่าการเคลื่อนที่ที่อาศัยล้อในการเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตรง ที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นพื้นเอียงได้ถึง 27 องศา ซึ่งหากพื้นเอียงมีความชันที่มากกว่านั้นในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่จะเกิดการสั่นไถลของล้อเกิดขึ้น ทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นพื้นเอียงได้

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(ว.1)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mori, M., and Hirose, S., 2001. Development of Active Cord Mechanism ACM-R3 with Agile 3D mobility. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- [2] Lipkin, K., Brown, I., Peck, A., Choset, H., Rembisz, J., Gianfortoni, P., and Naaktgeboren, A., 2007. Differentiable and Piecewise Differentiable Gaits for Snake Robots. International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- [3] William, R., Hutchison, Betsy, J., Constantine, Johann, B., and Jerry, P., 2007. Development of Control for a Serpentine Robot. , IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation.
- [4] Maneechai, B., 2008. Study of Hyper-Redundant robot motion in a vertical pipe. Master degree thesis, Institute of Field Robotics, King Mongkut's University of Technology Thonburi [KMUTT] .