

## การศึกษาคุณลักษณะของการไถลที่ล้อแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ไต่ผนัง Study of Slip Characteristics in a Magnetic Wheel for a Wall Climbing Mobile Robot

ตฤณโชค เอี่ยมมนัสสกุล\* และ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330.

\* ติดต่อ: โทรศัพท์ 0 2218 6585, โทรสาร 0 2218 6583

Email : Trinnachoke.E@Student.chula.ac.th, Viboon.S@eng.chula.ac.th

### บทคัดย่อ

หุ่นยนต์ไต่ผนังถูกใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายของถังขนาดใหญ่ โดยใช้ล้อแม่เหล็กสร้างแรงยึดเกาะกับผนัง หุ่นยนต์นี้จะต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดโดยไม่มี ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเพื่อการตรวจวัดถึงที่ถูกต้อง การไถลที่ล้อแม่เหล็กเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางที่กำหนดไว้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้น การศึกษาคุณลักษณะของการไถลที่ล้อแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ไต่ผนังสองชนิดคือ หุ่นยนต์ล้อตีนตะขาบ และหุ่นยนต์ รูปแบบสามล้อ โดยทำการทดลองให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงทั้งในแนวตั้งและแนวราบบนพื้นผิวต่างๆ แล้ว เปรียบเทียบการกระจัดที่เคลื่อนที่ไปกับค่าที่คำนวณได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ที่ถูกติดตั้งบนแต่ละล้อ

**คำหลัก:** คุณลักษณะของการไถล, ล้อแม่เหล็ก, หุ่นยนต์ไต่ผนัง, การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

### Abstract

Magnetic wall climbing robots are proposed to the Nondestructive Testing (NDT) of large tanks in industrial plants by the use of magnetic wheels to create the traction force between the wheels and tanks. The mobile robots must travel along the desired path without any position errors to maintain the test accuracy. The wheel slippage is the critical factor resulting in the path deviation. This research focuses on studying the slip characteristics in magnetic wheels of wall climbing robots, namely, Track-driven robots and Tricycle robots. The mobile robots were implemented to travel along straight lines in vertical and horizontal planes and on different surfaces. Measured displacements and distances computed from the encoders' revolutions on each wheel are compared and analyzed.

**Keywords:** Slip characteristic, Magnetic wheel, Magnetic wall climbing robot, Nondestructive testing

### 1. บทนำ

หุ่นยนต์ไต่ผนังถูกใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing, NDT) ของถังขนาดใหญ่ เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของผนังเหล็กและรอยเชื่อม ระหว่างแผ่นเหล็กที่ใช้ประกอบถัง หุ่นยนต์เหล่านี้มักมี วิธีการยึดเกาะกับผนังเหล็กด้วยการใช้ล้อแม่เหล็ก เนื่องจากแม่เหล็กถาวรสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นสูง ประกอบกับการสัมผัสกันโดยตรง ระหว่างล้อแม่เหล็กและผนังเหล็กทำให้สูญเสียแรง

ดึงดูดแม่เหล็กน้อยมาก จึงสามารถสร้างแรงยึดเกาะกับ ผนังได้สูง ในขณะที่ใช้เนื้อที่การติดตั้งน้อย นอกจากนี้ แม่เหล็กยังไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกเพิ่มเติม ทำให้ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับ การยึดเกาะประเภทอื่น

ในการใช้งานจริง หุ่นยนต์ไต่ผนังจะต้องสามารถ เคลื่อนที่บนผนังของถังในแนวตั้งได้ตามเส้นทางที่กำหนด อย่างแม่นยำ เพื่อให้อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Sensor) ซึ่งติดตั้งบนหุ่นยนต์สามารถ

ตรวจสอบได้ถึงตรงตามตำแหน่งที่ต้องการ ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ควรมีค่าน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย จากงานวิจัยก่อนๆ พบว่า ปัจจัยที่มีผลทำให้การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ตามตำแหน่งที่ต้องการสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ความผิดพลาดเนื่องจากระบบ (Systematic Errors) เช่น ขนาดของล้อหุ่นยนต์ไม่เท่ากันและความเยื้องศูนย์ของล้อ และความผิดพลาดนอกเหนือจากระบบ (Non-systematic Errors) เช่น การเคลื่อนที่บนพื้นที่ไม่สม่ำเสมอและการเกิดการไถลที่ล้อ

การไถลที่ล้อเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เนื่องจากหุ่นยนต์ได้ผนังติดตั้งเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoders) ที่ล้อเพื่อวัดมุมการหมุนของล้อและประมาณระยะทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (Odometry) หากเกิดการไถลขึ้นที่ล้อใดล้อหนึ่ง เอ็นโค้ดเดอร์จะยังคงวัดการหมุนของล้อ ในขณะที่ไถล ระยะทางที่ประมาณได้จะไม่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่เชิงเส้นของหุ่นยนต์ และส่งผลให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางที่กำหนดไว้

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาคุณลักษณะของการไถลที่ล้อแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ได้ผนังสองชนิดคือ หุ่นยนต์ล้อตีนตะขาบ และหุ่นยนต์รูปแบบสามล้อ โดยทำการทดลองให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงทั้งในแนวตั้งและแนวราบบนพื้นผิวต่างๆ แล้วเปรียบเทียบการกระจัดที่เคลื่อนที่ไปกับค่าที่คำนวณได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ซึ่งถูกติดตั้งบนแต่ละล้อ

## 2. ลักษณะของหุ่นยนต์ได้ผนังที่ทำการศึกษ

### 2.1 หุ่นยนต์ล้อตีนตะขาบ (Track-driven Robots)

หุ่นยนต์ดังรูปที่ 1 ใช้มอเตอร์สองตัวเพื่อขับเคลื่อนล้อของล้อตีนตะขาบแต่ละข้างแบบแยกกันอิสระ (Differential Drive) การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นี้ถูกกำหนดด้วยอัตราการหมุนของล้อขับ ถ้าล้อทั้งสองมีอัตราการหมุนเท่ากันในทิศทางเดียวกัน ก็จะทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง แต่ถ้าล้อข้างหนึ่งมีอัตราการหมุนเร็วกว่า ก็จะทำให้หุ่นยนต์เลี้ยว หรือถ้าทั้งสองล้อมีอัตราการหมุนเท่ากันแต่มีทิศทางตรงข้ามกัน หุ่นยนต์ก็จะหมุนรอบตัวเอง แต่การเลี้ยวหรือหมุนของล้อตีนตะขาบจะทำให้เกิดการไถลที่ล้อทำให้ตำแหน่งของหุ่นยนต์ขณะเลี้ยวคลาดเคลื่อนไป



รูปที่ 1 ลักษณะของหุ่นยนต์ล้อตีนตะขาบและอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ

ในการทดลองนี้ใช้ล้อตีนตะขาบประกอบด้วยซี่ล้อข้างละ 44 ซี่ ซึ่งได้ติดแผ่นแม่เหล็กขนาดเล็กลงบนซี่ล้อแบบซี่เว้นซี่แล้วหุ้มด้วยยาง หุ่นยนต์จึงมีแม่เหล็กอยู่บนล้อทั้งสองข้างรวม 44 แผ่น โดยมีแผ่นแม่เหล็กที่จะสัมผัสกับพื้นจำนวน 22 แผ่นเพื่อสร้างแรงยึดเกาะกับผนังเหล็กขนาดของหุ่นยนต์โดยรวมกว้างยาวและสูง 40, 32, และ 6.5 เซนติเมตรตามลำดับ มีน้ำหนักสุทธิ 1.409 กิโลกรัม

การสั่งการเคลื่อนที่สามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ (Transmitters) ส่งคำสั่งการทำงานไปสู่อุปกรณ์รับสัญญาณวิทยุ (Receivers) ที่ติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์ และสามารถอ่านค่ามุมหมุนและอัตราการหมุนของล้อได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ซึ่งติดตั้งไว้ที่ล้อแต่ละข้าง ผ่านการรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) และแสดงผลบนซอฟต์แวร์ MATLAB real-time workshop

ข้อดีของหุ่นยนต์ชนิดนี้คือ มีพื้นที่ในการติดตั้งแม่เหล็กมาก จึงสามารถสร้างแรงดึงดูดแม่เหล็กและเกาะกับผนังเหล็กได้ดี อีกทั้งยังมีความสามารถปีนข้ามอุปสรรคได้ดี

### 2.2 หุ่นยนต์รูปแบบสามล้อ (Tricycle Robots)

หุ่นยนต์ดังรูปที่ 2 ใช้มอเตอร์สองตัวเพื่อขับเคลื่อนล้อซึ่งเป็นล้อแม่เหล็กแบบแยกกันอิสระ และมีล้อหลังเป็นล้อลูกเลื้อนซึ่งหมุนกลิ้งได้ทุกทิศทาง

ล้อแม่เหล็กชนิดนี้สร้างจากการนำแผ่นเหล็กมาประกบแม่เหล็กรูปวงแหวนที่ทั้งสองข้าง ดังรูปที่ 2 - 3 โดยแม่เหล็กจะต้องมีลักษณะการจัดเรียงขั้วแม่เหล็กตามแนวแกน แผ่นเหล็กนี้ถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่าแม่เหล็กวงแหวน เพื่อให้สวมยางโอริงเพิ่มในช่องว่าง ทำให้ล้อมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากขึ้น สามารถขับเคลื่อนไปข้างหน้าได้โดยมีโอกาสน้อยลง ล้อลักษณะนี้สามารถเพิ่มแรงแม่เหล็กได้มากกว่าการใช้แม่เหล็กสัมผัสกับผนังเหล็กโดยตรง เนื่องจากเหล็กมีความต้านทานต่อฟลักซ์แม่เหล็กน้อยกว่าอากาศ ฟลักซ์

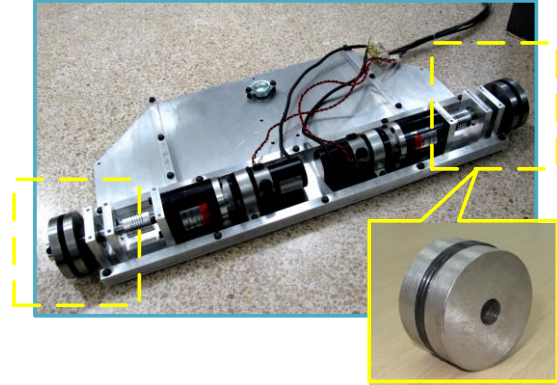
แม่เหล็กจากขั้วเหนือส่วนใหญ่จึงไหลผ่านแผ่นเหล็กที่ติดบริเวณขั้วเหนือ จากนั้นฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะผ่านผนังเหล็ก เข้าสู่แผ่นเหล็กที่ฝั่งตรงข้าม แล้วจึงเข้าสู่ขั้วใต้ของแม่เหล็กครบเป็นวงจร เรียกว่า วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit) ล้อแม่เหล็กในการทดลองนี้ใช้แม่เหล็กที่มีขนาดวงนอก 42 มิลลิเมตร วงใน 10 มิลลิเมตร และความหนา 6 มิลลิเมตร สำหรับแผ่นเหล็กจะมีขนาดวงนอก 71 มิลลิเมตร วงใน 9.5 มิลลิเมตร และความหนา 10 มิลลิเมตร พบว่าสามารถให้แรงแม่เหล็กได้มากถึง 30 กิโลกรัมในแนวตั้งตั้งฉากกับผนังเหล็ก ในขณะที่หุ่นยนต์มีความกว้าง 62.4 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร และสูง 7.1 เซนติเมตร มีน้ำหนักสุทธิ 5.889 กิโลกรัม อย่างไรก็ตามการใช้แผ่นเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงและมีความหนามากขึ้นจะทำให้แรงแม่เหล็กสูงยิ่งขึ้น

หุ่นยนต์ที่ใช้ทดลองนี้สามารถส่งการเคลื่อนที่จากซอฟต์แวร์ MATLAB real-time workshop ผ่านการ์ดรับส่งข้อมูล และอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) ให้มอเตอร์ของหุ่นยนต์ขับเคลื่อนล้อแม่เหล็กทั้งสองข้าง เอ็นโค้ดเดอร์ที่ติดตั้งกับมอเตอร์จะอ่านค่ามุมหมุนและอัตราการหมุนที่ได้ เมื่อนำค่าเหล่านี้มาชดเชยอัตราเพื่อทดก็จะได้ค่ามุมหมุนและอัตราการหมุนของล้อแต่ละข้าง

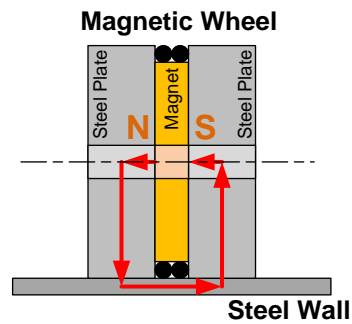
### 3. การไถลของล้อ

จากแผนภาพแสดงภาระ (Load) ที่เกี่ยวข้องกับล้อทั้งสองประเภทขณะเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งดังรูปที่ 4 - 5 จะพบว่า ในขณะที่ล้อหมุนจะเกิดแรงเสียดทาน (Traction Force,  $f$ ) กระทำต่อล้อ ถ้าค่าสูงสุดแรงเสียดทานนี้มากกว่าแรงบิดที่สร้างจากมอเตอร์ของล้อจะทำให้ล้อสามารถกลิ้งไปข้างหน้าได้โดยไม่มีไถล (Pure Rotation) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติพบว่า เงื่อนไขนี้มักไม่เป็นความจริง ล้อจะเกิดการไถลทำให้ระยะทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากมุมหมุนของล้อ จึงไม่สามารถประมาณการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผ่านการวัดมุมหมุนของล้อได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นการที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรือความหน่วงมากหรือด้วยความเร็วสูงทั้งในเส้นทางตรงและการเลี้ยวโค้ง จึงเป็นปัจจัยที่ทำให้ล้อเกิดการไถลได้ง่าย วิธีการป้องกันการไถลจึงต้องหลีกเลี่ยงลักษณะการเคลื่อนที่ดังกล่าวและควรเพิ่มแรงเสียดทานสูงสุดระหว่างล้อและพื้น เช่น การตัดแปลงล้อด้วยวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction) มากขึ้นหรือการเพิ่มแรงปฏิกิริยาจากพื้นในแนวตั้งฉาก (Normal

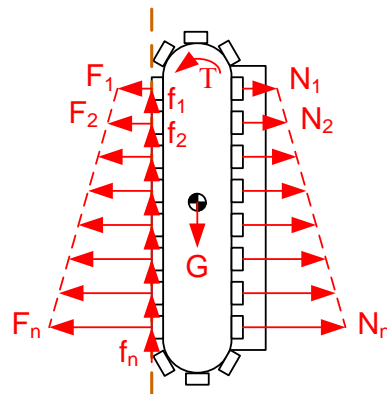
Force) สำหรับหุ่นยนต์ที่ใช้ล้อแม่เหล็กจะมีแรงปฏิกิริยานี้เพิ่มขึ้นด้วยแรงแม่เหล็ก ทำให้มีโอกาสเกิดการไถลน้อยลง



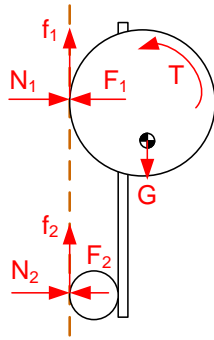
รูปที่ 2 ลักษณะของหุ่นยนต์รูปแบบสามล้อโดยมีล้อแม่เหล็กทั้งสองเป็นล้อขับ



รูปที่ 3 วงจรแม่เหล็กของล้อแม่เหล็กขณะยึดเกาะกับผนัง



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงภาระที่เกี่ยวข้องกับซี่ล้อของหุ่นยนต์ล้อตีนตะขาบขณะเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้ง



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงภาวะที่เกี่ยวข้องกับล้อแม่เหล็กของหุ่นยนต์รูปแบบสามล้อขณะเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้ง

4. การทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นผิวต่างๆ

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการไหลที่ล้อแม่เหล็กเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในเส้นทางตรง บนพื้นผิวต่างๆ โดยสังเกตพฤติกรรมการเคลื่อนที่และตำแหน่งของหุ่นยนต์ทั้งสองชนิดคือแบบล้อตีนตะขาบและแบบรูปแบบสามล้อ

4.1 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ทำโดยสั่งการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงบนพื้นผิวต่างๆ จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งสิ้นสุด หลังจากนั้นจึงวัดการกระจัดของหุ่นยนต์ว่าแตกต่างจากเส้นทางที่กำหนดไว้เท่าไรและเมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางที่คำนวณได้จากการหมุนของเอ็นโค้ดเดอร์แล้วมีความแตกต่างอย่างไร

จากรูปที่ 6 เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์มีพิกัดคือ  $(x, y) = (0, 0)$  จะสามารถคำนวณการกระจัดได้จากตำแหน่งสุดท้ายของหุ่นยนต์  $(x_f, y_f)$  ดังสมการที่ (1)

$$S_{av,displacement} = \sqrt{x_f^2 + y_f^2} \quad (1)$$

ระยะทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สามารถคำนวณได้จากการหมุนของเอ็นโค้ดเดอร์ที่ติดตั้งบนล้อซ้ายและขวา จะได้ระยะทางของล้อแต่ละข้างดังสมการที่ (2) - (3)

$$S_L = \alpha_L R_L \quad (2)$$

$$S_R = \alpha_R R_R \quad (3)$$

สมมติว่ารัศมีของล้อทั้งสองข้างมีขนาดเท่ากันและหุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งเล็กน้อยและสามารถประมาณเส้นทางการกลิ้งของล้อเป็นเส้นตรงได้ จะประมาณระยะทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้จากการเฉลี่ยระยะทางของล้อทั้งสองข้างเป็นไปตามสมการที่ (4)

$$S_{av,encoder} = \frac{S_L + S_R}{2} = \left( \frac{\alpha_L + \alpha_R}{2} \right) R \quad (4)$$

ค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คือ

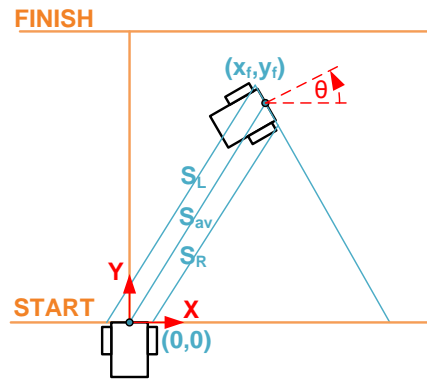
$$S_{av,error} = S_{av,displacement} - S_{av,encoder} \quad (5)$$

ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากการไหลที่ล้อของหุ่นยนต์ เนื่องจากเป็นความแตกต่างระหว่างระยะทางที่เคลื่อนที่ได้จริงและการคำนวณจากมุมหมุนของล้อ

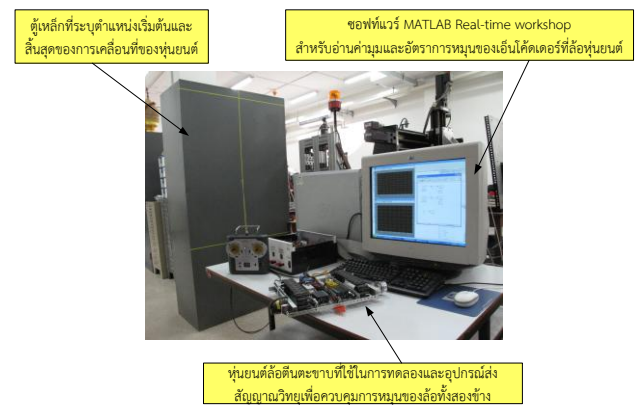
4.2 ชุดการทดลอง

ชุดการทดลองดังรูปที่ 7 ประกอบด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB real-time workshop, การ์ดรับส่งข้อมูล, พื้นผิวที่ต้องการทดลอง, อุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ (สำหรับหุ่นยนต์ล้อตีนตะขาบ) และอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (สำหรับหุ่นยนต์รูปแบบสามล้อ)

พื้นผิวที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ผนังเหล็กหนา 0.8 มิลลิเมตร สำหรับทดลองเคลื่อนที่ทั้งในแนวตั้งและแนวราบ และพื้นหินขัดสำหรับทดลองเคลื่อนที่ในแนวราบ



รูปที่ 6 ตำแหน่งของหุ่นยนต์เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการเคลื่อนที่ในการทดลอง



รูปที่ 7 ชุดการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ล้อตีนตะขาบ

#### 4.3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ล้อตีนตะขาบ

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทางที่วัดได้จากการกระจัดและจากการคำนวณมุมหมุนของเอ็นโค้ดเดอร์มีแนวโน้มอย่างชัดเจนว่า หุ่นยนต์ที่ติดตั้งล้อแม่เหล็กสามารถเคลื่อนที่บนผนังเหล็กแนวนอนได้ตรงตามเส้นทางที่กำหนดได้มากที่สุด และผลรองลงมาคือการเคลื่อนที่บนผนังเหล็กแนวตั้งและพื้นหินขัดแนวราบตามลำดับ โดยที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ทิศทางลงในแนวตั้งหรือไปข้างหลังในแนวราบได้คลาดเคลื่อนน้อยกว่าในทิศทางตรงข้าม

นอกจากนี้ความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากการลื่น (Skidding) อีกด้วย การลื่นจะทำให้จุดศูนย์กลางของล้อเคลื่อนที่ไปมากกว่าระยะทางที่เกิดจากการหมุนของล้อซึ่งเป็นลักษณะตรงข้ามกันกับการไถล ในการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าการลื่นมักเกิดขึ้นในการเคลื่อนที่บนพื้นแนวนอน โดยเฉพาะการเคลื่อนที่บนพื้นหินขัดจะสังเกตได้ว่า ล้อของหุ่นยนต์เกิดการลื่นทุกครั้ง ในขณะที่การเคลื่อนที่บนผนังเหล็กแนวนอนมีการลื่นเพียงเฉพาะในการทดลองที่ 9 และ 10 เท่านั้น

อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ล้อตีนตะขาบมีข้อสังเกตคือ เนื่องจากล้อตีนตะขาบ ประกอบด้วยซี่ล้อจำนวนมากที่สัมผัสกับพื้น ทำให้ไม่ทราบว่าการไถลของซี่ล้อเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใด อีกทั้งการไถลที่เกิดขึ้นที่ซี่ล้อหนึ่งจะส่งผลต่อซี่อื่นๆ ด้วย เนื่องจากซี่ล้อที่ไถลจะมีระยะทางในการเคลื่อนที่จริงน้อยกว่าระยะทางที่คำนวณได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ ดังนั้นซี่ล้อทั้งหมดจะไม่เคลื่อนที่ไปพร้อมกัน จึงทำให้แรงดึงในล้อตีนตะขาบเปลี่ยนไป ซึ่งอาจส่งผลให้ซี่ล้ออื่นๆ ที่ได้รับแรงดึงมากเกินไป มีโอกาสเกิดการไถลด้วยเช่นกัน

#### 5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า หุ่นยนต์ล้อตีนตะขาบเกิดการไถลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง บนพื้นเหล็กแนวราบและแนวตั้ง และพื้นหินขัดในแนวราบ ดังเห็นได้จากการกระจัดของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ไปไม่สอดคล้องกับการหมุนของล้อ โดยล้อแม่เหล็กสามารถเคลื่อนที่บนพื้นเหล็กได้ดีกว่า

#### 5. งานวิจัยในอนาคต

นอกจากหุ่นยนต์ล้อตีนตะขาบแล้ว ควรศึกษาและทดลองหุ่นยนต์รูปแบบสามล้อด้วยการทดลองเดียวกัน

เพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับการไถลที่ล้อแม่เหล็กมากยิ่งขึ้น และสามารถเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการใช้งานหุ่นยนต์แต่ละประเภท หลังจากทราบลักษณะของการไถลที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แล้ว จะสามารถออกแบบตัวควบคุมสำหรับล้อแม่เหล็กและหุ่นยนต์เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ได้ตามเส้นทางที่ต้องการ

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการศูนย์ระดับภูมิภาคเทคโนโลยีหุ่นยนต์ภายใต้โครงการเพิ่มศักยภาพด้านวิศวกรรมศาสตร์สหสาขา ในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬาฯ 100 ปี)

#### 7. เอกสารอ้างอิง

##### 2.1 บทความจากวารสาร (Journal)

[1] Yiliang Jin, Jiapin Chen and Zhenbo Li (2009). *A Magnetic Wheel Structure for an Omnidirectional Microrobot to Limit Slip Effect*, *Advanced Robotic System*, vol. 6, No. 4 (2009), pp. 277-284.

[2] Johann Borenstein and Liqiang Feng (1996). *Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots*, *Robotics and Automation*, vol. 12, No. 6 (1996), pp. 869-880.

##### 2.2 บทความจากเอกสารประกอบการประชุม (Proceedings)

[1] Jared D. Terry and Mark A. (2008). *Traction Estimation and Control for Mobile Robots using the Wheel Slip Velocity*, paper presented in 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, France.

[2] Yu Tian, Naim Sidek and Nilanjan Sarkar (2009). *Modeling and Control of a Nonholonomic Wheeled Mobile Robot with Wheel Slip Dynamics*, paper presented in Computational Intelligent in Control and Automation, Nashville, Tennessee, USA.

##### 2.3 หนังสือ

[1] George A. Bekey (2005). *Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control*, The MIT Press, London.

ตารางที่ 1 การกระจัดของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยจากวัดจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด และจากการคำนวณด้วยมุมหมุนของล้อ และความผิดพลาดของระยะทางระหว่างทั้งสองวิธี

พื้นผิว: ผนังเหล็กแนวตั้ง					
การทดลอง	ทิศทาง	การกระจัด (เซนติเมตร)	ระยะทางที่คำนวณ จากเอ็นโค้ดเดอร์ (เซนติเมตร)	ความผิดพลาดของ การเคลื่อนที่ (เซนติเมตร)	ความผิดพลาดเฉลี่ย (เซนติเมตร)
1	ขึ้น	123.702	124.910	-1.208	-0.915
2	ขึ้น	120.804	121.501	-0.698	
3	ขึ้น	119.704	120.542	-0.838	
4	ลง	-108.427	-108.500	-0.074	-0.182
5	ลง	-132.714	-133.098	-0.385	
6	ลง	-131.916	-132.003	-0.087	
พื้นผิว: ผนังเหล็กแนวนอน					
7	หน้า	111.902	112.964	-1.062	-0.521
8	หน้า	112.700	113.328	-0.628	
9	หน้า	123.707	123.581	0.126	
10	หลัง	-119.702	-119.255	0.447	-0.116
11	หลัง	-124.869	-125.052	-0.183	
12	หลัง	-118.300	-118.913	-0.613	
พื้นผิว: พื้นหินขัดแนวนอน					
13	หน้า	126.593	118.435	8.158	7.893
14	หน้า	124.796	117.188	7.609	
15	หน้า	132.134	124.220	7.914	
16	หลัง	-119.739	-114.311	5.428	5.710
17	หลัง	-120.101	-115.164	4.937	
18	หลัง	-120.353	-113.587	6.766	

หมายเหตุ: เครื่องหมายของตัวเลขระยะทางและความผิดพลาดอ้างอิงจากพิกัดแกนในรูปที่ 6