หุ่นยนต์แบบลำตัวยืดหยุ่น สำหรับการไต่ท่อโดยการยึดเกาะด้วยแม่เหล็ก

Flexible Body Pipe Climbing Robot with Magnetic Adhesion

วสันต์ บุญลีลากุล[1] และ ถวิดา มณีวรรณ์[2]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

[2] สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

*ติดต่อ: praew@fibo.kmutt.ac.th, โทร02-4709339

บทคัดย่อ

หุ่นยนต์แบบลำตัวยืดหยุ่นประกอบด้วยชุดขับเคลื่อนด้านหน้าและหลัง ซึ่งมีชุดยึดเกาะด้วยแม่เหล็กเพื่อยึดตัวหุ่นยนต์ให้ติดกับพื้นผิวท่อ ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไต่ท่อได้ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน ชุดยึดเกาะด้วยแม่เหล็กสามารถปรับระยะระหว่างแม่เหล็กถาวรกับผิวท่อได้ เพื่อให้แรงยึดเกาะเหมาะสมกับการเคลื่อนที่ และยังสามารถปลดหรือดูดชุดขับเคลื่อนจากพื้นผิวของท่อได้อีกด้วย แรงยึดเกาะที่สร้างขึ้นจากแม่เหล็กถาวรนี้สามารถรองรับน้ำหนักทั้งหมดของหุ่นยนต์ได้ แม้ในกรณีที่ชุดยึดเกาะด้านหนึ่งถูกปลดออก ลำตัวของหุ่นยนต์ทำจากลวดสปริงสามเส้น ซึ่งจะสามารถควบคุมให้มีส่วนโค้งในสามมิติตามที่ต้องการได้จากการควบคุมความยาวของลวดสปริงแต่ละเส้น ส่วนลำตัวที่ยืดหยุ่นนี้ทำให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางตามแนวท่อ เช่น หัววาล์ว และยังสามารถบังคับให้ลำตัวโค้งงอตามข้อต่อของท่อได้อีกด้วย

คำหลัก: หุ่นยนต์เคลื่อนที่ การยึดเกาะด้วยแม่เหล็ก การไต่ท่อ ลำตัวแบบยืดหยุ่น

Abstract

The proposed robot design has the front and back module that has a magnetic adhesion mechanism and wheels. In the front and the back module, four wheels are installed for forward and backward propulsion. The magnetic adhesion mechanism can be adjusted the distance between the permanent magnet and the pipe surface to provide different levels of adhesive force between the robot module and the ferrite pipe. These modules can also be controlled to attach and detach from the surface. The adhesive force in each module is designed so that it can hold the total weight of the robot when the other module is detached from the surface. The body of the robot is designed to have the flexible property. Three parallel spring rods are used to construct its body. The length of these spring rods can be adjusted independently so that the robot's body can be controlled into a 3D curve. When the obstruction is encountered, the robot can be controlled to bend around it so that the front module can be attached to the unobstructed location.

Keywords: Mobile robot, Magnetic adhesion, Pipe climbing, Flexible body

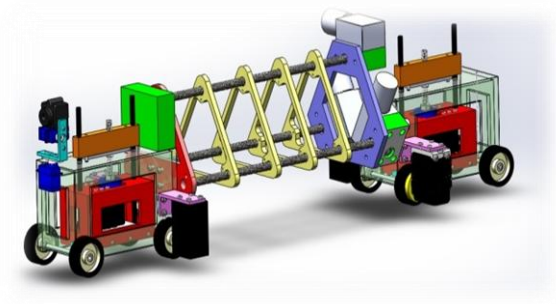
1. บทนำ

ในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีใช้ระบบท่อในการขนถ่ายสารเคมีหรือของเหลวเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการขนถ่ายผ่านระบบท่อมีต้นทุนในการทำงานต่ำและมีความสะดวกกว่าการขนถ่ายแบบอื่นๆ จึงทำให้ต้องมีการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย หรือเมื่อพบความเสียหายขนาดเล็ก ก็ทำให้สามารถแก้ไขได้ก่อน การสำรวจเบื้องต้นมักเป็นการตรวจแบบใช้การสังเกต (visual inspection) คืออาศัยมนุษย์เดินตรวจท่อทีละเส้น ซึ่งต้องใช้ทั้งเวลาและทรัพยากรมนุษย์จำนวนมากในการตรวจสอบ

แต่ละครั้ง และมีค่าใช้จ่ายสูง ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดในสร้างหุ่นยนต์ตรวจพื้นผิวท่อขึ้นมา เพื่อความสะดวกรวดเร็ว ลดระยะเวลา ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง และเป็นการนำเทคโนโลยีหุ่นยนต์เข้ามาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม ในต่างประเทศมีการออกแบบหุ่นยนต์ที่ใช้ล้อแม่เหล็กเพื่อการตรวจสอบท่อโลหะ เช่น MagneBike[1] ซึ่งมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ต่างระดับได้โดยอาศัยกลไกในการยกชุดล้อ ในส่วนของการออกแบบลำตัวให้มีความยืดหยุ่น เพื่อการไต่ต้นไม้ Lam และ Xu [2] ได้ออกแบบหุ่นยนต์ที่มีชื่อว่า Treebot ซึ่งมีลำตัวแบบยืดหยุ่น ทำให้สามารถปีนต้นไม้โดยการยืดและหดลำตัวได้

2. การออกแบบหุ่นยนต์แบบลำตัวยืดหยุ่น

หุ่นยนต์แบบลำตัวยืดหยุ่นได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำรวจความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวท่อเหล็ก โดยอาศัยการยึดเกาะและการขับเคลื่อนจากชุดขับเคลื่อน ลำตัวของหุ่นยนต์ทำจากสปริง 3 เส้นทำให้ตัวหุ่นยนต์มีความยืดหยุ่นและสามารถเคลื่อนไหวได้หลายแกน จึงเป็นข้อได้เปรียบในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางต่างๆ ดังรูปที่ 1 โดยได้กำหนดน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ ไว้ที่ประมาณ 2.5 kg

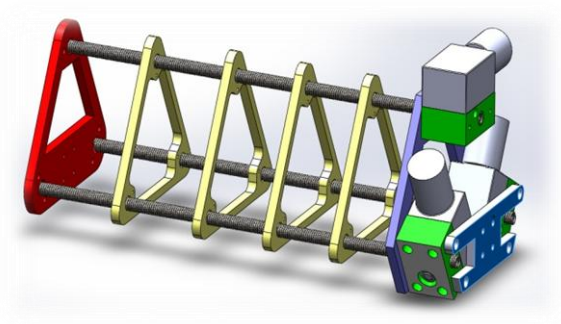


รูปที่ 1 การออกแบบหุ่นยนต์แบบลำตัวยืดหยุ่น

2.1. รูปแบบการทำงานของชุดลำตัวยืดหยุ่นของหุ่นยนต์

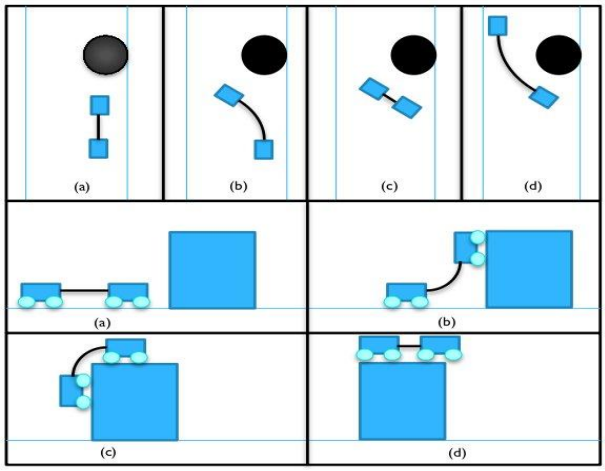
ส่วนประกอบของระบบลำตัวยืดหยุ่นซึ่งประกอบไปด้วย สปริง 3 เส้น จัดวางแบบขนานกัน ระยะทางระหว่างจุดกึ่งกลางห่างเท่ากัน และทำมุม 120 องศา ปลายด้านหนึ่งของสปริงถูกยึดติดไว้กับแผ่นโครง ในขณะที่อีกด้านสามารถสไลด์ผ่านมอเตอร์เพื่อควบคุมระยะของสปริงระหว่างแผ่นโครงสองด้าน ในการควบคุมระยะของสปริงทำให้เกิดการโค้งงอ และการยืดหดได้ โดยในระบบนี้จะมีตัวขับเคลื่อน 3 ตัว ทำให้สามารถเคลื่อนที่เป็นส่วนโค้งในสามมิติ โดยการขับเคลื่อนในระบบนี้จะใช้หลักการ rack and pinion mechanism ทำให้สามารถยืดหดได้อย่างไม่จำกัด ตามหลักการทางทฤษฎีของ continuum manipulator

ซึ่งในการทดสอบระยะยืดจะถูกจำกัดโดยระยะของสปริง และสปริงควรจะทำหน้าที่โค้งงอได้อย่างเดียวไม่ควรจะยืดหรือหดตัวได้ (ความยาวคงที่) โดยส่วนของ Continuum Manipulator ถูกออกแบบให้สามารถงอที่ได้ 180 องศาในแต่ละแกน และสปริงแต่ละเส้น สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกนได้ด้วยความเร็วสูงสุด 0.0157 m/s, มีแรงดึงสูงสุด 160 N/เส้น, มีระยะยืด 0.3 m, สามารถรับน้ำหนักที่ปลายได้ 4 kg และมี Triangle bracing ทำหน้าที่รักษาระยะห่างของสปริงแต่ละเส้น ดังภาพที่ 2



รูปที่ 2 การออกแบบส่วนลำตัวยืดหยุ่นของหุ่นยนต์

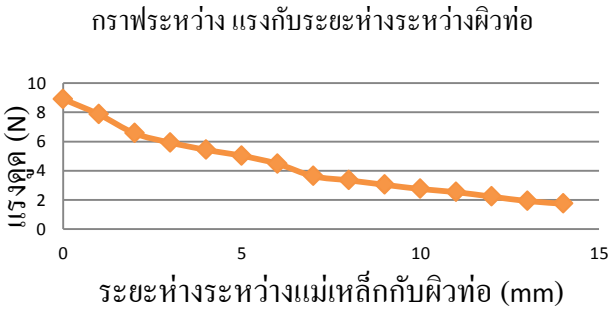
การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยการใช้ล้อที่ส่วนขับเคลื่อนด้านหน้า และส่วนขับเคลื่อนด้านหลังเป็นตัวขับเคลื่อน โดยแต่ละชุดขับเคลื่อนจะมีมอเตอร์ จำนวน 1 ตัว และขับเคลื่อนแบบ 2 ล้อ มีล้ออิสระ 2 ล้อ ส่วนกระบวนการหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยทำการโค้งงอ และการยืดหดลำตัวหุ่นยนต์เพื่อให้ส่วนขับเคลื่อนเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่หลบสิ่งกีดขวาง หรือใช้เพื่อข้ามสิ่งกีดขวาง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบการเคลื่อนที่เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางและไต่ท่อ

2.2. ชุดระบบขับเคลื่อนหุ่นยนต์

2.2.1. ส่วนการควบคุมระยะห่างแม่เหล็ก



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดูดกับระยะห่างจากผิวท่อการควบคุมระยะห่าง

(Air Gap) ระหว่างแม่เหล็กกับผิวท่อ โดยอาศัยการวัดระยะของ Infrared Sensor ที่ติดอยู่ด้านหน้าของ Magnetic Platform จากนั้นจะทำการปรับระยะของ Magnetic Platform โดยใช้ Servo Motor เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะได้โดยที่ผิวหน้าของแม่เหล็กไม่สัมผัสกับพื้นผิวของโลหะ ดังรูปที่ 4 จากการทดลองเพื่อหาแรงดูดของแม่เหล็กต่อระยะ air gap โดยระยะห่าง air gap ในช่วงใช้งานจะอยู่ในช่วง 5 mm ซึ่งสามารถรับน้ำหนักได้ 5 kg มีค่า Safety factor เท่ากับ 2 และสามารถข้ามสิ่งกีดขวางที่ผิวได้ เช่น รอยเชื่อมท่อ เป็นต้น ชุดยก Magnetic Platform ถูกออกแบบให้มีแรงยกสูงสุด 20.73 kg และสามารถเคลื่อนที่ ขึ้น-ลง ได้ด้วยความเร็ว 0.0008503 m/s

2.2.2 ส่วนขับเคลื่อน

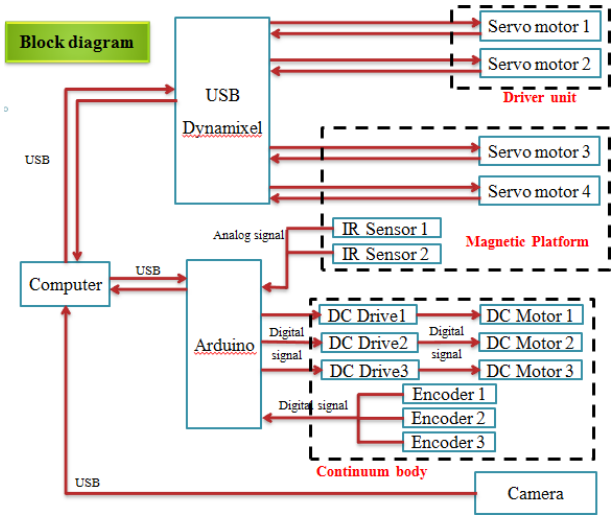
การเคลื่อนที่ของชุดขับเคลื่อน จะเป็นแบบ Direct Drive โดยใช้ Servo Motor และควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยใช้ Pulse Width Modulation (PWM) โดยถูกออกแบบให้มีแรงขับสูงสุด (maximum torque) 0.5886 Nm ในชุดขับเคลื่อนส่วนหน้าจะมีการติดตั้งกล้องถ่ายภาพและวีดีโอพื้นผิวท่อ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งมาแสดงผลที่จอภาพของผู้ควบคุม ช่วยให้ผู้ควบคุมหุ่นยนต์สามารถตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นบริเวณผิวท่อได้และทำการซ่อมบำรุงต่อไป

3. ระบบควบคุมของหุ่นยนต์แบบลำตัวยืดหยุ่น

หุ่นยนต์แบบลำตัวยืดหยุ่นได้พัฒนาขึ้นตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5 ระบบควบคุมของหุ่นยนต์แบบลำตัวยืดหยุ่นอาศัยการควบคุมจากผู้ควบคุมผ่านทางคอมพิวเตอร์ ส่วนขับเคลื่อนของหุ่นยนต์มีสองชุด ซึ่งทั้งชุดหน้าและชุดหลังประกอบด้วยเซอร์โวมอเตอร์สองตัวซึ่งขับล้อ และเซอร์โวมอเตอร์หนึ่งตัวในการปรับระยะยึดเกาะของแม่เหล็ก

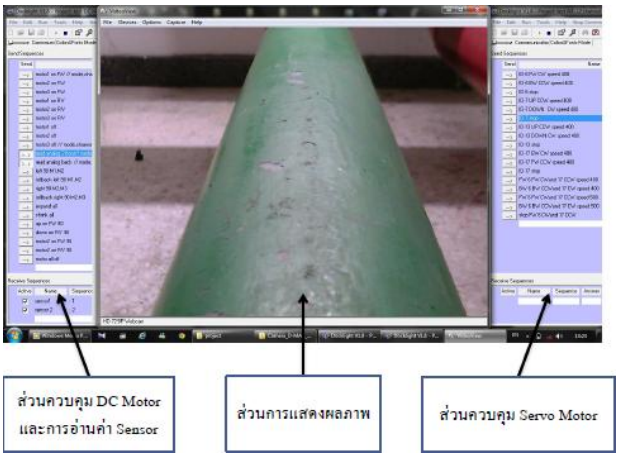
รูปที่ 5 หุ่นยนต์แบบลำตัวยืดหยุ่น

ชุดขับเคลื่อนรับคำสั่งจากอุปกรณ์ USB Dynamixel ซึ่งทำหน้าที่ส่งผ่านคำสั่งการควบคุมความเร็วจากคอมพิวเตอร์ไปยังมอเตอร์แต่ละตัวในชุดลำตัวยืดหยุ่นของหุ่นยนต์ประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงและ Encoder 3 ตัว การควบคุมระยะเคลื่อนที่ของลวดสปริงจะเป็นการควบคุมผ่านบอร์ด Arduino ซึ่งจะส่งคำสั่ง PWM ไปยังชุดขับมอเตอร์กระแสตรง (motor driver module) และรับสัญญาณพัลส์จาก Encoder รวมทั้งค่าความห่างระหว่างแม่เหล็กกับชุดยึดเกาะซึ่งได้จาก IR sensor ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมจะติดต่อกับบอร์ด Arduino ผ่านทาง RS-232 ดังแสดงใน รูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพแสดงโครงสร้างของระบบควบคุมในหุ่นยนต์แบบลำตัวยืดหยุ่น

ระบบซอฟท์แวร์สำหรับควบคุมหุ่นยนต์จะประกอบด้วยส่วนควบคุมมอเตอร์กระแสตรงสำหรับลำตัวยืดหยุ่นและแสดงค่าของเซนเซอร์ต่างๆ ส่วนควบคุมเซอร์โวมอเตอร์สำหรับชุดขับเคลื่อน และส่วนแสดงผลภาพซึ่งได้รับจากกล้องที่ติดตั้งอยู่ทางด้านหน้าของหุ่นยนต์ GUI ของระบบซอฟท์แวร์สำหรับควบคุมหุ่นยนต์ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ซอฟท์แวร์สำหรับควบคุมการทำงาน และแสดงภาพของหุ่นยนต์แบบลำตัวยืดหยุ่น

4. การทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์

หลังจากที่ได้พัฒนาหุ่นยนต์ขึ้นได้ทำการทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์โดยการสั่งงานให้เคลื่อนที่ในสภาวะต่างๆ บนท่อเหล็กขนาด 8 นิ้ว และปรับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับผิวท่อให้เท่ากับ 5 mm

ชุดขับเคลื่อนถูกสั่งให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็ว 0.037 m/s รูปแบบการเคลื่อนที่ที่ได้ทำการทดสอบประกอบด้วย การเคลื่อนที่ในแนวราบ แนวดิ่ง ด้านข้างท่อ และการเคลื่อนที่ผ่านข้อต่อ 45 องศา 90 องศา และเช็ควาล์ว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้บนท่อทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง แต่ในกรณีของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ความเร็วของหุ่นยนต์ลดลง เนื่องจากเกิดการไถลอันเป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วงที่กระทำกับตัวหุ่นยนต์ ในการเคลื่อนที่ด้านข้างท่อ ผลที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อตัวหุ่นยนต์ในด้านข้างทำให้การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ค่อยๆ เอียงไปจนกระทั่งตัวหุ่นยนต์ไปอยู่ทางด้านล่างของท่อ ในส่วนของการเคลื่อนที่ผ่านข้อต่อและเช็ควาล์วนั้น ลำตัวที่ยืดหยุ่นของหุ่นยนต์ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ผ่านข้อต่อรูปแบบต่างๆได้ ไม่ว่าจะเป็นข้อต่อแบบ 45 หรือ 90 องศา แต่การควบคุมความโค้งของลำตัวหุ่นยนต์ทำได้ค่อนข้างยาก จึงควรที่จะมีการศึกษาต่อไปในการสร้างระบบควบคุมแบบอัตโนมัติให้ลำตัวของหุ่นยนต์สามารถโค้งงอตามเส้นโค้งในสามมิติในรูปแบบต่างๆโดยอาศัยการคำนวณอินเวอร์สไคเนมาติกส์

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆ

การเคลื่อนที่บนท่อ	ความเร็วเฉลี่ย (m/s)	หมายเหตุ
แนวราบ	0.0374	
แนวดิ่ง	0.0128	
ด้านข้าง	-	เคลื่อนที่เอียงไปทางด้านล่างของท่อ
ผ่านข้อต่อ	-	ผ่านได้ทั้งข้อต่อ 45 และ 90 องศา รวมถึงการข้ามเช็ควาล์ว และข้ามแนวท่อได้

รูปที่ 8 ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆ

5. สรุป

หุ่นยนต์แบบลำตัวยืดหยุ่นได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการตรวจสอบภายนอกท่อโลหะด้วยลักษณะ ลำตัวที่ยืดหยุ่นอาศัยการขับเคลื่อนของลวดสปริงสามเส้นเพื่อทำให้ลำตัวหุ่นยนต์มีการโค้งงอในส่วนโค้งสามมิติ คุณลักษณะดังกล่าวทำให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการเคลื่อนที่หลบสิ่งกีดขวางตามแนวท่อ เช่น หัววาล์วและการเคลื่อนที่ตามข้อต่อฉากได้ หุ่นยนต์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถไต่ท่อได้ทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง โดยอาศัยชุดขับเคลื่อนสองชุดที่บริเวณหัวและท้ายหุ่นยนต์ ชุดขับเคลื่อนแต่ละชุดจะมีแม่เหล็กถาวรติดตั้งอยู่ โดยจะมีระบบควบคุมระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับผิวท่อเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถสร้างแรงยึดเกาะที่เหมาะสมได้ในระหว่างการเคลื่อนที่ รวมทั้งสามารถดูดหรือปลดแรงดูดได้ตามต้องการ เมื่อต้องมีการยกตัวข้ามสิ่งกีดขวาง หรือโค้งตามข้อต่อของท่อ หุ่นยนต์มีน้ำหนักเบาประมาณ 2.5 kg และมีการติดตั้งกล้องไว้เพื่อรับภาพและวิดีโอสำหรับกระบวนการตรวจสอบท่อด้วยภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายพิเชฐ ไพรอุดม นายปฐม เคียนขัน นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยในการพัฒนาผลงานหุ่นยนต์ในบทความนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Fabien Tache, Wolfgang Fischer, Roland Moser†, Francesco Mondada, Roland Siegwart, Adapted Magnetic Wheel Unit for Compact Robots Inspecting Complex Shaped Pipe Structures

[2] Tin Lun Lam and Yangsheng Xu (2011). A Flexible Tree Climbing Robot: Treebot – Design and Implementation. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation Shanghai International Conference CenterMay9-13, 2011, Shanghai, China