การปรับปรุงและพัฒนาหุ่นยนต์ไต่ผนัง

Development of Wall Climbing Robot

พิศมัย พันธุ์อภัย* และ ธีรภัทร หลิ่มบุญเรือง
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120 ประเทศไทย
โทร 0-2664-1000 ต่อ 2055 โทรสาร 0-3732-2609 อีเมล์ : pissamai@swu.ac.th*

Pissamai Phum-apai* and Teerapath Limboonruang
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Srinakharinwirot University Ongkharak, Nakhornayok 26120 , Thailand
Tel: 02-664100 ext.2055 Fax: 037-322609 Email : pissamai@swu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและสร้างหุ่นยนต์ไต่ผนังต้นแบบที่สามารถเคลื่อนที่บนผนังในแนวดิ่งได้ การเคลื่อนที่และการยึดจับบนผนังของตัวหุ่นยนต์ไต่ผนังถูกควบคุมโดยใช้ระบบอิเล็กโตรนิวแมติกส์ใช้ตัวไมโครคอลโทรลเลอร์ในการควบคุมการทำงานการเคลื่อนที่แบบไร้สายระหว่างผู้ควบคุมและตัวหุ่นยนต์ไต่ผนัง ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับสัญญาณมาจากชุดบังคับทิศทางการเคลื่อนที่แบบไร้สายซึ่งจะใช้มอเตอร์บังคับการเคลื่อนที่ หน้า–หลังและหมุนซ้าย–ขวา ใช้ระบบนิวเมติกส์เพื่อยึดหุ่นยนต์กับผนังเรียบ ส่วนการรับภาพจะใช้กล้องโทรทัศน์วงจรปิดในการรับภาพ

การทดสอบประสิทธิภาพของตัวหุ่นยนต์ไต่ผนังได้มีการดำเนินการทั้งหมด 5 ขั้นตอนคือการทดสอบการเคลื่อนที่บนผนังที่มีความชันต่างๆ การทดสอบระยะเวลาการทำงานและความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่กำแพง ระยะทางสามารถเคลื่อนที่และควบคุมได้(ความไกล)ของหุ่นยนต์ไต่กำแพง การทดสอบการจับยึดของหุ่นยนต์ไต่กำแพงบนพื้นผิวอื่นของหุ่นยนต์ไต่กำแพงและการทดสอบระยะการส่งสัญญาณภาพของหุ่นยนต์ไต่กำแพง

ผลที่ได้จากการทดสอบทำให้รู้ถึงขีดความ สามารถของตัวหุ่นยนต์ไต่ผนังคือสามารถเคลื่อนที่บนผนังที่มีความชันตั้งแต่ 0-180 องศาได้ในพื้นผิวหลายๆชนิด(กระจก ไม้และโลหะ)โดยจะเคลื่อนที่บนผนังที่เป็นกระจกได้ที่ที่สุดและมีความเร็วของการเคลื่อนที่ของตัวหุ่นไต่ผนังเท่ากันทั้ง 4 ทิศทางคือ 12.2 มิลลิเมตรต่อวินาที(เคลื่อนที่ได้ระยะ 7.8เมตร ในเวลา10นาที)

คำสำคัญ : หุ่นยนต์ไต่ผนัง / สุญญากาศ / นิวแมติกส์ / ไมโคร-คอนโทรลเลอร์

ABSTRACT

This paper presents the design and development of climbing robot that is capable of climbing the wall in vertical direction. The motion and the grip mechanism are driven by electro-pneumatic system which is controlled by micro-controller. The wireless control allows the long-distance working between operator and the robot. Micro-controller will revise signal from the wireless control . the compose of robot have motor for movement forward-backward and left-right control , Pneumatics system for robot catch holds the smooth wall and use telescope to revise picture to sent signal to show on monitors

To verify the efficiency of the proposed design, the functional tests of this robot have been performed. The test topic consists of, plane motion in various slopes, motion of different contact surface , speed of motion, climbing displacement per working cycle of the mechanism and alignment of mechanism

The test results shows that the robot is able to move in various angle of plane ranging from 0-180 degree. The vibration of contact surface (glass, wood and steel) has slightly influence on the motion. However, the moving on the glass surface is superior to the others. and the speed of plane motion in four directions(up, down, right, left) are identical with the speed of 12.2 mm/s (7.8 metre in10 minute)

Key-words : Climbing Robot / Vacuum / micro controller / Robot Mechanism

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

W	น้ำหนักของชิ้นงาน	(N)
ΔP_u	ค่าความดันแตกต่างระหว่างความดันสุญญากาศภายในหัวดูดจับยึดชิ้นงาน กับความดันของบรรยากาศ	(kPa)

A_w พื้นที่ขอบด้านในของหัวดูดจับยึดชิ้นงานส่วนที่ความดันสุญญากาศกระทำกับ พื้นผิวของชิ้นงาน (m^2)

P_d ค่าความดันที่กระทำบนพื้นที่ขอบด้านนอกของหัวดูดจับยึดชิ้นงาน (kPa)

A_d พื้นที่ของหัวดูดจับยึดชิ้นงานส่วนที่สัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงาน (m^2)

F แรงที่เกิดจากชิ้นงานที่หัวดูดสุญญากาศจับยึด (N)

F_s แรงจับยึดชิ้นงานของหัวดูดสุญญากาศ (N)

$F_{s\ max}$ แรงจับยึดสูงสุดที่หัวดูดสุญญากาศจะต้องกระทำกับชิ้นงาน (N)

F_v องค์ประกอบของแรง F ในแนวดิ่ง (N)

F_h องค์ประกอบของแรง F ในแนวนอน (N)

F_r แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของหัวดูดสุญญากาศสัมผัสกับชิ้นงาน (N)

F_d แรงที่กระทำบนพื้นที่ขอบด้านนอกของหัวดูดจับยึดชิ้นงาน (N)

F_a แรงเนื่องจากอัตราเร่งในการเคลื่อนที่ชิ้นงานที่จับยึด (N)

μ ค่าความเสียดทานระหว่างพื้นผิวของหัวดูดจับยึดชิ้นงานและพื้นที่ของชิ้นงานที่จับยึด

1. บทนำ

ในโลกเทคโนโลยีปัจจุบันหลายๆ ครั้งที่เราได้ยินเรื่องราวมากมายผ่านทางสื่อต่างๆเกี่ยวกับการพัฒนาหุ่นยนต์เพื่อใช้ทดแทนการทำงานของคนในหน้าที่การงานที่ต่างๆกันหลายๆรูปแบบ แต่ถ้าพิจารณาหรือแยกแยะกันจริงๆ แล้วหุ่นยนต์มีความสำคัญอยู่ในหมวดหมู่หน้าที่การทำงานเฉพาะด้านอย่างใดอย่างหนึ่งไม่ว่าจะเป็นหุ่นยนต์ที่ใช้ทำงานที่ต้องการความละเอียดสูงเกินกว่ามนุษย์จะทำได้ งานที่ต้องทำตลอดเวลาไม่มีพักในโรงงานอุตสาหกรรมหรืองานที่ต้องอยู่ในสภาวะแวด ล้อมที่เสี่ยงอันตราย

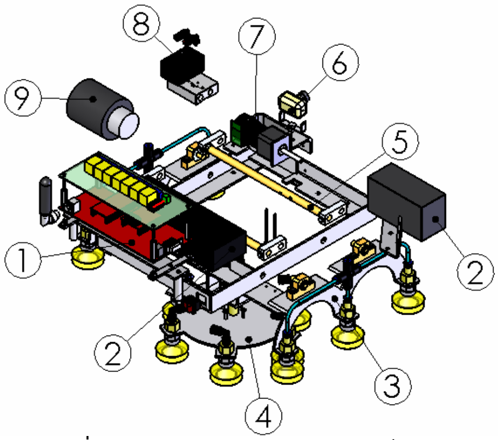
ในปัจจุบันนี้ได้มีอาคารสูงอยู่มากมายในคราวที่ต้องการซ่อมแซมหรือตรวจสอบความปลอดภัยของตัวอาคารนั้นเป็นเรื่องที่อันตราย ไม่ว่าจะเป็นความสูงของตัวอาคาร แรงลมและรวมถึงความประมาทของตัวมนุษย์เองด้วย ซึ่งสิ่งเหล่านั้นจะทำให้เกิดอันตรายถึงชีวิตของผู้ปฏิบัติงานได้ ซึ่งเรื่องเหล่านั้นเป็นเรื่องที่เราไม่อยากให้เกิดขึ้นโดยเด็ดขาด เพราะฉะนั้นมนุษย์เราจึงได้มีการคิดค้นเครื่องอำนวยความสะดวกขึ้นมามากมาย รวมถึงการคิดค้นหุ่นยนต์ที่จะมาทำหน้าที่ตรงนี้แทนมนุษย์ ทำให้การเสี่ยงอันตรายที่ถึงกับชีวิตลดลงไป

หุ่นยนต์ที่กล่าวมาข้างต้นนี้ก็รวมถึงหุ่นยนต์ไต่กำแพง [4, 6, 7] ซึ่งได้เคยสร้างมาก่อนแล้วและก็ได้มีปัญหาหลายๆ ด้าน เช่น ระยะการควบคุมซึ่งสั้นเกินไป ระยะเวลาการใช้งานน้อย เนื่องจากการทำงานของหุ่นยนต์นี้ได้ใช้กระแสไฟมาก ทางคณะผู้วิจัยทำจึงได้พัฒนาหุ่นยนต์ไต่กำแพงให้สามารถควบคุมได้ไกลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ระยะเวลาในการใช้งานได้นานยิ่งขึ้น สามารถส่งสัญญาณภาพได้และเพื่อสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานสำรวจได้จริง วัตถุประสงค์ในการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์ไต่ผนังจะเน้นที่การออกแบบระบบอิเล็กโตรนิวแมติกส์ ให้สอดคล้องกับกลไกการเคลื่อนที่ของตัวหุ่นยนต์ไต่ผนังโดยมีขอบเขต ของการทำงานสูงสุดอยู่ที่การเคลื่อน ที่บนผนังเรียบในแนวดิ่งที่มุมชัน 90 องศา

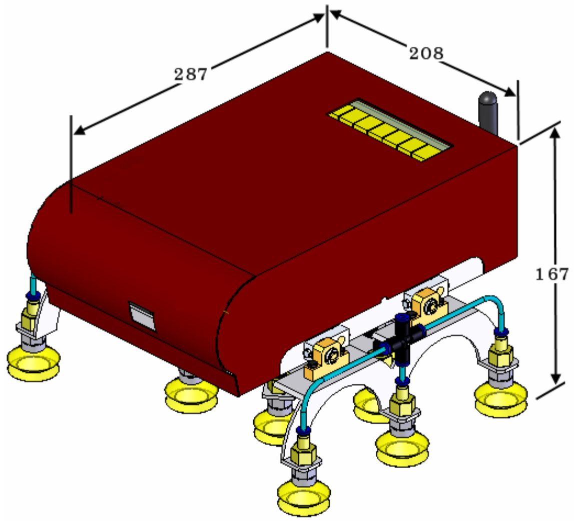
2. การคำนวณและการออกแบบ

การคำนวณหาขนาดของหัวจับสุญญากาศ กระบอกสูบและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กับหุ่นยนต์ไต่ผนังได้นั้นจำเป็นต้องรู้ขนาดและน้ำหนักทั้งหมดของหุ่นยนต์ไต่ผนังเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาขนาดของหัวจับสุญญากาศ [2, 3] กระบอกสูบและอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งบางครั้งอาจจะได้ไม่ตรงกับขนาดมาตรฐานที่มีอยู่ตามแบบมาตรฐาน ดังนั้น จึงต้องเลือกขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน

2.1 มวลของตัวหุ่นยนต์



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของหุ่นยนต์



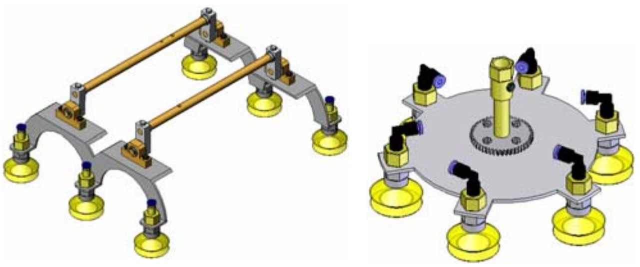
รูปที่ 2 แสดงขนาดโดยรวมของหุ่นยนต์ (หน่วย : mm)

จากรูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบต่างๆซึ่งแยกเป็นน้ำหนักได้ดังนี้

- ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์	0.50	kg
- แบตเตอรี่ 12 V	2.00	kg
- ชุดขาเดินหน้า-หลัง	0.50	kg
- ชุดขาหมุน	0.50	kg
- เพลาเดิน	0.75	kg

- กล้องวงจรปิด	0.25	kg
- มอเตอร์ DC 12V	0.50	kg
- โซลินอยด์วาล์ว 3/2	0.50	kg
- ปั๊มมอเตอร์สุญญากาศ	1.00	kg
น้ำหนักหุ่นยนต์รวม	**6.50**	**kg**

2.2 การออกแบบและการเลือกขนาดของหัวจับสุญญากาศ

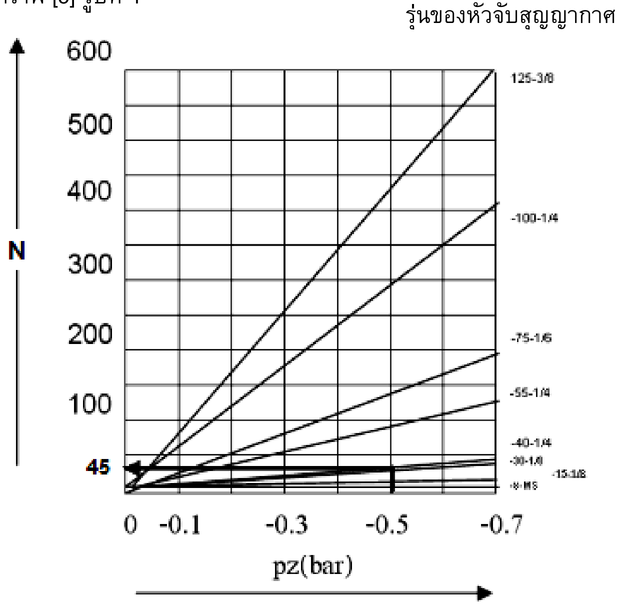


รูปที่ 3 กลไกของขาของหุ่นยนต์ สำหรับเดินหน้าและหมุนตัว

ในการจับแต่ละครั้งที่ขาหุ่นยนต์ไต่ผนังจะใช้ชุดหัวจับสุญญากาศในการจับยึดกับผนังทั้ง หมด 6 ตัว ดังนั้น N=6 ชุดหัวจับสุญญากาศ 6 ตัว ต้องรับน้ำหนัก 6.5 kg × 9.81 m/s^2 = 63.77 N

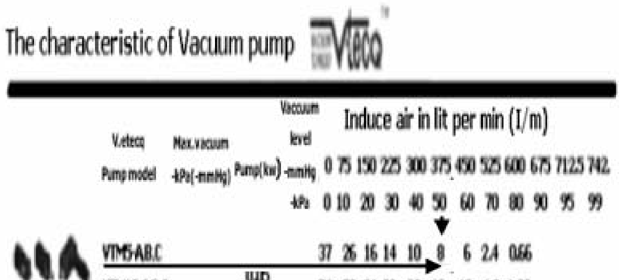
2.3 การเลือกขนาดของหัวจับสุญญากาศ

การหาค่าความดันสุญญากาศที่จะนำมาใช้งานหาได้จากกราฟ [5] รูปที่ 4



รูปที่ 4 Theoretical suction force as a function vacuum

ที่ความดันสุญญากาศ - 0.5 bar เลือกหัวจับสุญญากาศรุ่น VASB-40-1/4-PUR ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวจับสุญญากาศ 40 mm ซึ่งรับแรงต่อหัวได้ 45 N ซึ่งมากกว่าน้ำหนักที่จะต้องรับ คือ 10.6275 N



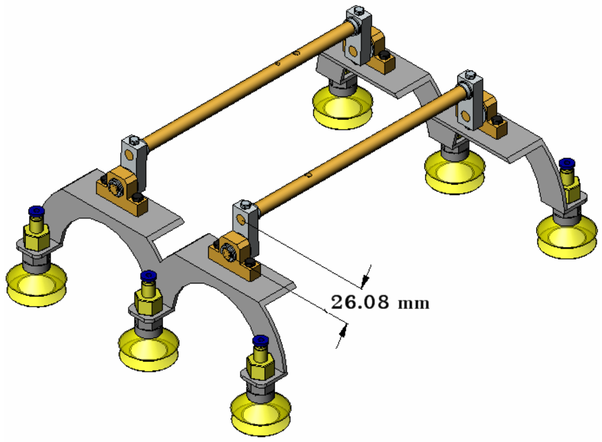
รูปที่ 5 แคตตาล็อกเลือกปั๊มสุญญากาศ

จากการคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองลมทั้งหมดได้เท่ากับ 6.408 liter/min จากแคตตาล็อก เลือกปั๊มสุญญากาศรุ่น VTM5-C ซึ่งสร้างความดันสุญญากาศได้ -0.5 bar และมีอัตราการไหล 8 liter/min

2.4 การออกแบบกลไกการเดินของหุ่นยนต์

หลักการทำงานของกลไกการเดินของหุ่นยนต์ไต่กำแพงแบบเดิมจะใช้กลไกแบบ Crank – Rocker เป็นขาของหุ่นยนต์ลักษณะของกลไกคือ ตัวขับหมุนได้รอบและตัวตามเคลื่อนที่กลับไปกลับมา

ส่วนหลักการทำงานของกลไกการเดินของหุ่นยนต์ไต่กำแพงแบบใหม่จะใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเพลาข้อเหวี่ยง 2 อัน ซึ่งอาศัยการส่งถ่ายแรงบิดโดยเพลา เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนเฟืองขับ เฟืองขับจะขับเฟืองตาม เฟืองตามจะขับเพลาข้อเหวี่ยงที่ติดกับเฟืองตาม แล้วจะส่งถ่ายแรงบิดผ่านตัวต่อเพลาของเพลาข้อเหวี่ยงอีกอันหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เพลาข้อเหวี่ยงอันนี้หมุนตามทำให้เกิดแรงยกที่สามารถยกตัวหุ่นให้เคลื่อนที่ได้ โดยระยะการเดินแต่ละก้าวของหุ่นยนต์คือ 52.16 mm



รูปที่ 6 แสดงระยะการเดินของหุ่นยนต์

2.5 การคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ในการเดินของหุ่นยนต์[1]

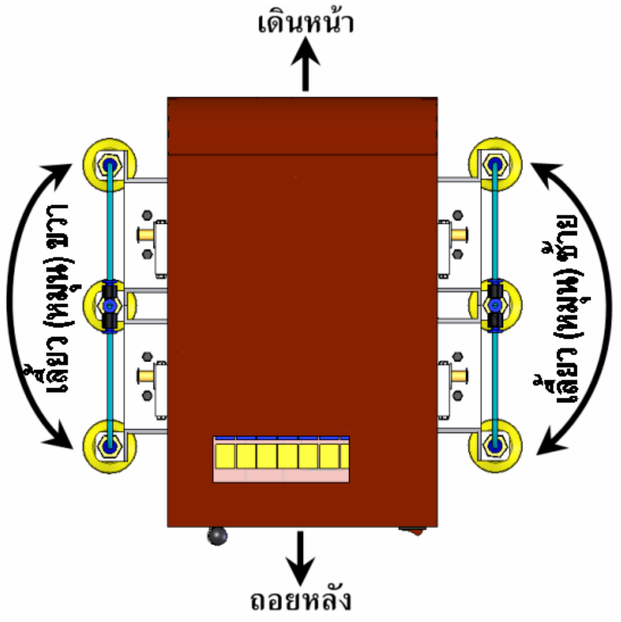
น้ำหนักของหุ่นยนต์	=	6.5 kg = 63.765	N
ความยาวของ Crank	=	2.4	cm
จากสมการแรงบิด	=	F × r	
ได้แรงบิดที่ Crank	=	16	kg-cm
หาแรงบิดที่มอเตอร์ N2/ N1	=	T2 / T1	

ได้แรงบิดที่มอเตอร์ = 8.83 kg-cm

ดังนั้นในการเลือกมอเตอร์ที่ใช้ในการเดินของหุ่นยนต์จะต้องใช้มอเตอร์ที่แรงบิดอย่างน้อย 8.82 kg-cm

3. ลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์ไต่กำแพง

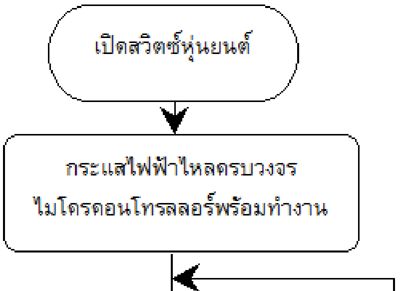
การทำงานของหุ่นยนต์ไต่กำแพงตัวนี้คือ เริ่มจากการโหลดโปรแกรมควบคุมการทำงาน ที่เขียนไว้จากคอมพิวเตอร์ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ใน การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยไมโครคอน โทรลเลอร์จะรับสัญญาณมาจากชุดบังคับทิศทางการเคลื่อนที่แบบไร้สาย ซึ่งหุ่นยนต์ตัวนี้จะใช้มอเตอร์เอ็นโครตเดอร์ในการบังคับการเคลื่อนที่หน้า – หลัง และใช้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการบังคับหมุนซ้าย – ขวา และใช้ระบบนิวเมติกส์เพื่อยึดหุ่นยนต์กับผนังเรียบ ส่วนการรับภาพจะใช้ กล้องโทรทัศน์วงจรปิดในการ รับภาพโดยนำสัญญาณที่รับได้ ไปแสดงที่หน้าจอโทรทัศน์



รูปที่ 7 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

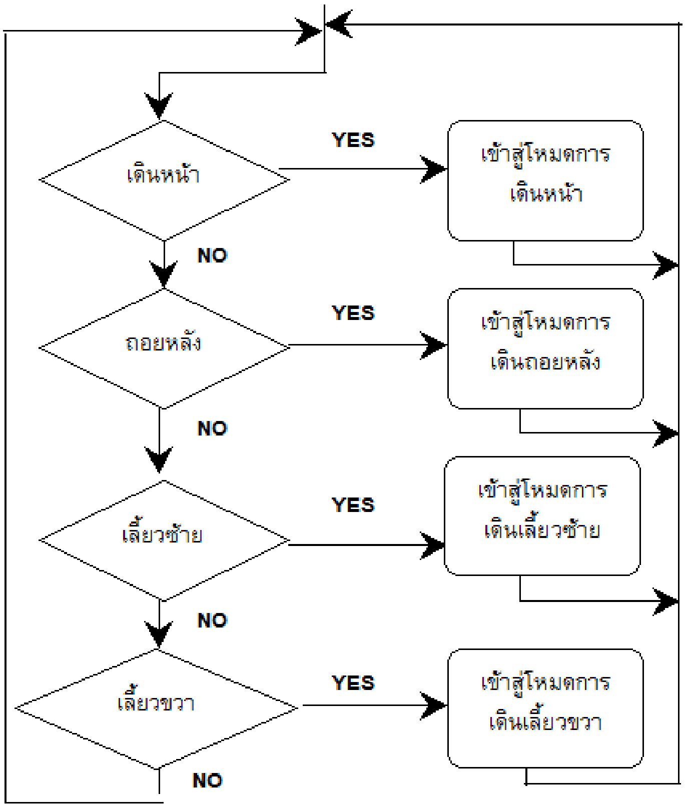
4. โฟล์ชาร์ต(Flow Chart) การทำงานของตัวหุ่นยนต์ไต่ผนัง

การทำงานของตัวหุ่นยนต์ไต่ผนังจะมีขั้นตอนของโฟล์ชาร์ตซึ่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 8



NO

NO



รูปที่ 8 แสดงโฟรล์ชาร์ตการทำงานของหุ่นไต่ผนัง

5. การทดสอบหุ่นยนต์ไต่กำแพง

โครงงานนี้เป็นการออกแบบหุ่นยนต์ไต่กำแพงให้เคลื่อนที่บนผนังเรียบในองศาต่าง ๆ ที่กำหนดและเปรียบเทียบค่าระยะทางในการเคลื่อนที่ซึ่งจะกำ หนดไว้คงที่ตลอดเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ บนพื้นผิวต่างๆ ได้แก่ แผ่นเหล็กเรียบ ไม้แผ่นเรียบ และกระจก โดยทำการแบ่งการทดสอบออกเป็น 5 หัวข้อหลักด้วยกันคือ

1.การทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่กำแพง

2.การทดสอบระยะเวลาการทำงานและความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่กำแพง

3.การทดสอบระยะทางสามารถเคลื่อนที่และควบคุมได้ (ความไกล) ของหุ่นยนต์ไต่กำแพง

4.การทดสอบการจับยึดของ หุ่นยนต์ไต่กำแพงบนพื้นผิวอื่น

5.การทดสอบระยะการส่งสัญญาณภาพของหุ่นยนต์ไต่กำแพง

โดยที่การทดสอบหุ่นยนต์ไต่กำแพงแต่ละครั้งที่เคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ และตรวจสอบดูสภาพการทำงานว่าพร้อมที่จะทำงานต่อไปได้หรือไม่

รูปที่ 9 แสดงภาพโดยรวมของหุ่นยนต์ไต่ผนัง

รูปที่ 10 แสดงการทดสอบการเคลื่อนที่บนผนังที่ความชันต่างๆ

6. ผลการทดสอบ

6.1 การทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่กำแพง ณ ความชันต่าง ๆ (โดยใช้หุ่นยนต์เดินตัวเปล่า)

จากการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่กำแพง ณ ความชันต่างๆ ตัวหุ่นยนต์ไต่กำแพงสามารถเคลื่อนที่บนผนังที่มีความชันได้ตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศา ทั้งแต่พื้นผิวเหล็ก พื้นผิวไม้เรียบ และพื้นผิวกระจกใส

6.2 การทดสอบระยะเวลาการทำงานและความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่กำแพง (โดยใช้หุ่นยนต์เดินตัวเปล่า)

จากการทดสอบระยะเวลาการทำงานและความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ หุ่นยนต์ไต่กำแพงสามารถทำงานได้เป็นเวลาเฉลี่ยที่ 592 วินาที (10 นาที) ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ 7.2 เมตร ความเร็วเฉลี่ย 0.0122 เมตร/วินาที

6.3 การทดสอบระยะทางที่สามารถเคลื่อนที่และควบคุมได้ของหุ่นยนต์ไต่กำแพง(โดยใช้หุ่นยนต์เดินตัวเปล่า)

จากการทดสอบระยะทางเฉลี่ยที่สามารถเคลื่อนที่และควบคุมได้ (ความไกล) ของหุ่นยนต์ไต่กำแพง คือ 53.7 เมตร

6.4 การทดสอบการจับยึดของหุ่นยนต์ไต่กำแพงบนพื้นผิวอื่นของหุ่นยนต์ไต่กำแพง(โดยใช้หุ่นยนต์เดินตัวเปล่า)

จากการทดสอบการจับยึดของหุ่นยนต์ไต่กำแพงบนพื้นผิวอื่นของหุ่นยนต์ไต่กำแพงสามารถเคลื่อนที่บนบนพื้นผิวอื่นได้ คือ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นสังกะสี แผ่นสแตนเลส และ ผนังปูนเรียบได้

6.5 การทดสอบระยะการส่งสัญญาณภาพของหุ่นยนต์ไต่กำแพง

จากการทดสอบระยะการส่งสัญญาณภาพของหุ่นยนต์ไต่กำแพง คือ 68.9 เมตร โดยไม่มีสิ่งกีดขวางกั้นสัญญาณรับ – ส่งภาพ

7. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการออกแบบพัฒนา และสร้างหุ่นยนต์ไต่ผนังต้นแบบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวดิ่งโดยให้มีการทำงานสูงสุดอยู่ที่การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่มีมุมชัน 90 องศา (ผนังตั้งฉากกับพื้น) การเคลื่อนที่และการจับยึดบนผนังของหุ่นยนต์ไต่กำแพงใช้ระบบอิเล็ก-โตรนิวเมติกส์ มีชุดการควบคุมการเคลื่อนที่แบบไร้สายซึ่งใช้ไมโคร-คอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการควบคุมการทำงานทั้งหมดของตัวหุ่นยนต์ไต่ผนัง โดยใช้ภาษาซีในการเขียนโปรแกรมให้กับไมโคร-คอนโทรเลอร์

หุ่นยนต์ไต่กำแพง (หุ่นยนต์ตัวเปล่ามีน้ำหนัก 6.5 kg) สามารถทำงานได้บนพื้นผิว 3 ชนิด คือ แผ่นเหล็ก แผ่นไม้เรียบ และกระจกใส ที่ระดับ 0 องศา ถึง 90 องศา ทำงานติดต่อกันได้เป็นเวลาเฉลี่ยที่ 592 วินาที (10 นาที) ความเร็วในการเคลื่อนที่เฉลี่ย 0.0122 เมตร/วินาที ระยะการส่งสัญญาณคือ 53.7 เมตร และสามารถไต่บนพื้นผิวเรียบอื่นได้คือ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นสังกะสี แผ่นสแตนเลสและผนังปูนฉาบเรียบ

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณชัยพัทธ์ ผินจิรพงศ์ คุณปรีชา เพ่งผล และคุณสมภพ มหาอุพาร ที่เอื้อเฟื้อในการเก็บข้อมูลการทดสอบหุ่นยนต์ไต่กำแพง

9. เอกสารอ้างอิง

[1] ชวพงษ์ สิงหแพทย์. 2538. **การควบคุมอัตโนมัติ.** ฟิสิกส์เซนเตอร์ การพิมพ์, กรุงเทพฯ.รศ.

[2] วุฒิชัย กลปิลกาญจน์. 2536. **กลไกและพลศาสตร์ของเครื่องจักรกล.** สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซนเตอร์, กรุงเทพฯ.

[3] พรจิต ปทุมสุวรรณ. 2535. **การควบคุมนิวเมติกส์.** เรือนแก้วการพิมพ์ , กรุงเทพฯ.

[4] ฐิฑารีย์ ถมยา. 2546. **นิวเมติกส์และนิวเมติกส์ไฟฟ้าเบื้องต้น.** สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., กรุงเทพฯ.

[5] Darpa, D. 2002. **Positional Control of Pneumatic Manipulators for Construction Tasks**. Automation in Construction. 11: 655-665.

[6] Festo, D. 1998. **The Pneumatic Catalog**. Festo AG & Co, Germany.

[7] Kang, T. and Kim, H. 2003. **A Pneumotronic Equipment for Acoustic Measurements. Mechatronics**. 11: 183-197.

[8] Kimura, T. and Kagawa, T. 1997. **Feedback Linearization for Pneumatic Actuator Systems with Static Friction**. Printed in Great Britain: 1385-1387.