

วิทยา พันธุ์เจริญศิลป์

ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

รองศาสตราจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พญาไท กรุงเทพฯ 10330

หุ่นยนต์เดินด้วยกลไกสี่ลิงค์

A Four Bar Linkage Walking Robot

งานวิจัยนี้เป็นส่วนของการพัฒนาหุ่นยนต์เดินด้วยกลไกสี่ลิงค์โดยมีสมมาตรของการโน้มตัวไปด้านหน้าและด้านหลัง ภายใต้การศึกษารูปแบบการเดินบนพื้นราบที่การเดินของขาสัมผัสกับพื้นตลอดและการเดินอาศัยความเสียดทานระหว่างขากับพื้นซึ่งเสมือนกับการลื่นหรือไถล โดยการเดินหรือการเคลื่อนไหวกวถูกควบคุมโดยตัวควบคุมแบบพีไอ (PI) ที่คาบการสุ่มเท่ากับ 18 ms โดยใช้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ 486/DX-100 คำสั่งของตำแหน่งอ้างอิงหาได้จากโปรไฟล์ของความเร่ง-ความเร็ว-ความหน่วง คงที่ ความเร็วและความเร่งหรือความหน่วงในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สามารถแปรเปลี่ยนได้ จากผลการทดลองพบว่าค่าความเร็วที่เหมาะสมสำหรับตัวหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นนี้มีค่าเท่ากับ 4 rad/sec และค่าความเร่งอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 rad/s² ค่าของความเร็วและความเร่งของการเดินที่ถูกจำกัดนี้ก็เนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของความเฉื่อย จากภาระที่เกิดจากโครงสร้างที่ไม่ได้จำลองรูปทางคณิตศาสตร์ไว้จากความเสียดทานที่ข้อต่อซึ่งมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนและความเร็วในการตอบสนองของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนข้างขา

This paper illustrates the control of a four bar linkage walking robot with symmetrical backward and forward lean. The experiment is setup for investigating of the walking characteristic of the robot on the flat ground. The walking characteristic is that the legs are always in contact with the ground and the walking is achieved by the help of the friction between the robot feet and the ground. The walking is like rubbing on slipping. The robot walking motion is controlled by a PI controller. The controller is implemented on 486/DX-100 with 18 ms sampling period. The constant acceleration-velocity-deceleration profile is used as the reference position command. The velocity and acceleration or deceleration of the motion at the robot shoulder can be varied. The results shown that the suitable velocity is 4 rad/sec with the acceleration ranges from 1 to 3 rad/s². This limitation is due to the nonmodel of the of the nonlinear inertia of the robot structure, the joint friction and the show time response characteristic of the motors.

1) บทนำ

ในปัจจุบันนี้สภาวะการแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมมีค่อนข้างสูง ดังนั้นคุณภาพของผลผลิตเริ่มเข้ามามีความสำคัญเป็นอย่างมากอีกทั้งต้นทุนในการผลิตล้วนเป็นปัจจัยสำคัญทั้งสิ้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้ก็ล้วนจำเป็นที่จะต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีความแม่นยำสูงแทนทรัพยากรมนุษย์ ซึ่งนับวันอัตราค่าจ้างจะสูงขึ้นเรื่อยๆ และความเที่ยงตรงแม่นยำแปรเปลี่ยนได้ตลอด อีกทั้งความสม่ำเสมอในอัตราการผลิตก็ไม่มีแน่นอนเหมือนเครื่องจักร และงานในบางจุดค่อนข้างที่จะอันตรายต่อชีวิต ดังนั้นการศึกษารูปแบบการควบคุมอัตโนมัติมาใช้กับเครื่องจักรประกอบกับหลักการทางทฤษฎีควบคุมอัตโนมัติจึงนับว่าเป็นสิ่งที่จำเป็น ในการที่จะก้าวไปสู่การเป็นประเทศอุตสาหกรรม โดยการควบคุมนั้นอาศัยการสั่งงานด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งมีอัตราเร็วในการตอบสนองที่รวดเร็วอีกทั้งความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงลักษณะการทำงานก็สามารถทำได้โดยง่ายคือเปลี่ยนแปลงโดยการแก้ไขซอฟต์แวร์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างและการควบคุมหุ่นยนต์เดินได้โดยอาศัยกลไกมาตรฐานแบบ four bar โดยอาศัยหลักการควบคุมตำแหน่งภายใต้การควบคุมแบบ พี.ไอ. มาควบคุมการเดินของหุ่นยนต์ การควบคุม

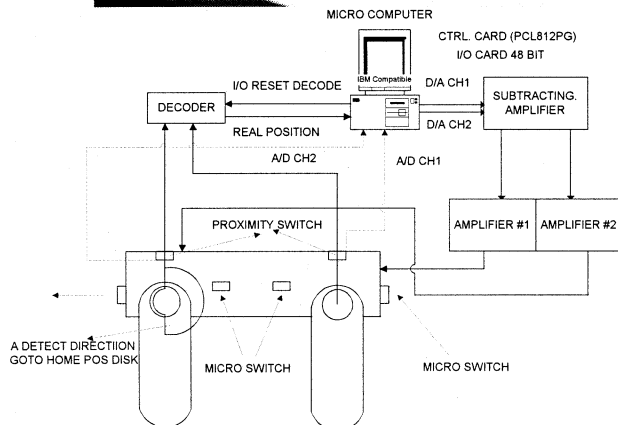
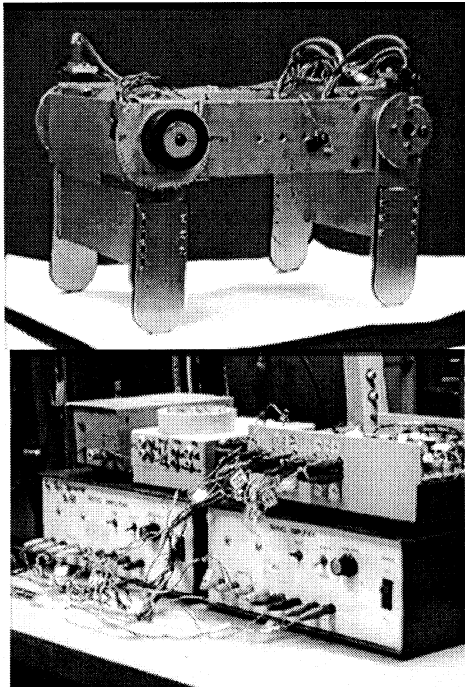
ในลักษณะดังกล่าวนี้มีใช้อย่างกว้างขวางในงานควบคุมทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งการควบคุมดังกล่าวนี้ความแม่นยำขึ้นอยู่กับปัจจัยของโหลดที่มารบกวน (Disturbance load) สำหรับกรณีนี้ก็คือความเสียดทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ดังนั้นการควบคุมให้เป็นไปตามค่าเป้าหมายให้ได้ก็กระทำได้ในระดับหนึ่ง

งานวิจัยนี้จะเน้นทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติโดยสร้างตัวหุ่นยนต์แบบเดินด้วยกลไก four bar พร้อมระบบควบคุมขึ้นโดยใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาได้หรือสร้างได้ในห้องปฏิบัติการเป็นหลัก เพื่อทดสอบการใช้ระบบหรือวิธีการควบคุมมาตรฐาน PI (Proportional+Integral) พร้อมทั้งศึกษาเพื่อให้ได้ผลในการควบคุมตำแหน่งการก้าวให้แม่นยำในระดับหนึ่ง โดยการวัดผลของการตอบสนองต่อคำสั่งที่สั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยติดชุดเอ็นโคเดอร์ที่ขาหน้าและขาหลัง ซึ่งให้สัญญาณเป็นพัลส์ออกมาจากนั้นนำสัญญาณที่ได้ผ่านชุดวงจรดีโคเดอร์ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อแปลงสัญญาณอนาล็อก ให้อยู่ในรูปของดิจิตอลผ่านดิจิตอลอินพุตและเอาท์พุตคาร์ด เพื่อที่คอมพิวเตอร์จะสามารถนำค่าดังกล่าวไปทำการประมวลผล และส่งคำสั่งควบคุมออกมาโดยผ่านคาร์ดแปลงดิจิตอลเป็น

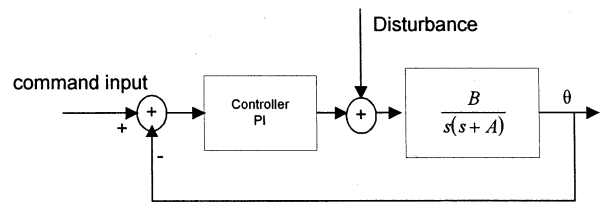
นอานาลอก(D/A CARD) โดยสัญญาณคำสั่งที่ส่งออกมาดังกล่าวจะต้องผ่านลิเนียร์แอมพลิฟายในการขยายสัญญาณเพื่อการขับเคลื่อนระบบ

2) อุปกรณ์ในหุ่นยนต์เดินด้วยกลไกสี่ลิงค์

รูปที่ 2.1 เป็นรูปแสดงหุ่นยนต์เดินแบบกลไกสี่ลิงค์ โดยมีขา 2 ขาแต่ละขาขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง และที่หัวไหล่ของขาหุ่นยนต์จะติดตั้ง Encoder ซึ่งใช้วัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของขาแต่ละขาพร้อมทั้งสร้างชุด Decoder ที่ใช้สำหรับแปลงสัญญาณที่ได้ออกมาจากตัว Encoder ได้ทั้งในลักษณะเดินหน้าและถอยหลัง ตัวควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์จะประกอบด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ติดตั้งอุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณ Digital/Analog Convertor ซึ่งจะเปลี่ยนสัญญาณตัวเลขหรือ Digital signal ที่คำนวณได้จากตัวควบคุม PI ให้เป็นสัญญาณอนาลอกสำหรับส่งต่อไปยังชุดขยายสัญญาณที่ขับมอเตอร์อีกทีหนึ่ง และในคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมนั้นก็จะติดตั้งแผงวงจร Digital I/O สำหรับรับสัญญาณดิจิทัลที่มีลักษณะเป็นแบบเปิด/ปิด และมีตัวตรวจรู้สัญญาณแบบ Proximity sensor เพื่อให้กำหนดตำแหน่ง Home position ของหุ่นยนต์เดินได้ตัวนี้ รูปที่ 2.2 เป็นรูปแผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุมที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แต่ละตัว



รูปที่ 2.1 รูปแผนภาพแสดงหุ่นยนต์เดินด้วยกลไก four bar พร้อมอุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์ตรวจรู้



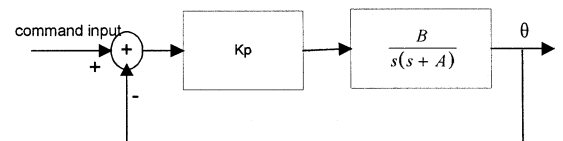
รูปที่ 2.2 รูปแผนภาพแสดงระบบการควบคุมมอเตอร์ของขาหุ่นยนต์

3) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบค่าเกนควบคุม

3.1 การวัดและทดสอบหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของดีซีมอเตอร์และภาระ

เราสมมุติฐานว่า Inertia ของตัวหุ่นยนต์ที่มาปรากฏกับมอเตอร์นั้นเป็น Lump mass และมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง และใช้วิธีการทดสอบจากระบบจริงเพื่อหา dynamic model ถึงแม้ว่ารูปโครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงแต่ส่วนที่เปลี่ยนแปลงนั้นมีค่าไม่มาก ประกอบกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นก็ไม่สูงมาก ซึ่งระบบควบคุมแบบ PI ที่เราใช้สามารถ compensate ค่า error ของ dynamic ในส่วนนี้ได้ในระดับหนึ่ง และขณะเดียวกันมอเตอร์ที่เราใช้ก็เป็นมอเตอร์ราคาดถูกเป็นของเก่าที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ ดังนั้นเราจึงทำการทดสอบเพื่อหา Dynamic model รวมของทั้งมอเตอร์และ Load (lump mass) (แฝงอยู่ในค่า A และ B ของแบบจำลองมาตรฐานเพื่อนำมาทดสอบหาค่า A และ B) ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.1

แนวทางในการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบต้องอาศัยการทดลองระบบภายใต้สมมติฐานของระบบควบคุมดีซีมอเตอร์ที่มีภาระเป็น Lump mass โดยทั่วไปเป็นสมการกำลังสองซึ่งเขียนเป็นรูปแบบทั่วไปของระบบได้ดังรูปที่ 2.2 การทดลองหาค่าพารามิเตอร์รวมของมอเตอร์สามารถแสดงได้ในรูปแผนภาพ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงระบบที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์รวมของมอเตอร์

จากรูปที่ 4.1 เราสามารถหาสมการทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบรวมได้ดังนี้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{KpB}{s(s+A)+KpB} \quad (3.1)$$

จากรูปที่ 3.1 เราสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนได้เป็น

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{BKp}{s^2 + As + BKp} \quad (3.2)$$

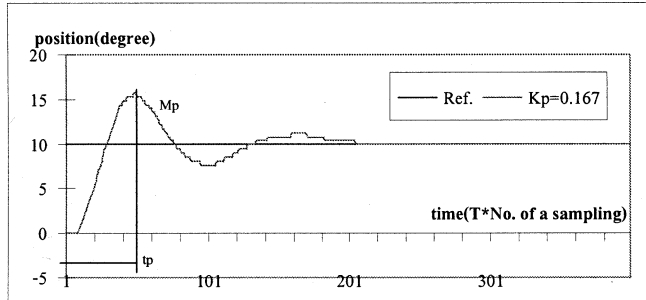
โดยมีรูปแบบสมการทั่วไปในการตอบสนองที่ภายใต้อินพุตหนึ่งหน่วยขั้นบันไดคือ

$$C(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left(\cos \omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_d t \right)$$

เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นแบบฟังก์ชันขั้นขนาด 10 องศา ที่ค่าเกน $K_p=0.167$ จะได้ผลการตอบสนองคือ

$$C(t) = 10(1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left(\cos \omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_d t \right)) \quad (3.3)$$

และได้ผลของการตอบสนองเป็นไปตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงผลตอบสนองของระบบจริงภายใต้อินพุตแบบขั้นบันได

จากผลการตอบสนองที่ได้อ่านค่าของโอเวอร์ชูทสูงสุดได้ $M_p = 5.5385$ องศา และช่วงเวลาพิค $t_p = 0.93$ sec และพบว่าที่เวลา $t = 0.54$ sec ระบบให้การตอบสนองเท่ากับ 10 องศา เป็นครั้งแรก เมื่อเทียบค่าผลการทดลองกับสมการในการตอบสนองของระบบพบว่าที่ $C(0.54)=10$ องศา หาค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบ จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

หาเวลาที่จุดพิคจากการหาอนุพันธ์ของ $C(t)$ โดยเทียบกับเวลาได้ และให้ผลลัพธ์ของอนุพันธ์นี้มีค่าเป็นศูนย์ ได้ความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\left. \frac{dC}{dt} \right|_{t=t_p} = (\sin \omega_d t_p) \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t_p} = 0$$

จากสมการจะได้ว่าสมการเป็นจริงเมื่อ $\sin \omega_d t_p = 0$

หรือ $\sin \omega_d t_p = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$

โดยเวลาพิคคือที่ตำแหน่งโอเวอร์ชูทสูงสุดในครั้งแรกนั้นคือที่

$$\sin \omega_d t_p = \pi \text{ ดังนั้น}$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (3.4)$$

จากผลการอ่านค่าเวลาที่จุดพิคพบว่า ความถี่แอมป์คือ

$$\omega_d = \frac{\pi}{t_p} = \frac{\pi}{0.93} = 3.378 \text{ rad/s}$$

หาค่าอัตราส่วนแดมป์ปิงจาก ความสัมพันธ์ของโอเวอร์ชูทสูงสุด

$$M_p = 10(C(t_p) - 1) \quad (3.5)$$

$$= 10 * e^{-(\zeta/\sqrt{1-\zeta^2})\pi}$$

จากการอ่านค่าผลการตอบสนองพบว่าโอเวอร์ชูทสูงสุดของระบบคือ

$$M_p = 5.538 \text{ แทนค่าดังกล่าวแล้วแก้สมการข้างต้นได้ค่าอัตราส่วน}$$

แดมป์ปิงของระบบคือ

$$\zeta = 0.185$$

จากนี้หาค่าอัตราส่วนแดมป์ปิงและค่าความถี่แอมป์ไปหาความถี่ธรรมชาติของระบบจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \quad (3.6)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{3.378}{\sqrt{1-0.185^2}} = 3.437 \text{ rad/s}$$

หาค่าตัวแปรของระบบควบคุมโดยการเทียบค่าสัมประสิทธิ์กับรูปแบบทั่วไปของสมการคุณลักษณะ

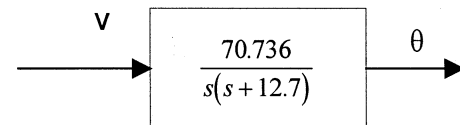
$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + Bs + AK_p$$

$$s^2 + 2(0.185) * 3.437s + 3.437^2 = s^2 + Bs + AK_p$$

จากสมการเมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ก็จะได้ว่า

$$B = \frac{\omega_n^2}{K_p} = 70.736 \text{ และ } A=1.27$$

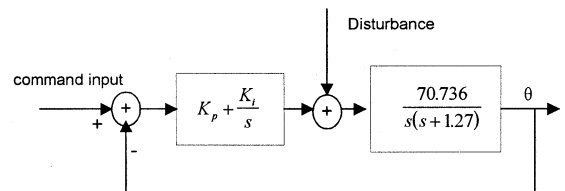
ดังนั้นระบบมีสมการทางคณิตศาสตร์ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพของสมการแบบจำลองของมอเตอร์ที่หาได้จากการทดลอง

พิจารณาระบบที่ภายใต้การควบคุมแบบ พี.ไอ.

เนื่องจากการควบคุมแบบไอ.นี้จะช่วยให้ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวเป็นศูนย์ ดังนั้นการควบคุมภายใต้ พี.ไอ. จะช่วยให้ผลของการควบคุมดีขึ้น ซึ่งแผนภาพของระบบควบคุมดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพของระบบจริงภายใต้แรงเสียดทานขากับพื้น

การควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลนั้นจะทำให้ระบบควบคุมของเราเป็นอันดับเป็นสาม ดังแสดงในสมการของฟังก์ชันถ่ายโอน

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{70.736(Kps + Ki)}{s(s^2 + 1.27s + 70.736(Kps + Ki))}$$

พิจารณาเสถียรภาพของระบบโดยอาศัยเกณฑ์ของเรา (Routh's criteria) มาใช้ตรวจสอบความเสถียรภาพของระบบจะพบว่าค่าเกนที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพภายใต้พี.ไอ. ควบคุมเป็นไปตามสมการคือ

$$1.27K_p - K_i > 0 \quad (3.7)$$

ดังนั้นในการพิจารณาเกน เราเลือกพิจารณาค่าเกนตามความสัมพันธ์และเป็นค่าเกนที่ทำให้ ค่าเวลาคงที่ภายใต้พี.ไอ. ควบคุมมีค่ามากกว่าเวลาคงที่ของมอเตอร์คือ $\tau = 0.787$ วินาที และไม่มากจนเกินไป เพราะจะส่งผลให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรากทางเดินของระบบ เราสามารถที่จะพิจารณาค่าเกนของ พี. และ ไอ. ที่ทำ

ให้ระบบเป็นไปตามข้อกำหนดจากรูปแบบของ พี.ไอ. คอนโทรลเลอร์ เขียนได้ดังสมการ

$$G_c(s) = \frac{K_p(s + \frac{K_i}{K_p})}{s} \quad (3.8)$$

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบพบว่า $\frac{K_i}{K_p} < 1.27$ ระบบจึง

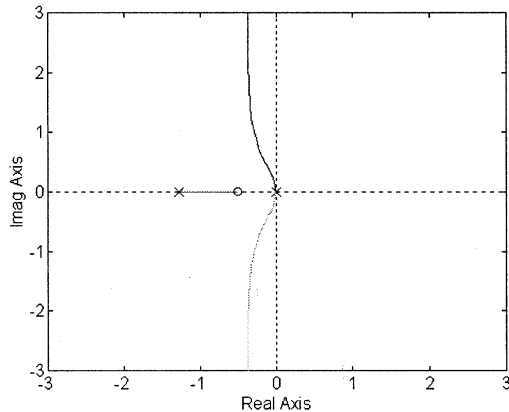
จะเสถียรและจากรากทางเดินของระบบพบว่าค่าของเกน พี. และ ไอ. ซึ่งเป็นอัตราส่วนกัน เพื่อให้ได้ค่าเวลาคงที่ตามที่กำหนด อัตราส่วนดังกล่าว ต้องอยู่ในช่วง

$$0 < \frac{K_i}{K_p} < 1.27$$

ซึ่งค่าเกนที่เราเลือกใช้ในการควบคุมคือที่ $K_p = 0.20$ และ

$$\frac{K_i}{K_p} = 0.50 \text{ นั่นคือที่ } K_i = 0.10 \text{ พิจารณารากทางเดินของระบบที่ภายใต้ค่าเกนดังกล่าวได้ดังรูป 3.5 โดยมีจุดตัดของเส้นกำกับกับแกนจริงของ}$$

ระนาบ s อยู่ที่ -0.385 นั่นคือระบบมีค่าเวลาคงที่ $\tau = 2.597$ วินาที



รูปที่ 3.5 รากทางเดินระบบที่พี.ไอ. ควบคุมที่ เกนพี. $K_p = 0.20$ และ เกนไอ. $K_i = 0.1$

และเมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดที่อินพุตต่างๆ ของการควบคุมแบบพี.ไอ. ที่อินพุตแบบขั้นบันได, ความเร็วคงที่และที่ความเร่งคงที่ตามลำดับดังนี้

ค่าความผิดพลาดคงตัวของระบบควบคุมแบบ พี.ไอ.ภายใต้อินพุตแบบขั้นบันได

เมื่อพิจารณาที่อินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย

$$E(s) = R(s) \left(1 - \frac{C(s)}{R(s)} \right) = \frac{1}{s} \left(\frac{s^2(s+1.27)}{s^3 + 1.27s^2 + 70.736K_p s + 70.736K_i} \right)$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s} \left(\frac{s^2(s+1.27)}{s^3 + 1.27s^2 + 70.736K_p s + 70.736K_i} \right)$$

$$= 0$$

ค่าความผิดพลาดที่พี.ไอ. ควบคุมภายใต้อินพุตที่ความเร็วคงที่
เมื่ออินพุตเป็นแบบความเร็วคงที่หรือแรมพ์อินพุตซึ่งมีรูปแบบทาง

คณิตศาสตร์ในโดเมนของ s คือ $\frac{\omega}{s^2}$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\omega}{s^2} \left(\frac{s^2(s+1.27)}{s^3 + 1.27s^2 + 70.736K_p s + 70.736K_i} \right)$$

$$= 0$$

ค่าความผิดพลาดคงตัวของระบบควบคุมแบบ พี.ไอ.ภายใต้อินพุตที่ความเร็วคงที่

เมื่ออินพุตเป็นแบบความเร็วคงที่ซึ่งมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ในโดเมน

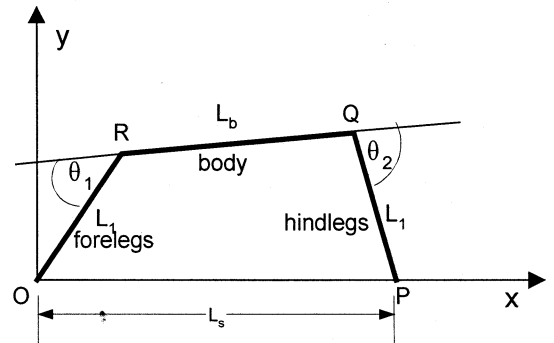
ของ s คือ $\frac{\alpha}{s^3}$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{2\alpha}{s^3} \left(\frac{s^2(s+1.27)}{s^3 + 1.27s^2 + 70.736K_p s + 70.736K_i} \right)$$

$$= \frac{2.54\alpha}{70.736K_i}$$

จากการพิจารณาค่าความผิดพลาดดังกล่าวเราสามารถใช้ในการควบคุมแบบ พี.ไอ. ในการควบคุมสำหรับระบบนี้ซึ่งเวลาคงที่ทางกลมีค่ามากเนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้เป็นเพียงดีซีมอเตอร์และความสามารถในการก้าวเดินยังขึ้นกับความเสียดทานระหว่างขา กับพื้น ดังนั้นในระบบจริง เราไม่ต้องการความเร่งที่สูงมากนัก ซึ่งด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เราใช้การควบคุมแบบพี.ไอ. ควบคุมก็ให้ผลการควบคุมที่ดีพอแล้ว

4) สมการทางคณิตศาสตร์และระบบพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์



รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองด้วยลิ้งค์ของหุ่นยนต์เดินด้วยกลไกสี่ลิ้งค์

จากกฎของCosine เมื่อพิจารณาสามเหลี่ยม ΔORQ

$$\overline{OQ}^2 = \overline{OR}^2 + \overline{RQ}^2 - 2(\overline{OR})(\overline{OQ})\cos(180 - \theta_1) \quad (4.1)$$

$$\overline{OQ} = \sqrt{L_1^2 + L_b^2 + 2L_1L_b\cos\theta_1}$$

จากกฎของCosine เมื่อพิจารณาสามเหลี่ยม ΔRQO

$$L_L^2 = \overline{OQ}^2 + L_b^2 - 2\overline{OQ}L_b\cos\angle RQO \quad (4.2)$$

$$\angle RQO = \cos^{-1} \left[\frac{(L_b^2 + \overline{OQ}^2 - L_L^2)}{2L_b\overline{OQ}} \right]$$

หามุม $\angle OQP$ โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของ ΔOQP กับ ΔRQO

จาก ΔRQP

$$\angle OQP = \pi - \angle RQO - \theta_2$$

$$L_s = \sqrt{L_L^2 + \overline{OQ}^2 - 2L_L\overline{OQ}\cos\angle OQP} \quad (4.3)$$

หามุม $\angle OPQ$ โดยพิจารณาสามเหลี่ยม ΔOPQ จากกฎของ Cosine

$$\overline{OQ}^2 = L_L^2 + L_S^2 - 2L_L L_S \cos \angle OPQ$$

$$\angle OPQ = \cos^{-1} \left[\frac{(L_L^2 + L_S^2 - \overline{OQ}^2)}{2L_L L_S} \right] \quad (4.4)$$

หามุม $\angle ROP$ โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของผลรวมมุมภายในสี่เหลี่ยมเท่ากับ 360 องศา

$$\begin{aligned} \angle ROP &= 360 - (180 - \theta_1) - (180 - \theta_2) - \angle OPQ \\ \angle ROP &= \theta_1 + \theta_2 - \angle OPQ \end{aligned} \quad (4.5)$$

พิกัดของมุมของสี่เหลี่ยมคางหมู OPQR แสดงดังรูปที่ 4.1 คือ

$$(X_o, Y_o) = (0, 0) \quad (4.6)$$

$$(X_p, Y_p) = (L_s, 0) \quad (4.7)$$

$$(X_q, Y_q) = (L_s - L_l \cos \angle OPQ, L_l \sin \angle OPQ) \quad (4.8)$$

$$(X_r, Y_r) = (L_l \cos \angle ROP, L_l \sin \angle ROP) \quad (4.9)$$

พิกัดศูนย์กลางความโน้มถ่วง (X_g, Y_g) กำหนดได้โดยสมการตามนี้

$$Cg. \text{ของขาหน้า: } (X_{lfg}, Y_{lfg}) = (X_r/2, Y_r/2) \quad (4.10)$$

$$Cg. \text{ของขาหลัง: } (X_{lbg}, Y_{lbg}) = ((L_s - X_q)/2, Y_q/2) \quad (4.11)$$

$$Cg. \text{ของตัวหุ่น: } (X_{bg}, Y_{bg}) = (X_r + (X_q - X_r)/2, Y_q + (Y_r - Y_q)/2) \quad (4.12)$$

หาจุด CG. รวมของทั้งเฟรมจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$X_g \sum M_i = \sum X_i M_i \text{ และ } Y_g \sum M_i = \sum Y_i M_i$$

$$X_g(2M_l + M_b) = M_l X_r/2 + M_l (L_s - X_q)/2 + M_b (X_r + (X_q - X_r)/2)$$

$$X_g = 1/(2M_l + M_b) * (M_l X_{lfg} + M_l X_{lbg} + M_b X_{bg}) \quad (4.13)$$

$$Y_g(2M_l + M_b) = M_l Y_r/2 + M_l Y_q/2 + M_b (Y_r - Y_q)/2$$

$$Y_g = 1/(2M_l + M_b) * (M_l Y_{lfg} + M_l Y_{lbg} + M_b Y_{bg}) \quad (4.14)$$

จากสมการที่ (4.13) และ (4.14) นำมาเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \end{bmatrix} = \frac{1}{2M_l + M_b} \begin{bmatrix} M_l X_{lfg} + M_l X_{lbg} + M_b X_{bg} \\ M_l Y_{lfg} + M_l Y_{lbg} + M_b Y_{bg} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

จากสมการที่ (4.15) เราได้สมการที่จะหาค่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางที่จะใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ ซึ่งเป็นสมการที่จะใช้ในการควบคุมเสถียรภาพของตัวหุ่นยนต์คือสมการที่ (4.16) และส่วนที่ใช้ในการควบคุมระยะทางที่จะใช้ในการก้าวเดินคือสมการที่ (4.17) ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

G_x = ค่าซึ่งบอกการเคลื่อนที่ของศูนย์กลางความโน้มถ่วงตามแนวแกน X ซึ่งกำหนดดังนี้

$$G_x = X_g - (X_p/2) \quad (4.16)$$

จากสมการที่ (2-48) คำนวณค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าเป็นสภาวะเริ่มแรก คืออยู่ในท่ายืนเหยียดตรงและที่ค่าดังกล่าวมีค่าเป็นบวก แสดงว่าหุ่นยนต์มีการโน้มตัวไปทางด้านหลังซึ่งเราจะกำหนดให้เคลื่อนตัวได้สูงสุดที่ $X_g = X_p$ นั่นคือที่ $G_x = X_p/2$ หรือในทางกลับกันเมื่อค่าดังกล่าวเป็นลบแสดงว่ามีการเคลื่อนที่โดยการเดินถอยหลัง โดยเราจะกำหนดให้การโน้มตัวเพื่อถ่ายน้ำหนักก่อนการเดิน ซึ่งมีขีดจำกัดที่จุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงจะสามารถเคลื่อนตัวไปได้ระยะทางสูงสุดโดยที่ไม่ทำให้เกิดการพลิกคว่ำ ที่พิกัดซึ่ง $X_g = 0$ นั่นคือที่ค่า $G_x = -X_p/2$ ตามสมการทางคณิตศาสตร์โดยกำหนดให้ภาวะที่กระทำ ๆ ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล

ดังนั้นตลอดการเคลื่อนที่ของเรา เราจะควบคุมตำแหน่งของศูนย์กลางโน้มถ่วง เพื่อให้ทำให้การก้าวเดินของหุ่นยนต์ใช้กำลังขับเคลื่อนน้อยก็สามารถที่จะเคลื่อนตัวไปได้

การควบคุมระยะทางในการก้าวของแต่ละการก้าว คือระยะ T_{d1} สามารถควบคุมระยะการก้าวเดินด้วยสมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$T_{d1} = L_s - L_b \quad (4.17)$$

สมการที่ (4.17) นี้เป็นการควบคุมการก้าวเดินแบบไกลหรือ Rub gait ความหมายของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดส่วนต่างๆ ของตัวหุ่นมีดังนี้

L_l = ความยาวของขา ; L_b = ความยาวของตัว

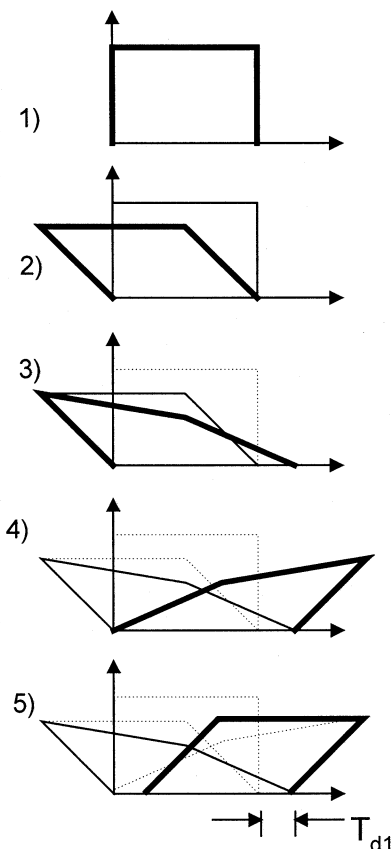
M_l = มวลของขา ; M_b = มวลของลำตัว

θ_1 = มุมที่แนวขาหน้ากระทำกับแนวลำตัว ; θ_2 = มุมที่แนวขาหลังกระทำกับแนวลำตัว

T_{d1} = ระยะทางที่ก้าวเดินได้ในแต่ละรอบของการเดิน

L_s = ระยะห่างระหว่างขาหน้าและขาหลังตามแนวระดับของพื้นภายหลังจากการก้าวเดิน

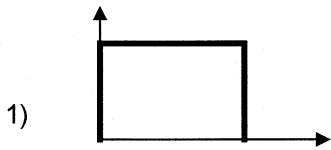
การก้าวเดินของหุ่นยนต์



รูปที่ 4.2 แสดงลำดับการเดินของหุ่นยนต์เดินด้วยกลไกสี่ลิงค์

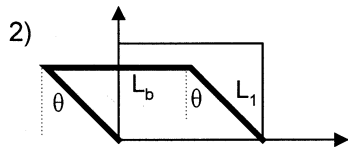
การก้าวเดินของหุ่นยนต์ที่เดินด้วยกลไกแบบ four bar นั้นแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และสามารถบรรยายการเดินเป็นขั้นๆ ดังนี้

ลำดับที่ 1 ระบบวิ่งเข้าสู่ตำแหน่ง Home ซึ่งเป็นตำแหน่งเริ่มต้นในท่ายืนเหยียดตรงของระบบ



รูปที่ 4.3 แสดงลำดับที่ 1 ของการเดินของหุ่นยนต์ (Home Position)

ลำดับที่ 2 เป็นการโน้มตัวมาด้านหลังก่อนการก้าวเดินเพื่อเป็นการย้ายจุดศูนย์ถ่วงของระบบมาลงบนเท้าหลังเพื่อลดแรงเสียดทานในการก้าวเดินดังรูปที่ 4.4 โดยมุมมองที่ทำให้จุดศูนย์ถ่วงตกอยู่ที่เท้าด้านหลังเป็นไปตามสมการการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์ถ่วง จากสมการพิจารณาหา มุม ? ที่ทำให้ค่าของสมการ X_g มีค่าเท่ากับศูนย์

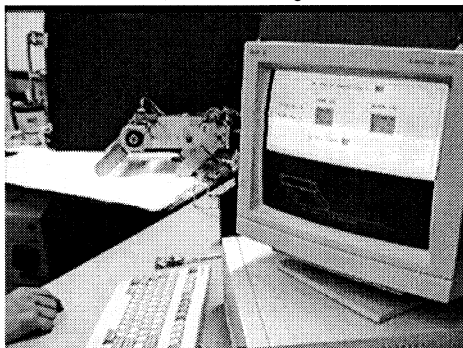
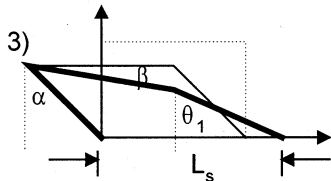


รูปที่ 4.4 แสดงลำดับที่ 2 ของการเดินของหุ่นยนต์

$$X_g = \frac{1}{2m_l + m_b} \left[m_{lf} \left(L_b - \frac{L_1}{2} \sin \theta \right) - m_b \frac{L_1}{2} \sin \theta + m_b \left(L_b - L_1 \sin \theta - \frac{L_b}{2} \right) \right]$$

ซึ่งคือมุมที่ใช้ในการขับเคลื่อนลำดับที่ 2 ก่อนทำการก้าวเดินในลำดับที่ 3

ลำดับที่ 3 เป็นการขับเคลื่อนขาหน้าเพื่อทำการก้าวเท้าเดินเป็นระยะทางที่กำหนดโดยมุมที่ขับเคลื่อนขาหน้าทำให้การก้าวเท้าเดินมีความสัมพันธ์กัน



รูปที่ 4.5 แสดงลำดับที่ 3 ของการเดินของหุ่นยนต์

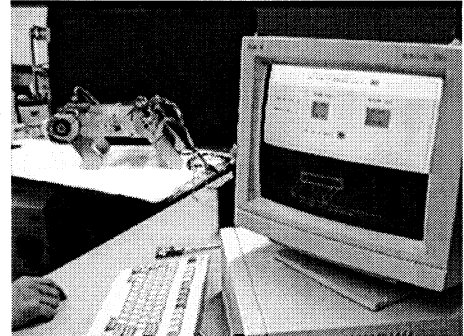
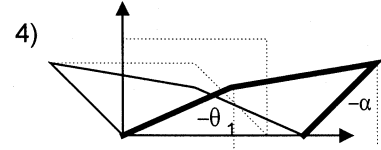
$$\sin \beta = \left(\frac{L_1}{L_b} \right) (\cos \alpha - \cos \theta_1)$$

$$\cos \beta = [L_s + L_1 \sin \alpha - L_1 \sin \theta_1] / L_b$$

และจาก $\sin^2 \beta + \cos^2 \beta = 1$ เราสามารถคำนวณหาค่า θ_1 ได้ T_d คือ ค่าระยะทางที่เรากำหนดและ L_b มีค่าความยาวของตัวหุ่นยนต์ซึ่งมีความยาวคงที่เท่ากับ 26 ซม. และ $L_s = L_b + T_d$ นั่นคือเมื่อก้าวเท้าหน้าด้วยมุม q_1 เราก็จะได้ระยะทางเท่ากับ T_d

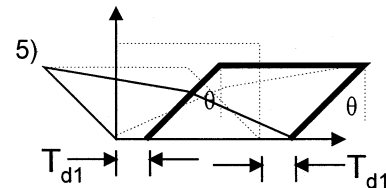
ลำดับที่ 4 เป็นการขับเคลื่อนด้วยขนาดของมุมที่เท่ากับมุมในลำดับที่ 2 แต่ตรงกันข้ามคือมุมขับเคลื่อนของเท้าหน้าในลำดับที่ 3 เป็นมุมขับเคลื่อนของเท้า

หลังในลำดับที่ 4 ในทิศทางตรงข้ามกัน ส่วนมุมขับเคลื่อนของเท้าหลังในลำดับที่ 3 ก็เป็นมุมขับเคลื่อนของเท้าหน้าในลำดับที่ 4 ในทิศทางตรงข้ามกัน ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นการถ่ายเทน้ำหนักหรือเปลี่ยนจุดศูนย์ถ่วงกลางโน้มถ่วงของระบบมาลงที่เท้าหน้าก่อนที่จะทำการลากเท้าหลังเข้ามาด้วยแรงเสียดทานของเท้าทั้งสองกับพื้นซึ่งมีค่าไม่มากนัก ช่วงนี้ถ้าจะให้การเดินสมบูรณ์มอเตอร์จะต้องมีการตอบสนองค่อนข้างเร็วกับคำสั่งที่สั่งให้มอเตอร์เคลื่อนที่



รูปที่ 4.6 แสดงลำดับที่ 4 ของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

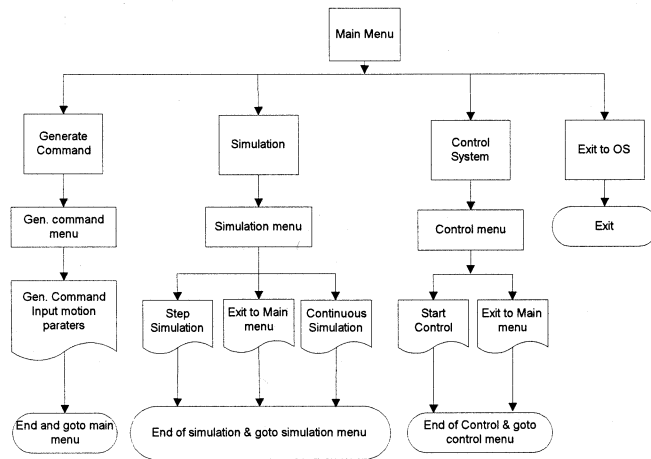
ลำดับที่ 5 เป็นการลากเท้าหลังเข้ามาเพื่อให้มุมของเท้าหน้าและเท้าหลังเท่าๆกันภายใต้คำสั่งเป็นมุมขับเคลื่อนไปตามลำดับที่ 2 ของการก้าวเดินก่อนที่จะเข้าสู่ตำแหน่ง Home position อีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.7 แสดงลำดับที่ 5 ของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการใช้ในการควบคุมการเดินของหุ่นยนต์

คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมเป็นคอมพิวเตอร์ 486DX4-100 โดยผลการควบคุมทั้งหมดกระทำโดยคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการที่จะประมวลผลเพื่อสั่งการทำงานของหุ่นยนต์ให้มีลำดับการเดินเป็นไปตามสมการทางคณิตศาสตร์กลไกที่หามาได้ และการสร้างโปรไฟล์ของคำสั่งในการควบคุมซึ่งมีหลักการทางงานดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดง Flowchart ของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม

5) สรุปผลการทดลอง

1. จากผลการควบคุมการเดินที่ความเร็วคงที่ เพื่อดูการควบคุมภายใต้ความเร็วคงที่ ๆ ที่ค่าความเร็วต่าง ๆ กัน พบว่าช่วงของการเริ่มต้นในการควบคุมที่ความเร็วต่ำ จะต้องใช้จำนวนคาบในการสุมก่อนข้างยาวนานกว่าที่ความเร็วสูง ๆ ในช่วงต้นที่จะต้องขับขาหุ่นยนต์เพื่อเอาชนะแรงเสียดทาน ซึ่งจากผลการทดลองก็คือช่วงเริ่มต้นจะมีเวลาหน่วง (time delay) นอกจากนั้นก็ยังมีส่วนของแรงเสียดทาน ซึ่งหลังจากผ่านช่วงดังกล่าวจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะความผิดพลาดคงตัว (steady state) แล้วจะพบว่าค่าการเดินก่อนข้างเรียบ ดังนั้นภายใต้การควบคุมการเดินแบบความเร็วคงที่นี้สำหรับกรณีการก้าวเดินกระทำเป็นมุมเล็กๆ ที่ภายใต้การควบคุมดังกล่าวระบบจะเกิดความผิดพลาดก่อนข้างมาก และเมื่อแก้ไขภายใต้การควบคุมดังกล่าวโดยการเพิ่มค่าความเร็วก็จะพบว่าตำแหน่งเป้าหมายจะผิดพลาดทันทีซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วในการก้าวเดิน ค่าผิดพลาดดังกล่าวเป็นผลมาจากแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วคงที่นั่นเอง ดังนั้นการควบคุมการเดินที่ความเร็วคงที่ จะทำให้เกิดความผิดพลาดของการควบคุมก่อนข้างสูง และการเดินจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่ความเร็วต่ำๆ สำหรับระบบที่มีแรงเสียดทานก่อนข้างมาก จะส่งผลให้การเดินมีอาการกระตุกเป็นระยะ เนื่องจากการแก้ไขค่าความผิดพลาดของระบบควบคุมที่เกิดขึ้นไม่ทัน เพราะมอเตอร์ที่ใช้มีค่าความเวลาคงที่ไม่เร็วหรือมีการตอบสนองก่อนข้างช้า ดังนั้นภายใต้การควบคุมด้วยความเร็วคงที่เพียงอย่างเดียวจึงไม่เหมาะกับการควบคุมการเดินของหุ่นยนต์ แต่อย่างไรก็ตามที่ภายใต้การควบคุมแบบความเร็วคงที่เพียงอย่างเดียวในที่นี้พบว่าที่ค่าความเร็วเชิงมุมที่ค่า $0 < \omega < 6 \text{ rad/s}$ ให้ผลการตอบสนองที่ยอมรับได้

2. ผลการควบคุมการเดินของหุ่นยนต์ที่ภายใต้ความเร็วคงที่ พบว่าในช่วงต้นของการก้าวเดินระบบจะต้องเอาชนะแรงเสียดทาน โดยใช้เวลาหรือจำนวนคาบของการสุมต่างกันโดยที่ความเร็วเพิ่มมากขึ้นจำนวนคาบการสุมก็จะลดลง ในช่วงที่ต้องเอาชนะแรงเสียดทานดังกล่าว เมื่อลดคาบเวลาการสุมที่ช่วงดังกล่าวโดยการเพิ่มความถี่ในการเคลื่อนที่ที่ $\alpha > 3 \text{ rad/s}^2$ พบว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระหว่างจุดต่อจุดของการควบคุมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะตัวมอเตอร์เองไม่สามารถให้ค่าความเร่งตอบสนองได้ทัน และที่ภายใต้ความเร็วเชิงมุมที่ค่า $0 < \alpha < 3 \text{ rad/s}^2$ จะเป็นช่วงของการให้ผลการตอบสนองที่ดีที่สุด แม้ว่าจะใช้เวลาก่อนข้างมากใน

ช่วงของการเอาชนะแรงเสียดทานและผลกระทบเนื่องจากแบคแลชจากเกียร์ทด เมื่อเปรียบเทียบผลการควบคุมกับที่ความเร็วคงที่พบว่าที่ช่วงเริ่มต้นไม่แตกต่างกันมากนักแต่การเข้าสู่สภาวะความผิดพลาดคงตัว (steady state error) ของระบบที่ภายใต้ความเร็วคงที่จะใช้คาบเวลาในการสุมน้อยกว่าที่ความเร็วคงที่ และที่ภายใต้ความเร็วสูงขึ้นจะส่งผลให้การก้าวเดินมีการกระเพื่อมของผลลัพธ์การควบคุมหรือค่าความผิดพลาดมีค่าค่อนข้างสูง และที่ตำแหน่งเป้าหมายที่ภายใต้การควบคุมความเร็วคงที่เพียงอย่างเดียวนี้ก็พบว่าเออเรอร์ที่เกิดขึ้นแปรตามความเร็วที่ควบคุม ดังนั้นที่ภายใต้การควบคุมแบบความเร็วคงที่นี้เหมาะกับการควบคุมการเคลื่อนที่ในช่วงเริ่มต้นเพียงเท่านั้น

3. จากผลการทดลองการควบคุมที่ความเร็วคงที่เพียงอย่างเดียวพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีการแปรตามค่าความเร็วที่เพิ่มหรือลด ดังนั้นการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งปลายทางเราสามารถที่จะลดความผิดพลาดการเคลื่อนที่ดังกล่าวอันเนื่องมาจากสาเหตุของแรงเฉื่อยของมวลระบบได้โดยการปรับโปรไฟล์การเคลื่อนที่ในส่วนของความหน่วงคงที่เพื่อทำให้ความเร็วของมวลหรือขา มีค่าเข้าสู่ศูนย์ ซึ่งก็จะเป็นผลทำให้ค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ ภายใต้ผลการทดลองดังกล่าวนี้เป็นส่วนที่ใช้ในการพิจารณาว่าที่ค่าความเร็วเท่าไรที่ระบบให้การตอบสนองที่ดีที่สุด สำหรับกรณีที่ควบคุมการก้าวเดินของขาของหุ่นยนต์ที่เดินในช่วงของมุมเล็กๆ ภายใต้การควบคุมดังกล่าวจะให้ผลการควบคุมที่ดีซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเวลาในการสุมที่การควบคุมดังกล่าว ช่วงของเวลาในการเอาชนะแรงเสียดทานจะมีค่าน้อยลงที่ความเร็วและความหน่วงเพิ่มขึ้น แต่ที่ความเร็วเพิ่มขึ้นผลลัพธ์ของการควบคุมระหว่างทางพบว่ามีการแกว่งที่ความเร็วเชิงมุม $\alpha > 3 \text{ rad/s}^2$ นั้นหมายความว่าภายใต้การควบคุมที่ความเร็วและความหน่วงคงที่นี้ค่าที่ให้ผลการควบคุมการก้าวเดินที่ดีที่สุดที่ค่า $\alpha \approx 3 \text{ rad/s}^2$ หรือที่ค่าต่ำกว่านั้นก็ให้ผลลัพธ์การควบคุมการก้าวเดินที่ค่อนข้างดี และที่ภายใต้การควบคุมลักษณะดังกล่าวนี้มีข้อดีคือค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเป้าหมายค่าเข้าใกล้ศูนย์

4. จากผลการควบคุมทั้ง 3 แบบจะพบว่าแต่ละแบบต่างก็ให้ผลลัพธ์การควบคุมที่แตกต่างกันซึ่งพบว่าการควบคุมที่ความเร็วคงที่มีข้อดีคือที่ช่วงระหว่างทางการเคลื่อนที่แบบจุดต่อจุดจะให้ผลลัพธ์การควบคุมหรือการก้าวเดินที่ค่อนข้างเรียบ และที่ภายใต้การควบคุมที่ความเร็วและความหน่วงคงที่จะให้ผลลัพธ์ คือการเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายหรือตำแหน่งปลายทางค่อนข้างใกล้เคียงหรือเออเรอร์เข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นจากผลดังกล่าวนี้เราจึงทำการนำค่าผลลัพธ์ของความเร็วและความเร่งที่ให้มีช่วงก้าวยาว การนำผลดีของการควบคุมทั้งสองแบบมารวมกันก็จะให้ผลการควบคุมที่ดีที่สุด กล่าวคือที่การควบคุมดังกล่าวจะให้ผลลัพธ์การก้าวเดินที่เรียบและให้ผลลัพธ์ของตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจากสิ่งดังกล่าวนี้เราจึงทำการนำค่าผลลัพธ์ของความเร็วและความเร่งที่ให้มีช่วงก้าวยาว การนำผลดีของการควบคุมทั้งสองแบบมารวมกันก็จะให้ผลการควบคุมที่ดีที่สุด กล่าวคือที่การควบคุมดังกล่าวจะให้ผลลัพธ์การก้าวเดินที่เรียบและให้ผลลัพธ์ของตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจากสิ่งดังกล่าวนี้เราจึงทำการนำค่าผลลัพธ์ของความเร็วและความเร่งที่ให้มีช่วงก้าวยาว การนำผลดีของการควบคุมทั้งสองแบบมารวมกันก็จะให้ผลการควบคุมที่ดีที่สุด กล่าวคือที่การควบคุมดังกล่าวจะให้ผลลัพธ์การก้าวเดินที่เรียบและให้ผลลัพธ์ของตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจากสิ่งดังกล่าวนี้เราจึงทำการนำค่าผลลัพธ์ของความเร็วและความเร่งที่ให้มีช่วงก้าวยาว การนำผลดีของการควบคุมทั้งสองแบบมารวมกันก็จะให้ผลการควบคุมที่ดีที่สุด กล่าวคือที่การควบคุมดังกล่าวจะให้ผลลัพธ์การก้าวเดินที่เรียบและให้ผลลัพธ์ของตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างถูกต้อง

ข้อเสนอแนะ

การสร้างหุ่นยนต์เดินด้วยกลไกแบบ four bar นี้สร้างขึ้นโดยใช้อุปกรณ์ที่หาซื้อได้ทั่วไปและใช้มอเตอร์เกียร์ที่มีความเร็วในการตอบสนองไม่เร็วเท่าที่ควร ประกอบกับชุดควบคุมมอเตอร์เป็นชุดขยาย

สัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier) ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

1. ปรับปรุงโครงสร้างของขาที่บริเวณอีตเอนโคดเดอร์ในการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ให้ความแข็งแรงและได้ศูนย์

2. ปรับปรุงในรูปร่างหรือรูปทรงของเท้าเดินให้มีแรงเสียดทานในการเกาะจับพื้นผิวต่างๆ กัน

3. ปรับเปลี่ยนแก๊วมอเตอร์ให้เป็นดีซีเซอร์โวมอเตอร์เพื่อผลตอบสนองที่ดีขึ้นในการควบคุม และใช้ตัวควบคุมมอเตอร์เป็นแบบ current amplifier จะทำให้เราสามารถควบคุมแรงได้ดีกว่านี้

4. การปรับปรุงในส่วนของการควบคุมการเดินสามารถที่จะพัฒนาต่อไปได้ ในส่วนของการควบคุมระยะทางในการเคลื่อนที่โดยการสร้างและติดตั้งเซ็นเซอร์ในส่วนของการวัดระยะทาง

5. เพื่อให้สามารถทำการเคลื่อนที่ๆ มุมองศาต่างๆ ของพื้นเดินตามความสัมพันธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นไปโดยอัตโนมัติ โดยการสร้างหรือติดตั้งอุปกรณ์ในการตรวจจับความชันของพื้นเดินเพื่อนำไปประมวลผลควบคุมการเดินให้อยู่ในเสถียรภาพได้

เอกสารอ้างอิง

- 1) วรวิทย์ อึ้งภากรณ์, วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, "การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด 3 ข้อต่อที่มีการเคลื่อนที่แบบพิกัดฉาก", ทุนรัชดาภิเษกสมโภช, 2535
- 2) วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, "การควบคุมระบบพลศาสตร์", พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- 3) John G., Bollinger, Neil A. Duffie, "Computer Control of Machines and Processes", Addison-Wesley, 1988.
- 4) Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice-Hall International, 1990.
- 5) Tomokazu Hirabayashi, Kazuo Yamafuji, "Control of the Variable-Structure-Type Locomotive Robot" (Walking Forms and Controlling Methods of the Leg-Leg Type) (JSME Series 3, Vol., 35), 1992.
- 6) William J. Palm, "Control System Engineerings", John Wiley & Son, 1986