การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17
15 – 17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

การควบคุมการเคลื่อนที่หนึ่งองศาอิสระของแขน โดยใช้การป้อนกลับด้วยการสั่นสะเทือนชนิดสัมผัส

ONE DEGREE OF FREEDOM ARM MOVEMENT CONTROL USING VIBROTACTILE FEEDBACK

พงศธร ศรอำพล และ ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพ 10300
โทร 218-6588, โทรสาร 252-2889, Email: pongstorn@chula.com

Pongstorn Sornumpol and Supavut Chantranuwathana
Department of Mechanical Engineering
Chulalongkorn University
Bangkok, 10300, Thailand
Tel : 218-6588, Fax : 252-2889

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบการแนะนำการเคลื่อนไหวสำหรับบุคคลพิการทางสายตา และผลการทดลองเบื้องต้นของระบบนี้ใช้อุปกรณ์ที่สามารถส่งสัญญาณแบบสั่นสะเทือนให้แก่ผิวหนังตามตำแหน่งต่างๆของผู้ใช้ โดยการเคลื่อนไหวแบบต่างๆของผู้ใช้ก็จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งต่างๆของผิวหนังที่ได้รับการสั่นสะเทือนแล้วแต่จะได้ตกลงกันไว้ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และข้อจำกัดในการรับคำสั่งผ่านผิวหนังของมนุษย์ ในขั้นต้นนี้จึงได้จำกัดการศึกษาไปที่การเคลื่อนที่หนึ่งองศาอิสระของแขนก่อน โดยติดตั้งตัวกระตุ้นแบบสั่นที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้ที่ตำแหน่งข้อมือด้านในและนอกเพื่อส่งทิศทางและความเร็วในการหมุนให้กับปลายแขน จากการทดลองพบว่าสามารถใช้ตำแหน่งของการกระตุ้นในการบอกให้ผู้ทดลองเคลื่อนไหวท่อนแขนไปในทิศทางที่ต้องการได้ และสามารถใช้ความถี่ในการปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ โดยที่ระบบสามารถประมาณได้ด้วยแบบจำลองพลศาสตร์แบบเชิงเส้นร่วมกับเวลาประวิง

Abstract

This paper presents a movement advisory system for visually impaired people. The system uses devices that can send vibration signal to the subjects' skin by which various movements of the subject are associated with the signals at various locations on the body. This study limits to an angular arm movement in one degree of freedom using vibration actuators located at each side of the subject's wrist. A linear dynamic model is presented for the relation between the vibration frequency and the angular arm movement.

1. บทนำ

ปัญหาหนึ่งที่สำคัญในปัจจุบันของคนตาบอดคือ การได้รับข้อมูลที่ไม่เพียงพอของสิ่งแวดล้อมรอบตัว ดังนั้นจึงมีการคันคิดระบบต่างๆในการให้ข้อมูลเหล่านี้แก่คนตาบอดผ่านทางอื่นๆแทนตา ระบบที่สำคัญอันหนึ่งก็คือ ระบบช่วยในการเดินทางโดยจะใช้สัญญาณเสียงหรือสัญญาณสั่นในการบอกขนาดและความใกล้ของสิ่งกีดขวางเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเดินทางหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้

จากการพิจารณาจะพบว่าระบบนี้จะไม่เหมาะสำหรับการใช้งานอื่นๆนอกเหนือจากการเดินทาง เช่นการหาสิ่งของหรือการทำงานในสภาพแวดล้อมที่ไม่คงที่ซึ่งต้องการข้อมูลของสภาพแวดล้อมในปริมาณมาก เนื่องด้วยประสาทหูและผิวหนังสามารถรับข้อมูลได้น้อยกว่าประสาทตามากดังในตารางที่ 1 [1]

ตารางที่ 1 แสดงช่วงจำกัดของแถบกว้างความถี่(bandwidth) สำหรับประสาททั้งสาม

ประสาท	ช่วงจำกัดข้อมูล bits/sec
ผิวหนัง	10^2
หู	10^4
ตา	10^6

ในงานวิจัยนี้จึงเสนอระบบการให้ข้อมูลแก่บุคคลพิการทางสายตาที่มีการประมวลผลแล้วเพื่อให้มีขนาดข้อมูลน้อยลง เช่นการหาสิ่งของนั้นก็สามารถใช้ระบบคอมพิวเตอร์ประมวลผลจากกล้องดิจิตอลก่อนแล้วจึงมีการส่งสัญญาณแนะนำตำแหน่งของวัตถุ หรือแนะนำการเคลื่อนไหวของแขนไปหยิบจับของที่ต้องการ

บทความนี้จะนำเสนอในส่วนของระบบแนะนำการเคลื่อนไหวโดยใช้สัญญาณสั่น โดยจะสมมติว่ามีระบบอื่นในการกำหนดการเคลื่อนไหวที่ต้องการ และศึกษาในส่วนของความสัมพันธ์ของสัญญาณสั่นและการเคลื่อนไหวของมนุษย์ โดยที่จะศึกษาการเคลื่อนไหวใน 1 องศาอิสระ และเลือกใช้สัญญาณสั่นในการส่งข้อมูล ในส่วนของระบบเสียงถึงแม้จะมีข้อดีคือผู้พิการสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย แต่ก็จะมีประสิทธิภาพลดลงในสภาพแวดล้อมที่มีเสียงรบกวน [2] ส่วนในการใช้งานตัวกระตุ้นแบบสั่นนั้นมีข้อดีคือ ปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนมีน้อย สามารถให้ข้อมูลตามตำแหน่งต่าง ๆตามร่างกายได้ตามคำสั่งว่าจะให้เคลื่อนที่อย่างไร และผู้ที่พิการทางตาและหูสามารถใช้ได้ แต่มีข้อเสียที่ต้องใช้เวลาในการเรียนรู้เพื่อทำความคุ้นเคย และหากใช้งานไประยะหนึ่งอาจทำให้รู้สึกชาที่ผิวหนังและอาจรับข้อมูลต่อไม่ได้ [3]

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1. ระบบประสาททางด้านสัมผัสของมนุษย์

จากการค้นคว้าพบว่า เส้นประสาทที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดการสั่นสะเทือนคือ พาซิเนียนคอร์พูสเซิล (Pacinian corpuscles) โดยสามารถรู้สึกการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 10-500 Hz และรู้สึกไวที่สุดที่ความถี่ 250 Hz [4] และระยะห่างระหว่างจุดให้ข้อมูลของการสั่นควรมากกว่า 3.2 มม.ที่ความถี่ต่ำคือ 50-350 Hz และมากกว่า 4.4 มม. ที่ความถี่สูงคือ 500-700 Hz [1]

การส่งข้อมูลแบบสั่นทางผิวหนังอาจทำได้หลายวิธีเช่น การใช้ความถี่ที่ต่างกันของการสั่น และการใช้ความแรงของการสั่นที่ต่างกันที่ความถี่เดียว นอกจากนี้แล้วความสามารถในการรับข้อมูล (sensitivity) ก็อาจจะเพิ่มได้โดยการใช้สัญญาณแบบสุ่มสำหรับผู้สูงอายุ[8] และการใช้ช่วงหยุดระหว่างการสั่นสามารถหลีกเลี่ยงความเคยชินของประสาทสัมผัสซึ่งเป็นเหตุให้ประสาทสัมผัสไม่ตอบสนองได้[4]

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ใช้ความถี่ในการสั่นของโซลินอยด์เป็นอินพุตของการส่งข้อมูล (ไม่มีการควบคุมความแรงของการสั่น) คือถ้าสั่นที่ความถี่สูงคือ ให้ตกลงกับผู้ใช้ว่าให้เคลื่อนที่เร็วขึ้น และที่ความถี่ต่ำคือให้เคลื่อนที่ช้าลง

2.2 ระบบควบคุมการเคลื่อนไหว

จากการศึกษาพบว่า การควบคุมตำแหน่งของแขนให้เคลื่อนที่ไปที่ที่ต้องการ ให้มีความผิดพลาดน้อยนั้น ควรจะใช้ระบบแบบป้อนกลับ คือ มีการใช้ข้อมูลความแตกต่างระหว่างตำแหน่งจริงของแขน และตำแหน่งของแขนที่ต้องการ โดยจะให้สัญญาณสั่นที่ต่างกันแล้วแต่ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเช่น มีการสั่นที่ความถี่สูงในด้านของแขนที่ต้องการจะให้เลื่อนไปเมื่อมีความแตกต่างของตำแหน่งของแขนมาก

การออกแบบระบบป้อนกลับนั้นก็จะทำในแบบทั่ว ๆไปคือเริ่มที่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Dynamic Model) แล้วนำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุม (หรือระบบแนะนำ) การเคลื่อนที่ แต่การออกแบบนั้นอาจต้องคำนึงถึง "Crossover Model Principle" ที่บอกว่าระบบวงปิดใดๆที่มีมนุษย์อยู่ในระบบ จะมีวงฟังก์ชันถ่ายโอนที่ความชันในแผนภาพโบดีประมาณ -20 dB/decade ที่ความถี่ตัดข้ามเสมอ เนื่องจากการปรับตัวของมนุษย์ซึ่งถ้าแบบจำลองที่สร้างขึ้นเมื่อนำมารวมกับระบบควบคุมเพื่อหาเป็นวงฟังก์ชันถ่ายโอนแล้ว ถ้าไม่ได้ค่าความชันที่กำหนดไว้ก็จะมีความแม่นยำในการทำนายผลการใช้งานลดลงหรือไม่ถูกต้อง เช่นตัวควบคุมเชิงสัดส่วนที่มีอัตราขยายสูงทำให้ความถี่ตัดข้ามของวงฟังก์ชันถ่ายโอนหรือก็คือแถบกว้างความถี่ (bandwidth) ของระบบปิดมีค่ามาก ๆ ที่จะทำให้ค่าความชันที่ความถี่ตัดข้ามของฟังก์ชันถ่ายโอนมีน้อย เพราะโดยทั่วไปแล้วค่าความชันจะน้อยลงตามความถี่ที่สูงขึ้น ซึ่งก็ตรงกับความเข้าใจทั่วไปที่ว่า มนุษย์จะไม่สามารถเคลื่อนไหวตามคำสั่งที่เร็วมากได้ ถึงแม้จะมีระบบควบคุมที่ดีอย่างไรก็ตาม

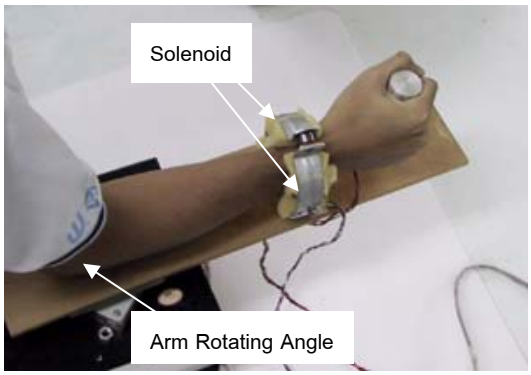
3. อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

วัตถุประสงค์ในการทดลองขั้นต้นนี้จะเป็นการทดลองเพื่อหาแบบจำลองการตอบสนองของผู้ทดลองด้วยวิธีการตอบสนองเชิงความถี่ โดยมีอินพุตคือ ความถี่ของการสั่น และเอาท์พุตคือมุมที่เปลี่ยนไปของแขนเนื่องมาจากความถี่ของการสั่น การส่งสัญญาณควบคุมจะเป็นการส่งสัญญาณแบบสั่นไปที่ข้อมือ ตัวกระตุ้นจะถูกติดตั้งที่ตำแหน่งข้อมือด้านในและด้านนอกเพื่อระบุทิศทางของการหมุนให้กับแขน ลักษณะของสัญญาณควบคุมจะมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ แอมพลิจูดของไซน์ก็คือขนาดความถี่ของการสั่น ความถี่ที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0 – 100 Hz เมื่อทำการส่งสัญญาณควบคุมไปกระตุ้นข้อมือ โดยใช้ตัวกระตุ้นโซลินอยด์ที่มีความเหนี่ยวนำไฟฟ้า 2.0 mH และมีความต้านทาน 12.5 โอห์ม สั่นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ลักษณะของตัวสั่นเป็นแท่งเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. ความยาว 15 มม. เอาท์พุตที่ได้จะเป็นตำแหน่งมุมการหมุนของแขนซึ่งจะเปลี่ยนไปตามลักษณะของสัญญาณควบคุม โดยใช้เอนโคดเดอร์ สำหรับวัดตำแหน่งมุมของปลายแขนซึ่งมีความละเอียด 1600 พัลส์ต่อรอบ

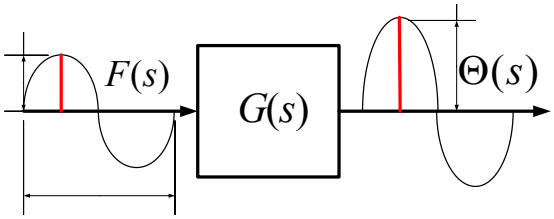
ขั้นตอนการทดลอง

1. การติดตั้งตัวกระตุ้นบนข้อมือขวาด้านในและด้านนอกของผู้ทดลอง
2. ทำการตกลงกับผู้ทดลองว่าจะหมุนแขนทิศเดียวกับการสั่นคือเมื่อตัวกระตุ้นด้านนอกจะสั่นผู้ทดลองจะหมุนแขนขวาในทิศตามเข็มนาฬิกาและเมื่อตัวกระตุ้นด้านในสั่นผู้ทดลองจะหมุนข้อมือในทิศทวนเข็มนาฬิกา
3. บันทึกตำแหน่งการหมุนของข้อมือเทียบกับเวลาโดยคอมพิวเตอร์จะเก็บข้อมูลของตำแหน่งการหมุนทุก 0.01 วินาทีตลอดระยะเวลาการทดลอง

ในการทดลองจะต้องทำการบันทึกค่าคาบของสัญญาณอินพุตที่เป็นคลื่นรูปไซน์และตำแหน่งมุมการหมุนของเอาท์พุต จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปหาแผนภาพโบดี ซึ่งจะนำไปสู่การหาแบบจำลองการตอบสนองของการสั่น



รูปที่ 3 การทดลองหมุนปลายแขนซึ่งได้รับสัญญาณจากตัวกระตุ้น



รูปที่ 4 แผนภาพการทดลอง

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการหาแบบจำลองเราพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอน โดยมีอินพุตคือ ความถี่ของการสั่น $F(s)$ และ เอาท์พุตคือ มุมการเคลื่อนที่ของปลายแขน $\Theta(s)$ ดังนี้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเปิดคือ

$$\frac{\Theta(s)}{F(s)} = G(s) \qquad (1)$$

โดยค่าอินพุต $f(t)$ มีค่าเป็นคลื่นรูปไซน์คือ

$$f(t) = F\sin\omega t \qquad (2)$$

สำหรับระบบที่มีเสถียรภาพแล้ว เอาท์พุตจะมีลักษณะเป็น

$$\theta(t) = \Theta\sin(\omega t + \phi) \qquad (3)$$

ซึ่ง

$$\Theta = F\,|\,G(j\omega)\,| \qquad (4)$$

$$\phi = \angle G(j\omega) = \tan^{-1}\left[\frac{imaginary\ part\ of\ G(j\omega)}{real\ part\ of\ G(j\omega)}\right]$$

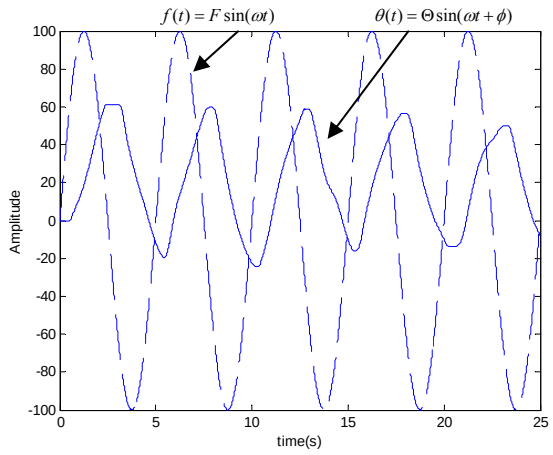
ระบบเชิงเส้นที่มีเสถียรภาพเมื่อฟังก์ชันอินพุตเป็นไซน์ จะให้เอาท์พุตที่สถานะอยู่ตัว (steady state) เป็นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับอินพุต แต่แอมปลิจูดและมุมเฟสมีค่าแตกต่างกัน

$$|\,G(j\omega)\,| = \left|\frac{\Theta(j\omega)}{F(j\omega)}\right| \qquad (5)$$

$$\angle G(j\omega) = \angle\frac{\Theta(j\omega)}{F(j\omega)} \qquad (6)$$

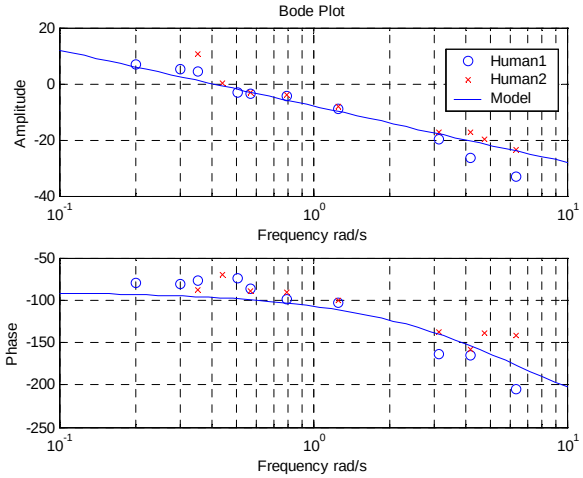
สมการการตอบสนองของระบบที่มีสัญญาณอินพุตแบบไซน์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\Theta(j\omega)}{F(j\omega)} = G(j\omega) \qquad (7)$$



รูปที่ 5 ตัวอย่างอินพุตและเอาท์พุตที่เป็นคลื่นรูปไซน์ที่ได้จากการทดลองด้วยสัญญาณอินพุตไซน์ที่ความถี่ 0.2 Hz

เมื่อทำการทดลองจริงโดยให้สัญญาณอินพุตเป็นไซน์แล้ววัดค่าอัตราส่วนของแอมพลิจูดระหว่างเอาท์พุตและอินพุตสามารถที่จะนำไปสร้างแผนภาพโบดีได้ตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพโบดี ของผู้ทดลอง 2 คนและแบบจำลอง

ขนาดความถี่ของการสั่น

เมื่อพิจารณาแผนภาพโบดีในรูปที่ 6 ทำให้เราสามารถประมาณหาฟังก์ชันถ่ายโอนจากอัตราขยายลอการิทึมได้คือ

$$G(s) = \frac{0.4}{s} \tag{8}$$

และจากผลการทดลองหาแบบจำลองสามารถสังเกตได้ว่า ในตอนเริ่มต้นของการให้สัญญาณอินพุต ผู้ทดลองเริ่มตอบสนองเมื่อเวลาผ่านไปได้ประมาณ 0.3 วินาที ซึ่งผลจากการหน่วงของเวลานี้ สามารถประมาณหาฟังก์ชันเวลาประวิงโดยใช้ค่าแบบจำลองคือ $e^{-0.3s}$ ด้วยวิธีพาเดลำดับที่หนึ่ง (1st order Pade' approximation) ซึ่งสามารถประมาณค่าได้เป็น

$$e^{-0.3s} \approx \frac{-3s+20}{3s+20} \tag{9}$$

ซึ่งสามารถเขียนฟังก์ชันของแบบจำลองได้

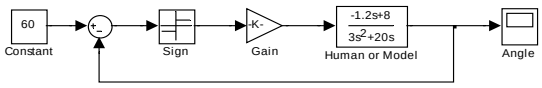
$$G(s) = \frac{0.4}{s}\frac{(-3s+20)}{(3s+20)} \tag{10}$$

นำไปพล็อตได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งแสดงได้ว่าสมการแบบจำลอง (10) เข้าใกล้ผลการทดลอง โดยสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 6 (แผนภาพเฟส) และจากแบบจำลองนี้จะนำไปเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการตอบสนอง กับผู้ทดลอง

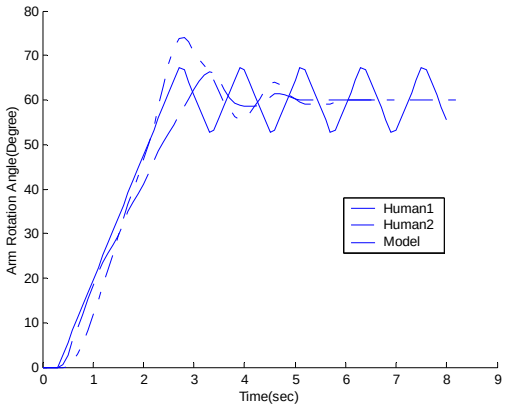
การทดสอบแบบจำลอง

การทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลอง โดยให้ผู้ทดลองหมุนแขนไป 60 องศา ซึ่งควบคุมผ่านสัญญาณอินพุตของการสั่น

ในการทดลองแบบแรกจะใช้ระบบควบคุมแบบเปิดปิด ซึ่งจะเป็นการควบคุมโซลินอยด์ที่มีการสั่นแค่สองสถานะ คือสั่นและหยุดสั่น เพื่อควบคุมทิศทางการหมุนของแขน คอมพิวเตอร์จะรับค่าของตำแหน่งมุมจากตัวตรวจวัดตำแหน่งและจะส่งสัญญาณควบคุมไปที่ระบบควบคุมแบบเปิดปิดเพื่อควบคุมโซลินอยด์

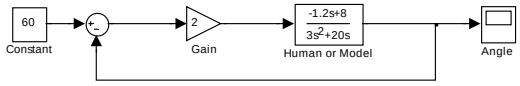


รูปที่ 7 แผนภาพบล็อกโดยใช้ตัวควบคุมแบบเปิดปิด

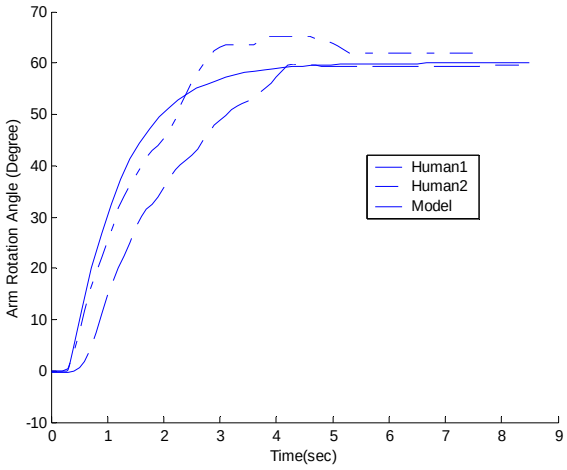


รูปที่ 8 การทดลองระบบควบคุมแบบเปิดปิด

ในการทดลองแบบที่สองจะใช้ระบบควบคุมแบบเชิงสัดส่วน ซึ่งจะเป็นการควบคุมโซลินอยด์ให้มีการสั่นเปลี่ยนค่าได้ในช่วง 0 – 100 Hz เท่านั้น ขึ้นอยู่กับมุมของการหมุนว่าอยู่ห่างจากมุมอ้างอิงคือ 60 องศาเพียงใด และคอมพิวเตอร์ก็จะรับค่าตำแหน่งมุม ประมวลผล และส่งค่าความถี่ในการสั่นไปยังโซลินอยด์



รูปที่ 9 การทดลองระบบควบคุมแบบเชิงสัดส่วน



รูปที่ 8 การทดลองระบบควบคุมเชิงสัดส่วน

5. การอภิปรายและบทสรุป

จากการทดลองพบว่าในการควบคุมแบบเปิดปิด สถานะของการสั่นมีอยู่ 2 แบบ ทำให้ผู้ทดลองไม่สามารถที่จะควบคุมความเร็วได้เมื่อหมุนแขนใกล้ถึงตำแหน่งมุม 60 องศาได้ ส่งผลให้ค่าโอเวอร์ชูต ที่ได้จาก step response มีค่าค่อนข้างสูงซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลอง และเมื่อเปรียบเทียบ step response ของแบบจำลองพบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองไม่สามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ แต่

ผลตอบสนองของผู้ทดลองพบว่าสามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่เวลาเข้าที่ (settling time) เวลาประมาณ 5.2 วินาที ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากคนสามารถประมาณตำแหน่งมุมที่ต้องการเมื่อการสั่นเปลี่ยนด้าน ทำให้ผู้ทดลองสามารถปรับการหมุนของแขนจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัวในที่สุด และสาเหตุที่สมการแบบจำลองที่ไม่สามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้นั้นมาจากสมการแบบจำลองมีเวลาประวิงประกอบกับใช้ระบบควบคุมแบบเปิดปิดซึ่งทำให้การตอบสนองไม่ลู่เข้าสู่มุมที่ต้องการ

สำหรับการทดลองด้วยตัวควบคุมเชิงสัดส่วนโดยใช้ค่าอัตราขยาย $K_P = 2$ พบว่าผู้ทดลองสามารถรู้สึกถึงความถี่ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อหมุนแขนใกล้ถึงตำแหน่งมุม 60 องศา ทำให้สามารถควบคุมความเร็วในการหมุนแขน จึงส่งผลให้ค่าโอเวอร์ชูตที่ได้จาก step response มีค่าค่อนข้างต่ำ และเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองพบว่าสามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ และมีลักษณะใกล้เคียงกับผู้ทดลอง โดยมีเวลาเข้าที่ประมาณ 4 วินาที

จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกันของการทดลองทั้งสองพบว่า การควบคุมเชิงสัดส่วน ทำให้เวลาในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็วกว่าการควบคุมแบบเปิดปิด แต่ยังพบว่าช่วงเวลาเข้าที่ของการควบคุมแบบเชิงสัดส่วน ยังไม่ดีเท่าทีควร ซึ่งยังสามารถพัฒนาปรับปรุงระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพได้

การควบคุมการเคลื่อนที่ของมนุษย์ให้มีประสิทธิภาพได้นั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงรูปแบบสมการทางพลศาสตร์ ดังนั้นเมื่อต้องการควบคุมการเคลื่อนที่ของมนุษย์จึงจำเป็นต้องประมาณรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาให้มีความใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุด เพื่อใช้ในการออกแบบการควบคุมที่เหมาะสม โดยทำการทดลองเพื่อประมาณหาแบบจำลองเชิงเส้นของสมการพลศาสตร์ด้วยวิธีการตอบสนองเชิงความถี่ พบว่าแบบจำลองที่ได้อยู่ในรูปของสมการพลศาสตร์แบบเชิงเส้น ร่วมกับเวลาประวิง (delay time) โดยแบบจำลองนี้สามารถแทนสมการไม่เป็นเชิงเส้นได้ในระดับที่น่าพอใจ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Grigore C. Burdea, Force and touch feedback for virtual reality, Canana, pp.14 – 17, 1996

[2] Sunita Ram and Jennie Sharf, The People Sensor: A mobility Aid for the Visually Impaired, 1998

[3] Thomas P. Way and Kenneth E. Barner, Member, Automatic Visual to Tactile Translation, IEEE ,1997

[4] http://www.psychology.nottingham.ac.uk/staff/txl/c82per/lecture17.pdf

[5] Norman S. Nise, Control Systems Engineering, Prentice Hall, Inc , 3edition 2000

[6] Sunita Ram and Jennie Sharf, “The people sensor: A mobility aid for the visually impaired, IEEE, 1998

[7] http://www.itl.nist.gov/div895/isis/projects/brailleproject.html

[8] http://www.nytimes.com/2002/11/14/technology/circuits/14next.html

[9] K. Ogata, Modern Control Engineering, Prentice Hall, Inc , 3edition 1997

[10] Liang-Kuang Chen and A. Galip Ulsoy, Identification of a Driver Steering Model, and Model Uncertainly, From Driving Simulator Data, ASME, 2001

[11] Viboon Sangveraphunsiri, Control of Dynamics Systems, 1995

[12] Tom Pilutti and A. Galip Ulsoy, Identification of Driver State for Lane-Keeping Tasks, IEEE, 1999