

การออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนสำหรับหุ่นยนต์สการา โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ

Robust Control System Design for SCARA Robots using Quantitative Feedback Theory

ชวลิต นฤมิตรวรกุล¹ พีระยศ แสนโกชวี¹ และ วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย²

Chawalit Narumitbowornkul¹ Peerayot Sanposh¹ and Withit Chatlatanagulchai²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนสำหรับหุ่นยนต์สการา โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาและออกแบบตัวควบคุมของแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์สการา ซึ่งพบว่าระบบนั้นเป็นระบบหลายสัญญาณป้อนเข้าป้อนออก อีกทั้งยังเป็นระบบที่ไม่เชิงเส้นอีกด้วย จึงเป็นการยากที่จะสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำ เนื่องจากความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นของพลาเน็ต สิ่งรบกวนทางด้านเข้าและด้านออกของระบบ และสัญญาณรบกวนจากการวัด ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทน โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ และสามารถทำให้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่กำหนด โดยจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมนี้ด้วยผลการจำลองการควบคุมตำแหน่ง

ABSTRACT

This research presents a robust control system for a SCARA robot using quantitative feedback theory. To control 1st and 2nd link of SCARA Robot, we considerate and design controller. Also, the system of SCARA Robot are multi-input multi-output (MIMO) and non-linear. Therefore, it is difficult to find a mathematical model of the robot arm with accuracy, including plant uncertainty, plant-input and plant-output disturbance, and arising noise measurements. So, the durable design of control systems using quantitative feedback theory can be applied and given the demand response. The result demonstrates the effectiveness of this control system with simulation of the control position.

Key Word: SCARA robot, quantitative feedback theory, MIMO system, plant uncertainty

Email address: g521450091@ku.ac.th

ห้องปฏิบัติการวิจัยทางด้านแมคคาทรอนิกส์ หุ่นยนต์และการควบคุมชาญฉลาด ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹Intelligent Mechatronics Robotic and Control Research (IMARC) Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 50 Ngam Wong Wan Rd, Ladyaow, Chatuchuck, Bangkok 10900, Thailand

²ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.เกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

²Control of Robot and Vibration Laboratory (CRV Lab), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

คำนำ

ในปัจจุบันนี้หุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญต่อมนุษย์ อาทิเช่น โรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการผลิตและประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อช่วยประหยัดเวลา และเพิ่มปริมาณในการผลิตให้ทันต่อความต้องการของตลาด ดังนั้นในการศึกษาการควบคุมระบบของหุ่นยนต์นั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรกระทำเพื่อรองรับเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์ในอนาคต ซึ่งจะมีระบบพลวัตที่สลับซับซ้อน ดังนั้นแล้วจึงเป็นการยากในการที่จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องและแม่นยำ นอกจากนี้ระบบการควบคุมของหุ่นยนต์ต้องมีสมรรถนะสูงและจะต้องทนทานต่อความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของพลาเน็ต รวมไปถึงสิ่งรบกวนที่เข้ามาถึงจุดต่างๆของระบบได้ เพราะฉะนั้นแล้วการออกแบบระบบควบคุมจึงจำเป็นต้องนำเอาสิ่งต่างๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้มาพิจารณา เพื่อให้ตัวควบคุมสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ จึงจะทำให้ระบบนั้นมีประสิทธิภาพ แต่ก็ทำให้ปัญหาการออกแบบมีความซับซ้อนมากขึ้น (วโรดม, 2550)

จากการศึกษาพบว่า การออกแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative Feedback Theory – QFT) มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เพราะไม่ได้ต้องการความแม่นยำของพลาเน็ตที่สูงมาก แต่จะออกแบบจากเซตของค่าความไม่แน่นอนของพลาเน็ต โดยผู้ที่คิดค้นและพัฒนาทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ คือ Professor Isaac Horowitz ในปี ค.ศ. 1960 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์และออกแบบทางด้านโดเมนความถี่ โดยจะออกแบบบนแผนภาพนิโคลส์ (Nichols Chart) และมีงานวิจัยหลายงานที่ได้นำทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม เช่น การนำเอาทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของระบบควบคุมการบิน (Phillips et al., 1995) ระบบการควบคุมของกังหันลมขนาดใหญ่ (Houpis et al. 2006) เป็นต้น และในงานวิจัยก่อนหน้า (ชวลิต และ พิระยศ. 2554) ได้ทำการออกแบบกับหุ่นยนต์ก้านเดียวซึ่งเป็นแบบหนึ่งสัญญาณป้อนเข้าและหนึ่งสัญญาณป้อนออก (SISO)

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งแบบคงทนของหุ่นยนต์สกรู โดยจะทำการออกแบบตัวควบคุมในแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นแบบระบบหลายสัญญาณป้อนเข้าป้อนออก (MIMO) พร้อมทั้งแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมในแกนที่ 1 และแกนที่ 2

อุปกรณ์และวิธีการ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์สกรู

สมการเชิงพลวัตของหุ่นยนต์ 2 แกน (Noorbaksh and Yazdizadeh, 2010) ถูกกำหนดโดย

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) = \tau \quad (1)$$

โดยที่ $M(q)$ คือ เมทริกซ์ของมวล $V(q, \dot{q})$ คือ เมทริกซ์ของแรงเหวี่ยงและแรงโคริออลิส $G(q)$ คือ เวกเตอร์ในเทอมของแรงโน้มถ่วงของโลก และ $F(\dot{q})$ คือ แรงเสียดทาน

ซึ่งสมการลากรางจ์จะถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาหาสมการเชิงพลวัตของหุ่นยนต์ 2 แกน โดยรายละเอียดของสมการเชิงพลวัตแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะมีลักษณะดังสมการต่อไปนี้

$$[\theta_1 + 2\theta_2 \cos(q_2)]\ddot{q}_1 + [\theta_3 + \theta_2 \cos(q_2)]\ddot{q}_2 + F_1\dot{q}_1 = \tau_1 = u_1 \quad (2)$$

$$[\theta_2 + \theta_3 \cos(q_2)]\ddot{q}_1 + \theta_2\ddot{q}_2 + F_2\dot{q}_2 = \tau_2 = u_2 \quad (3)$$

โดยที่ F_i คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแกนที่ i , q_i คือมุมที่เกิดขึ้นของแกนที่ i โดยกำหนดให้เป็นเออาร์พุดของระบบ, τ_i คือแรงบิดของมอเตอร์ของแกนที่ i โดยกำหนดให้ u_i เป็นอินพุตของระบบ และกำหนดให้

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= I_1 + I_2 + m_1 x_1^2 + m_2 (l_1^2 + x_2^2) \\ \theta_2 &= m_2 l_1 x_2 \\ \theta_3 &= I_2 + m_2 x_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

โดยที่ I_i คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของแกนที่ i , m_i คือ มวลของแกนที่ i , l_i คือ ความยาวของแกนที่ i และ x_i คือ ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของแกนที่ i

จากสมการไม่เป็นเชิงเส้น (2) และ (3) สามารถประมาณให้เป็นเชิงเส้น รอบจุดสมดุล (0,0) และสามารถหาองค์ประกอบของพลาเน็ต P จากสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น ซึ่งกำหนดโดย

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$p_{11}(s) = \frac{\theta_2 s + F_2}{s\beta(s)} \quad (6)$$

$$p_{12}(s) = \frac{-(\theta_3 + \theta_2 h)}{\beta(s)} \quad (7)$$

$$p_{21}(s) = \frac{-(\theta_3 + \theta_2 h)}{\beta(s)} \quad (8)$$

$$p_{22}(s) = \frac{(\theta_1 + 2\theta_2 h)s + F_1}{s\beta(s)} \quad (9)$$

โดย

$$\beta(s) = A_2 s^2 + A_1 s + A_0 \quad (10)$$

โดยมีสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= \theta_3 (\theta_1 + 2\theta_2) - (\theta_3 + \theta_2 h)^2 \\ A_1 &= \theta_3 F_1 + F_2 (\theta_1 + 2\theta_2 h) \\ A_0 &= F_1 F_2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

และค่าพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์สการา (Garcia et al., 2002) จะแสดงไว้ใน Table 1

Table 1 SCARA robot parameter

Parameter	Nominal value	Minimum value	Maximum value
m_1	15 kg	12 kg	18 kg
m_2	12 kg	9 kg	15 kg
I_1	0.23 kgm ²	-	-
I_2	0.16 kgm ²	-	-
l_1	0.25 m	-	-
l_2	0.25 m	-	-
x_1	0.125 m	-	-
x_2	0.125 m	-	-
F_1	2.99 s/rad	0.89 s/rad	5.08 s/rad
F_2	0.69 s/rad	0.155 s/rad	1.225 s/rad

การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง

ในการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทนด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณนั้น มีขั้นตอนหลักในการออกแบบ 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นที่ 1 คือ กำหนดคุณลักษณะของระบบตามที่ต้องการ ขั้นที่ 2 คือ การสร้างแผ่นแบบพลาเน็ต (plant template) ที่เกิดจากเซตของค่าความไม่แน่นอนของพลาเน็ตบนความถี่ที่สนใจ พร้อมทั้งเลือกนอมินัลพลาเน็ต (nominal plant) เพื่อใช้เป็นพลาเน็ตในการออกแบบตัวควบคุม ขั้นที่ 3 คือ การออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง โดยในการออกแบบระบบควบคุมจะทำการพิจารณาระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ดัง Figure 1 ซึ่งประกอบด้วย P คือ พลาเน็ตที่ประกอบด้วยเซต \mathcal{P} ซึ่งครอบคลุมค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นทั้งหมด, G คือ ตัวควบคุม, F คือ ตัวกรองของระบบ, H คือ เซนเซอร์, R คือ สัญญาณอินพุตอ้างอิง, E คือ ค่าความผิดพลาด, U คือ สัญญาณตัวควบคุม, Y คือ สัญญาณขาออกของระบบ, N คือ สัญญาณรบกวนจากการวัด, D_i คือ ค่าของสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ, D_o คือ ค่าของสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ

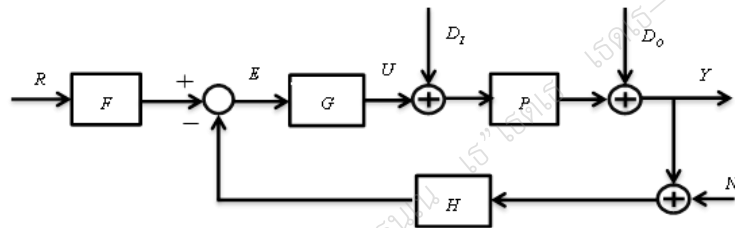


Figure 1 Feedback control system configuration

ในการสร้างขอบเขตตามทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณเพื่อออกแบบระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพตามที่ต้องการนั้น จะพิจารณาสมการที่ได้จากบล็อกไดอะแกรมของ Figure 1 และจะออกแบบทางด้านโดเมนความถี่ (Craig et al, 2003) ดังนี้

1. ขอบเขตส่วนเผื่อเสถียรภาพของระบบ

$$\left| \frac{Y}{R} \right| = \left| F \frac{PG}{1+PGH} \right| \leq W_{s_1} \quad (12)$$

2. การจำกัดสัญญาณของสิ่งรบกวนด้านเข้าของระบบ

$$\left| \frac{Y}{D_i} \right| = \left| \frac{P}{1+PGH} \right| \leq W_{D_i} \quad (13)$$

3. การจำกัดสัญญาณของสิ่งรบกวนด้านออกของระบบ

$$\left| \frac{Y}{D_o} \right| = \left| \frac{1}{1+PGH} \right| \leq W_{D_o} \quad (14)$$

4. ขอบเขตการติดตาม

$$W_{low} \leq \left| F \frac{PG}{1+PGH} \right| \leq W_{up} \quad (15)$$

5. การจำกัดสัญญาณรบกวนจากการวัด

$$\left| \frac{Y}{N} \right| = \left| \frac{-PG}{1+PGH} \right| \leq W_N \quad (16)$$

โดยที่ W_{s_1} คือ ขอบเขตส่วนเผื่อเสถียรภาพ, W_{D_i} คือ ปริมาณของขอบเขตที่ใช้ในการจำกัดสิ่งรบกวนทางด้านเข้าของระบบ, W_{D_o} คือ ปริมาณของขอบเขตที่ใช้ในการจำกัดสิ่งรบกวนทางด้านออกของระบบ, W_{up} คือ ค่าขอบเขตบน, W_{low} คือ ค่าขอบเขตล่าง, W_N คือ ค่าขอบเขตของสัญญาณรบกวน

ในการออกแบบตัวควบคุม แผ่นแบบพลาเน็ตจะถูกนำมาใช้ร่วมกับขอบเขตที่กำหนดตามทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ เพื่อให้มีความสอดคล้องกันและจะเลือกนอมนัลพลาเน็ต P_0 จากเซตของความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ของพลาเน็ต เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุม G ที่จะทำให้ได้วงนอมนัล (nominal loop) $L_0 = GP_0$ มีคุณลักษณะและประสิทธิภาพตามที่ต้องการ โดยในการออกแบบนั้นจะนำฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นฐานมาใช้งาน และในบทความนี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมทั้งหมดบนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ QFT Control Design Toolbox

การออกแบบตัวควบคุมของหุ่นยนต์สกรานั้นจะออกแบบเพื่อให้มีความสอดคล้องกับคุณลักษณะดังนี้
ข้อกำหนดเสถียรภาพ: ส่วนเฟื่อเกนอย่างน้อย 1.833 (5.26 dB) และมีส่วนเฟื่อเฟสอย่างน้อย 50°

ข้อกำหนดสมรรถนะ: ค่าพุ่งเกินน้อยกว่า 10% และค่าเวลาเข้าที่น้อยกว่า 5 วินาที

จากข้อกำหนดสมรรถนะสามารถคำนวณหาค่านวนหาฟังก์ชันถ่ายโอนของขอบเขตบนและขอบเขตล่างได้ดังสมการที่ (17) และ (18) ตามลำดับ

$$W_{up} = \frac{0.5862(s+10)}{s^2 + 4s + 5.862} \quad (17)$$

$$W_{low} = \frac{1.256}{(s^2 + 2s + 1.256)(s+10)} \quad (18)$$

โดยในการออกแบบการระบบควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์สกรานั้น เนื่องจากเป็นระบบระบบหลายสัญญาณป้อนเข้าป้อนออก หลักการโดยทั่วไปยังคงสามารถใช้หลักการพื้นฐาน เพียงแต่อาจจะมีขั้วซ้อนมากยิ่งขึ้น ในระบบ MIMO ถ้าหากว่าเมทริกซ์ถ่ายโอน $P(s)$ ไม่ได้มีค่าแต่เฉพาะสมาชิกในแนวทแยงมุมหมายความว่าระบบจะมีการเชื่อมต่อกันระหว่างแกนแนล อาจจะทำให้การออกแบบตัวควบคุมในแต่ละแกนแนลเป็นอิสระต่อกันสามารถได้ระบบป้อนกลับที่มีคุณสมบัติที่ดี การออกแบบจะทำการออกแบบทีละแกนแนลและทำการปิดวงป้อนกลับแกนแนลที่ออกแบบแล้ว ก่อนที่จะออกแบบแกนแนลต่อไป วิธีการนี้เรียกว่า "การปิดวงโดยลำดับ" (Sequential loop closure) การออกแบบที่ง่ายที่สุดสำหรับระบบ MIMO คือทำการแบ่งระบบออกเป็นระบบ SISO แล้วทำการออกแบบทีละวง ดัง Figure 2 แสดงให้เห็นว่าจะเริ่มทำการออกแบบตัวควบคุม $G_1(s)$ สำหรับวงที่หนึ่งก่อนแล้วทำการปิดวงที่หนึ่ง ก่อนที่จะทำการออกแบบตัวควบคุม $G_2(s)$ ถ้าหากว่า $P(s)$ มีการเชื่อมต่อกันระหว่างวงที่หนึ่งและสอง ผลกระทบจากการเชื่อมต่อนั้นจะปรากฏในฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งหมดที่ต่ออนุกรมกับตัวควบคุม $G_2(s)$ ขณะที่ทำการออกแบบสำหรับวงที่สองหลังจากนั้นทำการปิดวงที่สอง และทำการออกแบบตัวควบคุม $G_3(s)$ ทำเช่นนั้นจนครบทั้งหมด ลักษณะของตัวควบคุมเมื่อทำการรวมเข้าเป็นเมทริกซ์ถ่ายโอนจะมีค่าแต่เฉพาะสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมของเมทริกซ์ เรียกตัวควบคุมแบบนี้ว่า "ตัวควบคุมทแยงมุม" (Diagonal controller) ลักษณะ Figure 2 (ขวา) ซึ่งแตกต่างจากกรณีทั่วไป ที่ตัวควบคุมจะเป็นระบบ MIMO ดัง Figure 2 (ซ้าย) ซึ่งอยู่ในรูปเมทริกซ์ถ่ายโอนที่สามารถมีสมาชิกอื่นนอกเหนือจากแนวเส้นทแยงมุมได้

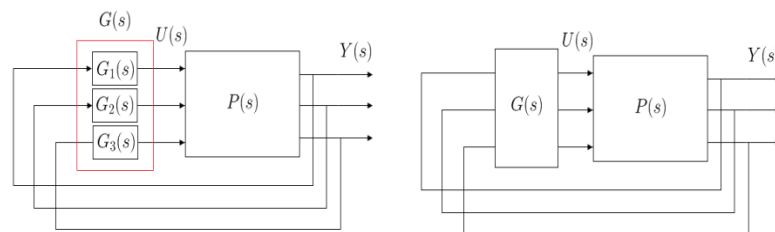


Figure 2 Diagonal MIMO controller (left) and general MIMO controller (right)

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองเพื่อให้มีลักษณะสอดคล้องกับคุณสมบัติที่กำหนดแล้วและจะออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองโดยการพิจารณาระบบวงปิดซึ่งมีลักษณะดัง Figure 3

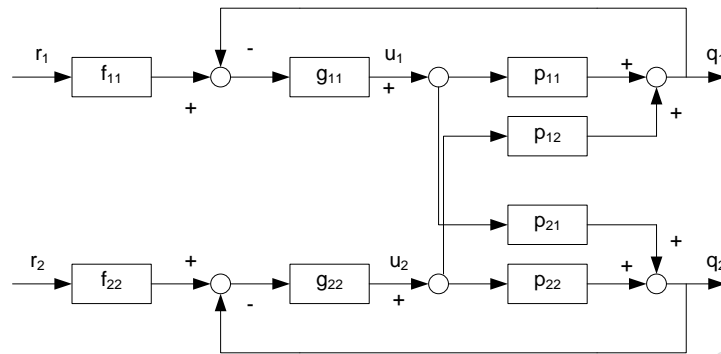


Figure 3 Diagonal closed-loop controller for two-input two-output system

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองในวงที่ 1 (g_{11} กับ f_{11}) เป็นลำดับแรกและตามด้วยการวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองในวงที่ 2 (g_{22} กับ f_{22}) เป็นลำดับถัดไป ซึ่งผลที่ได้หลังจากออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองในวงที่ 1 จะเป็นดังสมการที่ (19) และ (20) และมีลักษณะหลังการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองดัง Figure 4 และ 5

$$g_{11} = \frac{1.211s^3 + 17.14s^2 + 61.29s + 31.5}{0.001339s^3 + 0.06046s^2 + 1.044s + 1} \quad (19)$$

$$f_{11} = \frac{1}{0.04726s^2 + 0.6724s + 1} \quad (20)$$

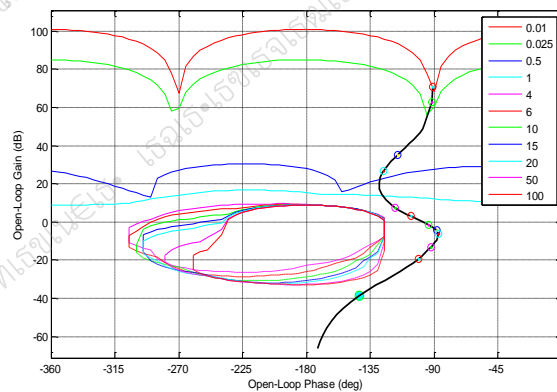


Figure 4 Nichols chart after g_{11} controller design

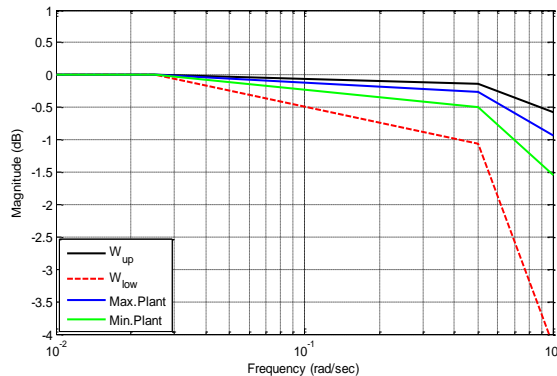


Figure 5 Bode plot after f_{11} controller design

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองในวงที่ 1 เรียบร้อยแล้วก็จะทำการออกแบบตัวควบคุมของวงที่ 2 ซึ่งผลที่ได้หลังการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรองก็จะมีลักษณะดัง Figure 6 และ 7 แล้วจึงจะ ได้สมการของตัวควบคุมและตัวกรองซึ่งจะมีลักษณะดังสมการที่ (21) และ (22) ตามลำดับ

$$g_{22} = \frac{0.04879s^2 + 3.669s + 32.35}{7.577 \times 10^{-5}s^2 + 0.04212s + 1} \quad (21)$$

$$f_{22} = \frac{1}{0.263s^2 + 1.077s + 1} \quad (22)$$

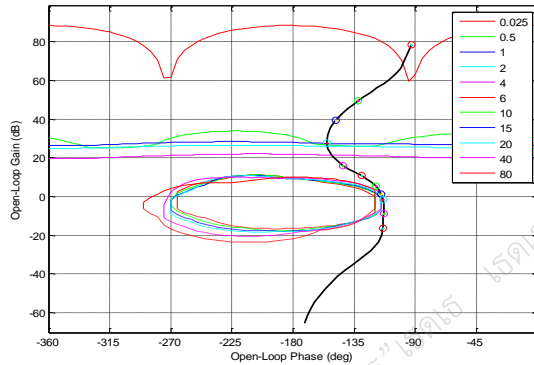


Figure 6 Nichols chart after g_{22} controller design

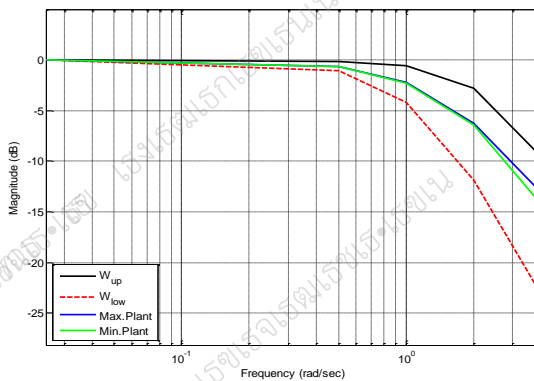


Figure 7 Bode plot after f_{22} controller design

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองจำลองระบบการทำงานของระบบควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์ โดยกำหนดให้ แกนที่ 1 (q_1) เคลื่อนที่เป็นมุม 10 องศา และแกนที่ 2 (q_2) เคลื่อนที่เป็นมุม 45 องศา ซึ่งทำการจำลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าน้อยที่สุด ค่าเฉลี่ยและค่าที่มากที่สุด ตามลำดับ

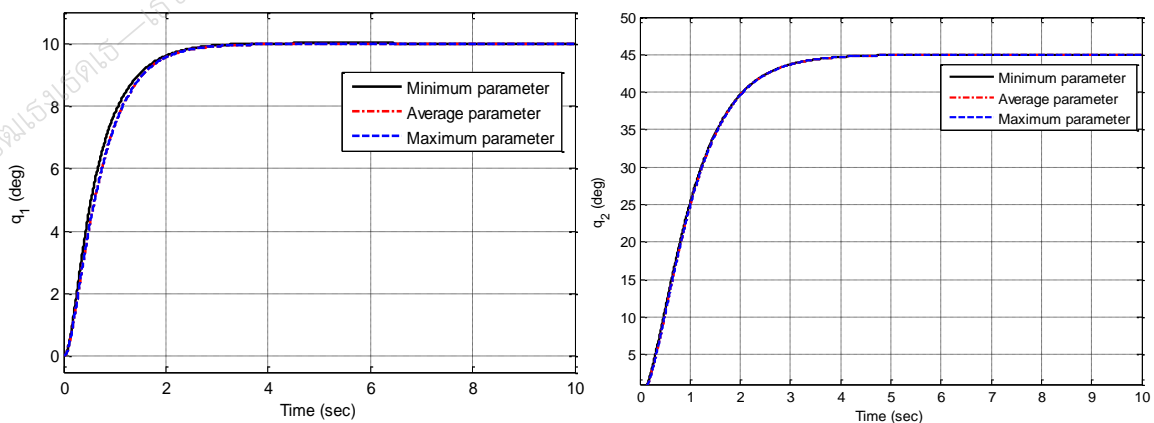


Figure 8 Simulation results of the first link (q_1) (left) and of the second link (q_2) (right)

จากผลการทดลองใน Figure 8 จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองการทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองแกนนั้นสามารถทำงานได้ตามที่กำหนดทุกประการ และสามารถเอาชนะความไม่แน่นอนของระบบที่เกิดจาก ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นของพลาเน็ตได้

สรุป

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่ถูกออกแบบ โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ศกการา จุดเด่นประการสำคัญของทฤษฎีนี้ คือ การที่สามารถเอาชนะความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นได้ เพราะนวัตกรรมสมัยใหม่มีวิวัฒนาการที่ก้าวหน้ามากขึ้น ย่อมเป็นการยากที่จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องและแม่นยำ และสิ่งที่สำคัญอีกประการ คือ การออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีนี้มีความยุ่งยากและซับซ้อนน้อยมาก เพราะมีสมการคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ค่อนข้างน้อย แต่จะเน้นไปในทางปฏิบัติ ซึ่งสามารถนำทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในงานอุตสาหกรรมต่อไป และจะทำการออกแบบและเปรียบเทียบกับทฤษฎีของการควบคุมแบบอื่นในงานวิจัยถัดไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท Terasoft จำกัด ที่ให้นำ QFT Control Design Toolbox Evaluation Version สำหรับใช้กับโปรแกรม MATLAB และขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย เลขที่ทุน IUG5280005 ที่ส่งเสริมการทำโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

ชวลิต นฤมิตรวรกุล และ พีระยศ แสนโกชวี. 2554. การควบคุมตำแหน่งแบบคงทนของแขนหุ่นยนต์ก้านเดียวที่มีค่าความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ. **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34** วันที่ 30 พฤศจิกายน-2 ธันวาคม พ.ศ.2554, โรงแรมแอมบาสเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน จ.ชลบุรี, หน้า 789-792

วโรตม ตูจันดา. 2550. **การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมทางวิศวกรรมศาสตร์**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Craig, B., Y. Chait and O. Yaniv. 2003. The QFT Frequency Domain Control Design Toolbox For Use with MATLAB. Terasoft Inc.

Garcia, A., E. R. De Pieri., and R. Guenther. 2002. Experimental study applied to an industrial robot by using variable structure controllers and friction compensation. **J. Braz. Soc. Mech. Sci.** vol.24

Houpis, C.H., S.J. Rasmussen and M. Gracia-Sanz. 2005. Quantitative Feedback theory: Fundamentals and Applications. **CRC Press**. United State of America.

Noorbakhsh, M. and A. Yazdizadeh. 2010. Adaptive Friction Compensation in a Two-Link Planar Robot Manipulator Using a New Lyapunov-Based Controller. **IEEE International Conference on Control and Automation**. Xiamen China .

Philips, S., M. Pachter and C.H. Houpis. 1995. A QFT Subsonic Envelope Flight Control System Design. **National Aerospace Electronics Conference (NAECON)**. Dayton, OH, May 1995.