

การควบคุมตำแหน่งของตัวกระตุ้นเชิงเส้นอิงทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ

The Position Control of Linear Actuator Based on Quantitative Feedback Theory

กิตติพงษ์ พุ่มโฆษา¹ และ ภูวดล โพธิ์แดง^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

² ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องจักรกลอัจฉริยะและเทคโนโลยีหุ่นยนต์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ศาลายา นครปฐม 73170

*ติดต่อ: puwadon.poe@rmutr.ac.th, 06 4564 1932

บทคัดย่อ

ตัวกระตุ้นเชิงเส้น (linear actuator) ประกอบด้วยชุดขับเคลื่อนแบบบอลสกรูและเซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่พบมากในระบบอัตโนมัติ และ เครื่องจักรซีเอ็นซี การควบคุมตำแหน่งของตัวกระตุ้นเชิงเส้นโดยทั่วไปจะใช้เทคนิคการควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) ข้อจำกัดของเทคนิคดังกล่าวคือสามารถใช้งานได้กับระบบที่มีค่าความไม่แน่นอนที่ไม่สูงมาก (Uncertainty) นั่นคือถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงตัวควบคุมเดิมจะไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยได้ใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณมาทดแทนตัวควบคุมแบบพีไอดี เนื่องจากทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณสามารถทนทานต่อความไม่แน่นอนของระบบได้ดี สามารถเพิ่มคุณสมบัติของตัวควบคุม เช่น คุณสมบัติด้านการลดสิ่งรบกวนภายในระบบ และคุณสมบัติด้านการลดสิ่งรบกวนภายนอก ระบบ คุณสมบัติการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิง เป็นต้น ส่งผลให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่ทำการออกแบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในด้านการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิง และลดสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาออกของระบบ เมื่อให้ระบบเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงแบบคลื่นรูปสี่เหลี่ยมพบว่า ระบบควบคุมที่นำเสนอมีความผิดพลาดน้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีถึง 12.21 เปอร์เซ็นต์

คำหลัก: ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ; เทคนิคควเอฟที; ตัวขับเคลื่อนแบบบอลสกรู

Abstract

The linear actuator consists of a ball screw driver and a servo motor which is a component of automation and CNC machines. The position control of linear actuator generally uses a PID controller. The limitation of a PID controller is work well with less plant uncertainty, that if the plant has changed, the original controller will work inefficacy. To prevent this problem, Quantitative feedback theory used to handle plant uncertainty. It can be improved efficiency of the controller by formulate frequency domain specification such as plant input disturbance rejection, plant output disturbance rejection tracking. Experimental results indicate that the control system is very effective.in tracking the reference signal and reducing the disturbance at plant output. When setting the reference signal is a square wave.

The steady state error of the propose method is reduced about 12.21% when compared with PID controller

Keywords: Quantitative feedback theory; QFT; Ball screw driver

1. บทนำ

การควบคุมตัวกระตุ้นเชิงเส้นประกอบด้วยชุดขับเคลื่อนแบบบอลสกรูและเซอร์โวมอเตอร์แบบกระแสตรง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่พบมากในระบบอัตโนมัติ และ เครื่องจักรซีเอ็นซี การควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ส่วนมากใช้ตัวควบคุมแบบพีโอดี [1] และมีบางส่วนที่พัฒนาตัว Stepping motor ให้ใช้งานร่วมกับ Position sensor เพื่อป้อนกลับตำแหน่งที่ถูกต้องในการทำงาน [2]

เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมแบบพีโอดีสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือแบบที่ต้องใช้แบบจำลอง [3] และแบบการปรับจูนค่า ในกรณีที่ใช้แบบจำลอง สามารถออกแบบตัวควบคุมพีโอดีให้มีความทนทาน (Robustness) ต่อความไม่แน่นอนของระบบได้ แต่ต้องใช้กระบวนการแบบ Optimization ซึ่งมีความซับซ้อน ต่างจากตัวควบคุมแบบพีโอดีที่ใช้วิธีการปรับจูน วิธีการดังกล่าวสามารถทำได้ง่าย และต้องทำการปรับจูนเฉพาะสภาวะการทำงานที่คงที่ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงหรือติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมในระบบ ตัวควบคุมดังกล่าวจะไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ นั่นคือไม่มีความทนทานต่อความไม่แน่นอนของระบบ

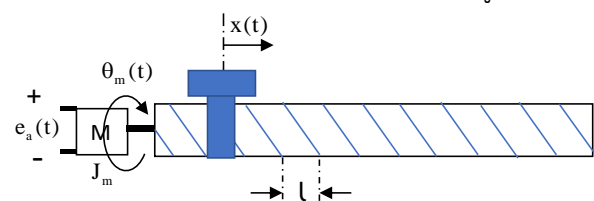
เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความทนทานในการทำงานของตัวกระตุ้นเชิงเส้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบจากทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ หรือเทคนิคคิวเอฟที ทฤษฎีดังกล่าวเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถกำหนดคุณสมบัติของระบบได้ก่อนการออกแบบตัวควบคุม จึงสามารถออกแบบระบบควบคุมให้ทำงานได้ทุกสภาวะความไม่แน่นอนของระบบ ส่งผลให้เทคนิคคิวเอฟทีมีทั้งความทนทาน ความมีเสถียรภาพ และประสิทธิภาพการทำงาน

ที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้งานเทคนิคดังกล่าวค่อนข้างแพร่หลาย [4-5]

เนื้อหาในส่วนของ 2 ของงานวิจัยนี้แสดงวิธีการหาแบบจำลองของระบบพลวัต การหาเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) และอธิบายพื้นฐานของเทคนิคคิวเอฟที ส่วนที่ 3 แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมด้วยเทคนิคคิวเอฟที ส่วนที่ 4 แสดงผลการจำลองเปรียบเทียบการทำงานระหว่างตัวควบคุมแบบคิวเอฟทีและแบบพีโอดีในกรณีที่ระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนสุดท้ายคือสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

2. แบบจำลองของระบบพลวัต

แบบจำลองของระบบตัวกระตุ้นเชิงเส้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเซอร์โวมอเตอร์แบบกระแสตรงขนาด 24 V อัตราทดเกียร์ 1:32 ทำการขับเคลื่อนชุดบอลสกรู (Ball screw) เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ระยะช่วงเกลียว (Pitch) 2 mm และมีความยาว 500 mm แสดงได้ตามรูปที่ 1 หลักการทำงานคือเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นแบบเชิงเส้น เมื่อ J_m คือโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ θ_m คือมุมของมอเตอร์ที่หมุนมีหน่วยเป็นเรเดียน (rad) ตัว $e_a(t)$ คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ $x(t)$ คือการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นมีหน่วยเป็น mm และ l คือระยะระยะช่วงเกลียวของตัวบอลสกรู



รูปที่ 1 แสดงตัวกระตุ้นเชิงเส้นที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อพิจารณาไดอะแกรมทางไฟฟ้าของมอเตอร์กระแสตรงสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2(ก) วงจรไฟฟ้าใน

ตัวมอเตอร์ [6] ซึ่งประกอบด้วย R_a คือค่าความต้านทานในขดลวด L_a คือค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า $i_a(t)$ คือกระแสไฟฟ้าในขดลวด $V_b(t)$ คือค่าความต่างศักย์ที่เกิดจาก Back emf $T_m(t)$ คือค่าทอร์กที่มอเตอร์สร้างขึ้น และ D_m คือค่า Viscous damper ของมอเตอร์

ค่าความต่างศักย์ที่เกิดจาก Back emf สามารถแสดงได้ตามสมการที่ (1) เมื่อ K_b คือค่าคงที่ของ Back emf ซึ่งค่าความต่างศักย์ดังกล่าวแปรผันตามความเร็วรอบของมอเตอร์

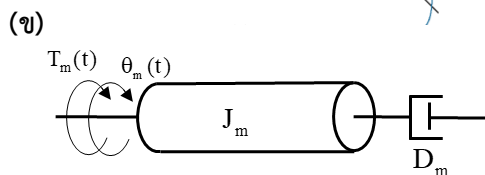
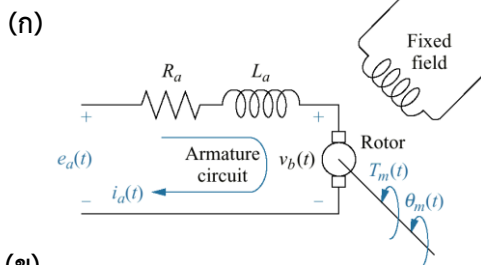
$$V_b(t) = K_b \frac{d(\theta_m(t))}{dt} \quad (1)$$

ขนาดของค่าทอร์กที่มอเตอร์สร้างขึ้นแปรผันตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าตามสมการที่ (2) เมื่อ K_t คือค่าคงที่ของปริมาณทอร์กของมอเตอร์

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (2)$$

คุณสมบัติของวงจรไฟฟ้าในมอเตอร์กระแสตรงตามรูปที่ 2(ก) สามารถเขียนได้เป็นสมการที่ (3) ส่วนของ

$$R_a i_a(t) + L_a \frac{d(i_a(t))}{dt} + K_b \frac{d(\theta_m)}{dt} = e_a(t) \quad (3)$$



รูปที่ 2 แสดงไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรง

2(ก) แสดงวงจรไฟฟ้าในตัวมอเตอร์ [6]

2(ข) แสดง Mechanical load ภายในมอเตอร์

ภาระโหลดทางกลในมอเตอร์ตามรูปที่ 2(ข) แสดงได้ในสมการที่ (4) ซึ่งประกอบด้วยโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และตัวหน่วงแบบ Viscous damper

$$T_m(t) = J_m \frac{d^2(\theta_m(t))}{dt} + D_m \frac{d(\theta_m(t))}{dt} \quad (4)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (2) (3) และ (4) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง มุมของโรเตอร์และความต่างศักย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ จากนั้นทำการแปลงลาปลาซ (Laplace transformation) สามารถจัดรูปได้ตามสมการที่ (5) ต่อมาทำการเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น [7] พิจารณาจากรูปที่ 1 ได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (6) เมื่อ l คือระยะช่วงเกลียว $x(t)$ คือระยะเชิงเส้น $\theta_m(t)$ คือมุมของโรเตอร์

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t}{(J_m s^2 + D_m s)(R_a + L_a s) + K_b K_t s} \quad (5)$$

$$x(t) = \frac{l}{2\pi} \theta_m(t) \quad (6)$$

ทำการจัดรูปสมการเพื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์และระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นได้ตามสมการที่ (7) เมื่อ $k = (K_t l / 2\pi)$ $A = J_m L_a$ $B = (J_m R_a + D_m L_a)$ และ $C = (D_m R_a + K_b K_t)$ จากนั้นนำสมการที่ (7) สู่ขั้นตอนการหาเอกลักษณ์ของระบบ (System identification)

$$\frac{X(s)}{E_a(s)} = \frac{\left(\frac{k}{A}\right)}{s \left(s^2 + \frac{B}{A} s + \frac{C}{A} \right)} \quad (7)$$

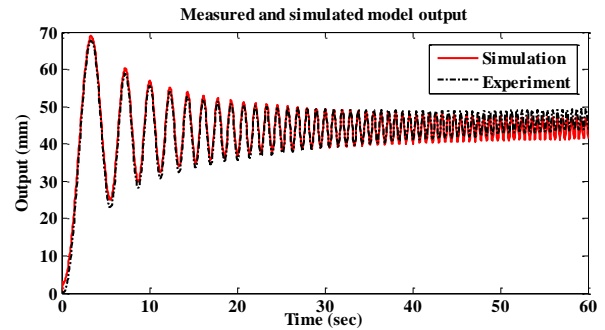
2.1 การหาเอกลักษณ์ของระบบ

การหาเอกลักษณ์ของระบบเป็นการหาแบบจำลองของระบบจริงตามรูปที่ 3 เมื่อ 3(ก) คือชุดบอลสกรูที่ต่อกับเซอร์โวมอเตอร์ 3(ข) แสดงการเชื่อมต่อเซ็นเซอร์แบบ Encoder เข้าสู่ DAQ card ของบริษัทเนชั่นแนลอินทราเม็นรู่น USB 6343 การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ใช้สัญญาณแบบ Analog output ขนาด 0-5 VDC ควบคุมผ่านวงจรขยายสัญญาณ (Power amplifier) ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 VDC จากแหล่งจ่ายไฟ (Power supply)

ขั้นตอนการหาเอกลักษณ์ของระบบคือทำการป้อนสัญญาณอินพุตตามรูปที่ 4(ข) ส่งสัญญาณแบบ Chirp signal ที่แอมพลิจูด ± 2 VDC ที่ความถี่ตั้งแต่ 0.1 Hz จนถึง 1.0 Hz ในระยะเวลา 60 วินาที เพื่อกระตุ้นระบบให้ครอบคลุมการทำงานมากที่สุด ค่าเอาต์พุตที่ได้มี

ลักษณะตามรูปที่ 4(ก) มีหน่วยเป็น mm ทำการทดลองซ้ำทั้งหมดประมาณ 20 ครั้งเพื่อหาค่าความไม่แน่นอน

จากการหาเอกลักษณ์ของระบบพบว่าค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรในสมการที่ (7) แสดงได้ตามสมการที่ (8) โดยที่ $D=(k/A)$ $E=(B/A)$ และ $F=(C/A)$ ค่าความแม่นยำของแบบจำลองมีค่าเฉลี่ยที่ 80.23 %



รูปที่ 5 แสดงความแม่นยำของแบบจำลอง

$$\frac{X(s)}{E_a(s)} = \frac{D}{s(s^2 + Es + F)}$$

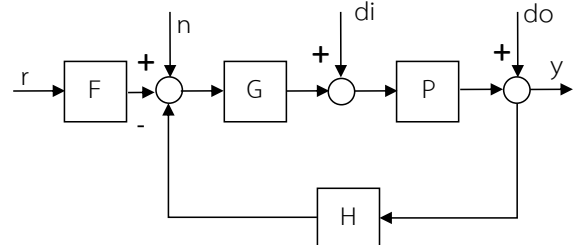
$$D = [26,675 \ 30,494] \quad (8)$$

$$E = [23.26 \ 27.01]$$

$$F = [1652 \ 1883]$$

2.2. พื้นฐานทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ

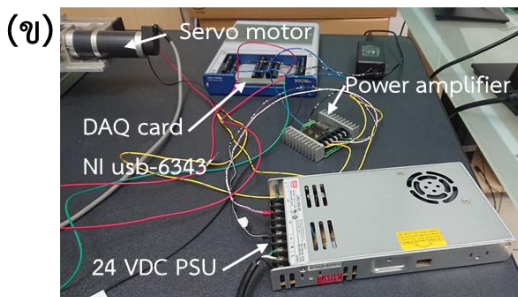
ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative feedback theory) หรือเทคนิคคิวเอฟที่ถูกคิดค้นโดย Horowitz ในปี ค.ศ.1963 [8] การออกแบบระบบควบคุมจะทำในโดเมนเชิงความถี่ (Frequency domain)



รูปที่ 6 แสดง Block diagram ของระบบควบคุม

ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมด้วยเทคนิคคิวเอฟที่สามารถแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน โดยอาศัยโดเมนตามรูปที่ 6 มีลักษณะเป็น Single input single output, SISO เมื่อ G คือตัวควบคุม P คือระบบพลวัต H คือเซ็นเซอร์ F คือตัวกรอง r คือสัญญาณอ้างอิง y คือเอาต์พุต n คือสัญญาณรบกวน di คือสัญญาณรบกวนที่อินพุตของระบบ do คือสัญญาณรบกวนที่เอาต์พุตของระบบ ขั้นตอนการออกแบบสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. กำหนดคุณสมบัติระบบในโดเมนเชิงเวลา เทคนิคคิวเอฟที่สามารถกำหนดคุณสมบัติของระบบก่อนการออกแบบตัวควบคุม เช่นเวลาเข้าที่ (Settling time) ค่า

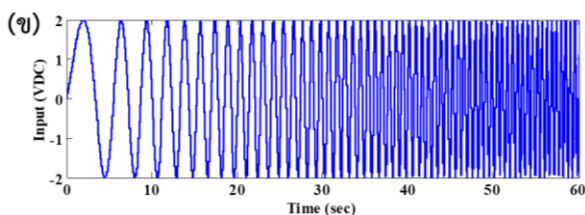
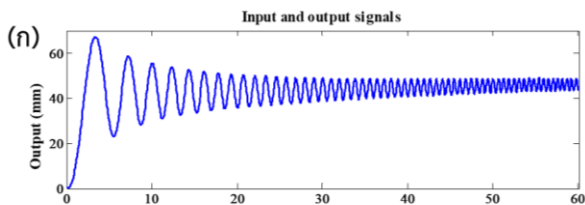


รูปที่ 3 การเตรียมอุปกรณ์

3(ก) การต่อชุดบอลสกรูกับเซอร์โวมอเตอร์

3(ข) การเชื่อมต่อเซ็นเซอร์และวงจรขยายสัญญาณเข้ากับ

DAQ card



รูปที่ 4 แสดงสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบ

4(ก) สัญญาณเอาต์พุตเชิงเส้นของระบบ

4(ข) สัญญาณอินพุตของระบบ

พุ่งเกิน (Overshoot) และค่าความมีเสถียรภาพของระบบ เป็นต้น

2. การสร้าง Plant template เนื่องจากตัวควบคุมถูกออกแบบมาจากเซตความไม่แน่นอนของระบบที่เกิดจากขั้นตอนการหาเอกลักษณ์ของระบบ โดยที่ $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ จากนั้นนำ p_1, p_2 จนถึง p_n ไปกำหนดจุดบนแผนภูมินิโคลส์

3. ทำการสร้างขอบเขตในการออกแบบ โดยนำคุณสมบัติจากข้อที่ 1 เขียนอยู่ในโดเมนเชิงความถี่ ซึ่งปริมาณที่ต้องการในการออกแบบพิจารณาได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสองปริมาณที่สนใจได้ดังนี้

Plant output disturbance rejection

$$\left| \frac{y}{d_o} \right| = \left| \frac{1}{1 + PGH} \right| < \delta_{d_o}$$

Plant input disturbance rejection

$$\left| \frac{y}{d_i} \right| = \left| \frac{P}{1 + PGH} \right| < \delta_{d_i}$$

Model matching

$$\left| \frac{y}{r} - F_m \right| = \left| \frac{PGF}{1 + PGH} - F_m \right| < \delta_m$$

Tracking

$$\alpha < \left| \frac{1}{1 + PGH} \right| < \beta$$

Noise rejection

$$\left| \frac{y}{n} \right| = \left| \frac{PG}{1 + PGH} \right| < \delta_n$$

Control effort

$$\left| \frac{u}{n} \right| = \left| \frac{G}{1 + PGH} \right| < \delta_c$$

ขอบเขตในการออกแบบสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่มคือ กลุ่มในการลดสิ่งรบกวนของระบบ กำหนด δ_{d_i} และ δ_{d_o} กลุ่มคุณสมบัติในการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิง นั่นคือแบบ Model matching และแบบ Tracking โดยที่ F_m คือแบบจำลองที่ต้องการให้เอาต์พุตระบบมีคุณสมบัติตามคุณสมบัติแบบ Tracking ค่า α และ β คือขอบเขตบนและขอบเขตล่างของระบบ เป็นการกำหนดให้เอาต์พุต

ของระบบอยู่ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ส่วนกลุ่มสุดท้ายเป็นขอบเขตพิเศษ เพื่อป้องกันไม่ให้ค่า Controller gain ของระบบสูงเกินไป

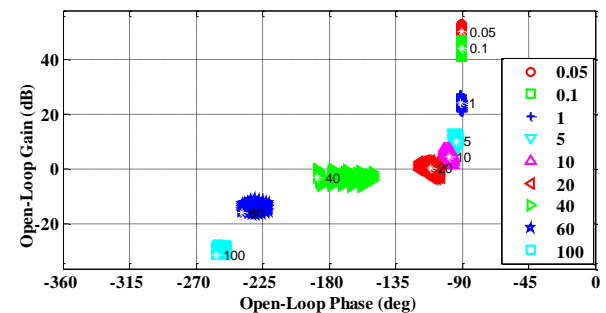
4. การออกแบบตัวควบคุม คือการจัดวงรอบสัญญาณ (Loop shaping) ของ Nominal plant ให้สอดคล้องกับขอบเขตทั้งหมดที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 3

5. ในกรณีที่ระบบเป็นแบบสององศาอิสระต้องทำการออกแบบตัวกรอง F ซึ่งตัวกรองดังกล่าวทำงานแบบ Feed-forward เพื่อเสริมประสิทธิภาพในด้านการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิง ซึ่งทุกขั้นตอนในการออกแบบจะใช้โปรแกรมเสริมของ MATLAB [9]

3. การออกแบบระบบควบคุม

3.1 การสร้าง Plant template

การสร้าง Plant template จะสร้างจากแบบจำลองที่มีความไม่แน่นอนจากสมการที่ (8) กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น $\pm 10\%$ ความถี่ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมมี 9 ความถี่ คือ 0.05 0.1 1.0 5.0 10 20 40 60 และ 100 rad/sec แสดงได้ตามรูปที่ 7 ซึ่งแต่ละความถี่จะมีความไม่แน่นอนของระบบ 125 กรณี



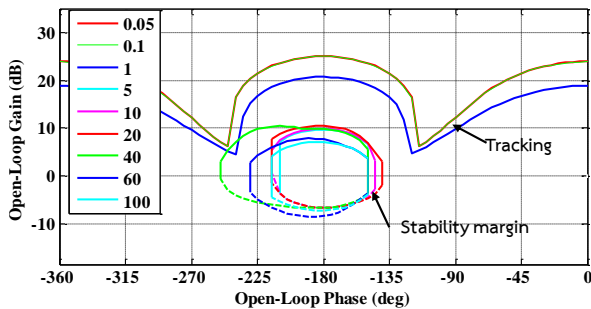
รูปที่ 7 แสดง Plant template ของระบบ

3.2 การกำหนดคุณสมบัติและการสร้างขอบเขต

คุณสมบัติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้มี 2 แบบ 1. คุณสมบัติด้านการลดสัญญาณรบกวน นั่นคือคุณสมบัติด้านความมีเสถียรภาพของระบบ กำหนดให้ขนาด Gain margin มีค่าประมาณ 5.28 dB และ Phase margin มีค่าประมาณ 45 องศา 2. คุณสมบัติด้านการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิง (Tracking) กำหนดให้ขอบเขตบนมีค่าพุ่งเกิน อยู่

ที่ไม่เกิน 5 % เวลาเข้าที่มีค่าไม่เกิน 0.514 วินาที และค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่ +2% ขอบเขตล่างมีลักษณะคล้ายขอบเขตบน คือไม่มีค่าพุ่งเกิน เวลาเข้าที่มีค่าไม่เกิน 1.14 วินาที และค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่ -2%

เมื่อทำการกำหนดคุณสมบัติของระบบได้แล้ว ต่อมาจะนำคุณสมบัติดังกล่าวมาเขียนเป็นขอบเขต เพื่อทำการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งขอบเขตที่ใช้แบ่งเป็น 2 แบบตามรูปที่ 8 โดยขอบเขตแบบ Tracking ใช้เฉพาะความถี่ต่ำ ส่วนแบบความถี่สูงเสถียรภาพของระบบจำเป็นต้องใช้ทุกความถี่ในการออกแบบ



รูปที่ 8 แสดงขอบเขตที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุม

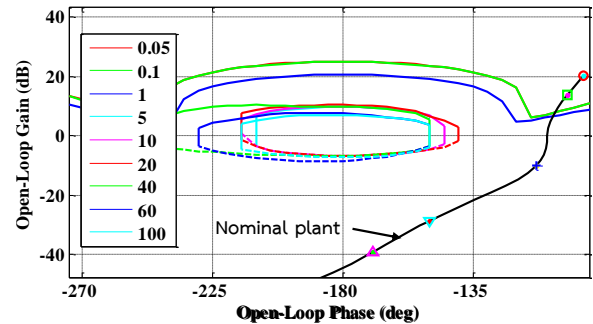
3.3 การออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุม คือการจัดวงรอบสัญญาณ (Loop shaping) ของ Nominal plant ให้สอดคล้องกับขอบเขตทั้งหมดที่ได้สร้างขึ้นจากคุณสมบัติที่ต้องการสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 9 และตัวควบคุมที่ได้สามารถแสดงได้ตามสมการที่ (9)

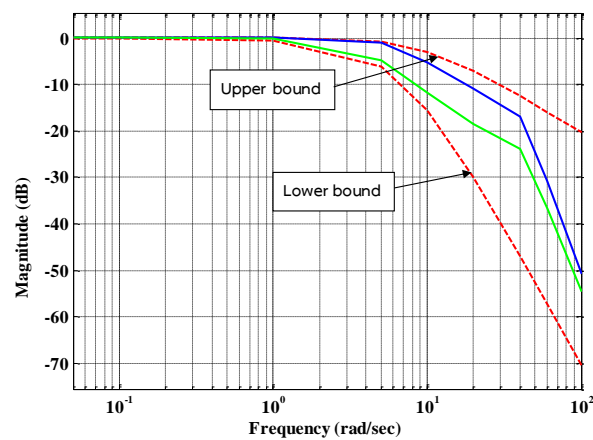
$$G(s) = \frac{0.7045s + 0.6648}{s^2 + 6.22s + 2.738} \quad (9)$$

เมื่อทำการออกแบบตัวควบคุมเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อมาเป็นการออกแบบตัวกรอง F วิธีการออกแบบคือต้องทำให้ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของของ Closed-loop system แสดงได้เป็นเส้นทึบสีน้ำเงิน และสีเขียวในรูปที่ 10 ตามลำดับ อยู่ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่าง แสดงเป็นเส้นปะสีแดง ซึ่งตัวกรอง F ที่แสดงได้ตามสมการที่ (10)

$$F(s) = \frac{0.7128s + 7.926}{s + 7.926} \quad (10)$$



รูปที่ 9 แสดงการจัดวงรอบสัญญาณของ Nominal plant กับขอบเขตทั้งหมด



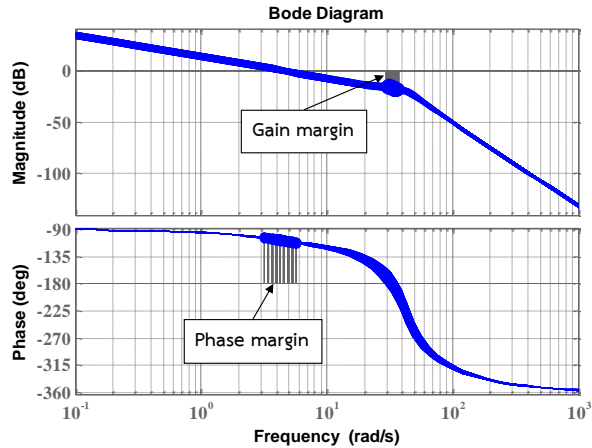
รูปที่ 10 แสดงการออกแบบตัว Pre-filter ของระบบควบคุม

3.4 การวิเคราะห์ระบบควบคุม

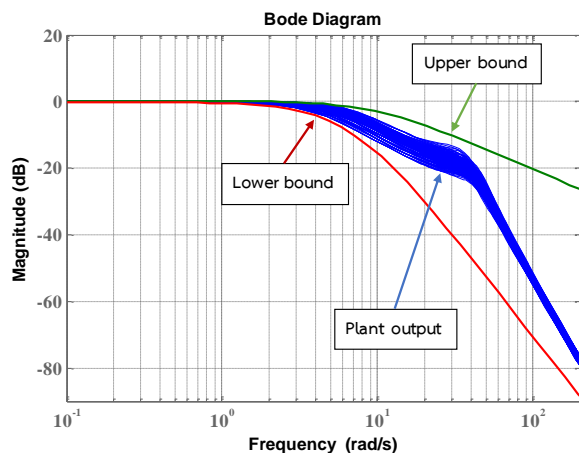
การวิเคราะห์ระบบควบคุมเป็นการตรวจสอบตัวควบคุม G และตัวกรอง F ที่ได้ออกแบบมีคุณสมบัติตรงตามที่ต้องการ รูปที่ 11 แสดงกราฟแบบ Bode diagram ของ Open-loop system ของแบบจำลองที่มีความไม่แน่นอนทั้งหมด 125 กรณี แสดงเป็นเส้นสีน้ำเงิน ค่า Gain margin ของตัวควบคุมที่ถูกออกแบบอยู่ในช่วง 13.8 dB ถึง 19.5 dB ส่วนค่า Phase margin อยู่ระหว่าง 68.2 ถึง 72.7 องศา นั่นคือความถี่เสถียรภาพของระบบมากกว่าคุณสมบัติที่กำหนดไว้

คุณสมบัติแบบ Tracking สามารถแสดงเอาต์พุตของ Closed-loop system แบบสององศาอิสระตามรูปที่ 12 เมื่อเส้นทึบสีเขียวคือ ขอบเขตบน เส้นทึบสีแดงคือ ขอบเขตล่าง และเส้นทึบสีน้ำเงินคือเอาต์พุตของระบบป้อนกลับทั้งหมด 125 กรณี จากภาพพบว่าทุกค่าความไม่

แน่นอนของระบบ สามารถทำงานภายใต้ขอบเขตบน และขอบเขตล่าง



รูปที่ 11 แสดงคุณสมบัติของความมีเสถียรภาพของระบบ



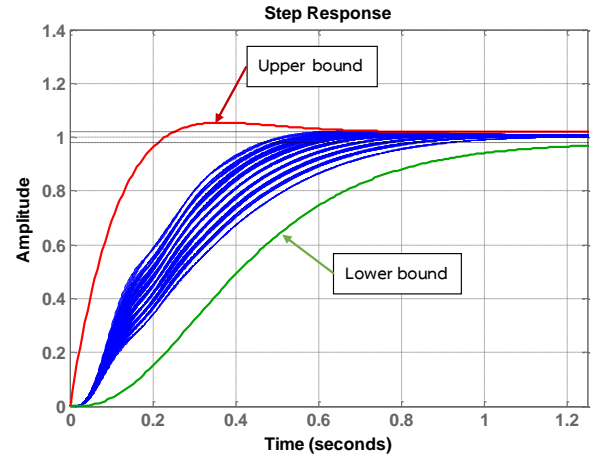
รูปที่ 12 แสดงคุณสมบัติ Tracking

เมื่อพิจารณาในโดเมนเชิงเวลา สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 13 ขอบเขตบนแสดงได้เป็นเส้นทึบสีแดง ขอบเขตล่างแสดงได้เป็นเส้นทึบสีเขียว จากรูปพบว่าระบบที่แสดงเป็นเส้นทึบสีน้ำเงินทั้ง 125 กรณี สามารถทำงานอยู่ภายใต้ขอบเขตบนและขอบเขตล่าง นั่นคือตัวควบคุมที่ออกแบบมีความสอดคล้องกับคุณสมบัติแบบ Tracking

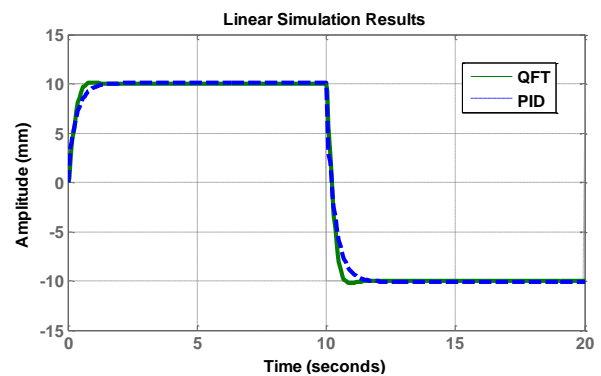
4. ผลการจำลอง

การจำลองการทำงานเป็นการเปรียบเทียบการทำงานระหว่างตัวควบคุมแบบคิเวฟทีและแบบพีไอดี (PID) แต่ขั้นตอนการเปรียบเทียบจะเลือกเฉพาะ Nominal plant มาพิจารณาแค่ 1 กรณี เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอดีไม่สามารถทำงานครอบคลุมความไม่

แน่นอนของระบบได้ทั้งหมด นั่นคือตัวควบคุมแบบพีไอดีถูกออกแบบมาจากระบบที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 13 ผลตอบสนองชั่วคราวของระบบป้อนกลับ

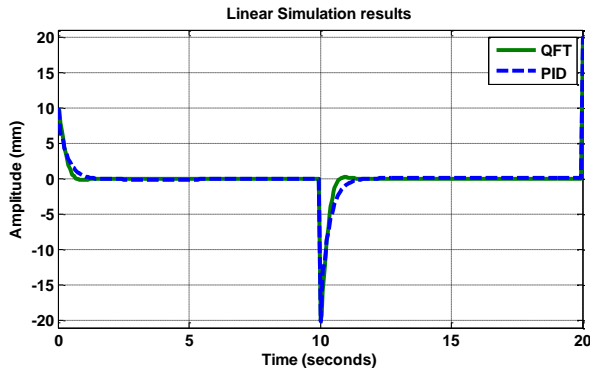


รูปที่ 14 การเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิง

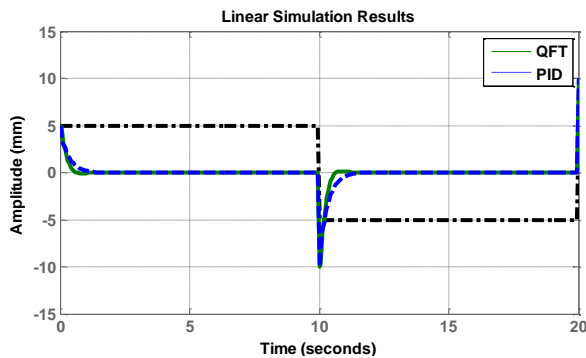
ทำการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz ช่วงกว้าง 10 mm ในระยะเวลา 20 วินาที สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 14 เส้นทึบสีเขียวคือตัวควบคุมที่นำเสนอ เส้นปะสีน้ำเงินคือตัวควบคุมแบบพีไอดี และเส้นปะสีเทาคือสัญญาณอ้างอิง จากรูปพบว่าตัวควบคุมแบบคิเวฟทีมีผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่า ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมีค่าน้อยกว่า สามารถแสดงได้ในรูปที่ 15 เมื่อวัดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวในช่วงผลตอบสนองชั่วคราว ด้วยวิธีแบบ Root mean square พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี มีค่ามากกว่าตัวควบคุมแบบคิเวฟที 12.21%

เมื่อทำการป้อนสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาออกของระบบ แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 0.05 Hz ช่วงกว้าง

5 mm แสดงได้เป็นเส้นปะสีดำในรูปที่ 16 พบว่าตัวควบคุมคิแอฟที่สามารถลดสิ่งรบกวนได้รวดเร็วกว่า



รูปที่ 15 แสดงค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว



รูปที่ 16 ความสามารถในการลดสิ่งรบกวนของระบบ

5. สรุปผลการทดลอง

ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบคิแอฟที่เป็นทฤษฎีที่มีประสิทธิภาพ สามารถออกแบบให้ครอบคลุมทุกความไม่แน่นอนของระบบ นั่นคือตัวควบคุมที่ออกแบบมีความทนทาน (Robustness) ต่อความไม่แน่นอนของระบบ ซึ่งแตกต่างจากตัวควบคุมแบบพีไอดีซึ่งออกแบบจากระบบพลวัตที่คงที่

ผลการจำลอง เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองเฉพาะ Nominal plant 1 กรณี พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ได้รับการปรับจูนให้มีประสิทธิภาพดี มีสมรรถนะความสามารถใกล้เคียงกับตัวควบคุมแบบคิแอฟที่ แต่ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวในช่วงผลตอบสนองชั่วครู่มีค่ามากกว่าตัวควบคุมแบบคิแอฟที่ 12.21%

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่สนับสนุนพื้นที่ทำงานวิจัย

ขอขอบคุณคุณห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (CRVlab) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ช่วยให้คำแนะนำด้านทฤษฎีการออกแบบระบบควบคุม

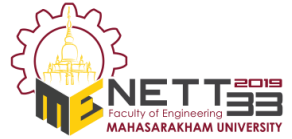
7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Madhur, P. and Minase, J. (2016). Position Control of Servo Driven Ball Screw for Minimizing Backlash, *International journal of innovative Research in Science, Engineering and Technology*, April 2016, pp.5287-5294.
- [2] Cloutier, J. (2014). *Simulation and Control of a Ball Screw System Actuated by a Stepper motor with Feedback*. The University of Guelph, Ontario, Canada.
- [3] Wang, Q.G., Fung, H.W. and Zhang, Y. (1999). *PID Tuning with Exact Gain and Phase Margins*, *ISA transactions* 38, pp.243-249.
- [4] Gracia-Sanz, M. (2017). *Robust Control Engineering: Practical QFT solutions*, CRC press, Florida.
- [5] Gracia-Sanz, M. (2012). *Wind Energy System: Control Engineering Design*, CRC press, Florida.
- [6] Nise, S.N. (2000). *Control systems Engineering*, John Wiley & Sons, New York.
- [7] Riz-Rojas, E.D., Vazquez-Gonzalez, V.L., Alejos-Palomares, R., Escudero-Urbe, A.Z. and Mendoza-Vazquez, J.R. (2008). *Mathematical Model of a Linear Electric Actuator with Prosthesis Applications*, *18th International*



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33
วันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดอุดรธานี

DRC – 010



*Conference on Electronics, Communications
and Computers, Puebla, Mexico.*

[8] Horowitz, I. (1963). *Synthesis of feedback
System*: Academic, New York

[9] Borghessani, C., Chait, Y. and Yaniv, O. (2003).
*The Frequency Domain Control Design Toolbox
User's Guide*, Terasoft Inc