



การลดระยะผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกล SEIKO D-TRAN RT3200 โดยใช้การควบคุมแบบทำซ้ำที่ปรับปรุงใหม่

พงศกร รูปใหญ่ และ เบญจมาศ พนมรัตน์รักษ์*

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2470-9092 อีเมล: benjamas.pan@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.03.006

รับเมื่อ 8 เมษายน 2560 ตอรับเมื่อ 3 สิงหาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 21 มีนาคม 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเครื่องจักรอัตโนมัติถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมไทยต่างๆ หุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมถือเป็นเครื่องจักรอัตโนมัติประเภทหนึ่งซึ่งมักจะถูกนำมาใช้ให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดขึ้นเพื่อทำงานบางประเภท เช่น งานเชื่อมแบบจุดหรือแบบติดตามเส้นทาง งานจับและวาง งานตัดโดยใช้เลเซอร์ งานทากาว งานทาสี เป็นต้น เนื่องจากความไม่สมบูรณ์แบบของชิ้นส่วนที่ใช้ในการผลิตหุ่นยนต์แขนกล ระยะผิดพลาดอาจเกิดขึ้นในระหว่างการทำงานและอาจสร้างความเสียหายให้กับขบวนการผลิต ปัญหานี้จะยิ่งส่งผลกระทบมากขึ้นเมื่อนำหุ่นยนต์แขนกลไปใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์แขนกล SEIKO D-TRAN RT3200 เมื่อมีการเคลื่อนที่แบบทำซ้ำโดยการใช้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำ 3 ประเภท ได้แก่ 1) ตัวควบคุมแบบทำซ้ำอย่างง่าย 2) ตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ 3) ตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูกปรับปรุง ซึ่งตัวควบคุมแบบทำซ้ำทั้ง 3 ประเภท ได้ถูกนำมาทดสอบความมีเสถียรภาพและจำลองการควบคุมหุ่นยนต์แขนกล

คำสำคัญ: หุ่นยนต์แขนกล, SEIKO D-TRAN RT3200, ตัวควบคุมแบบทำซ้ำ, การหาค่าที่เหมาะสม, โดเมนความถี่

การอ้างอิงบทความ: พงศกร รูปใหญ่ และ เบญจมาศ พนมรัตน์รักษ์, “การลดระยะผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกล SEIKO D-TRAN RT3200 โดยใช้การควบคุมแบบทำซ้ำที่ปรับปรุงใหม่,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 28, ฉบับที่ 2, หน้า 299-312, เม.ย.-มิ.ย. 2561.

Positioning Error Reduction in Robotic Manipulator SEIKO D-TRAN RT3200 Using Repetitive Control

Pongsakorn Roopyai and Benjamas Panomruttanarug*

Department of Control System and Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-2470-9092, E-mail: benjamas.pan@kmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.03.006

Received 8 April 2017; Accepted 3 August 2017; Published online: 21 March 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Nowadays, automation machines are popular in Thai manufacturing industries. An industrial robot arm is one kind of machine that has been widely used for tracking applications, such as spot welding or path welding, "pick and place" tasks, laser cutting, gluing, and painting. Due to the imperfect mechanical parts of the robot arm, distance errors generally occur during the operation and sometimes this causes defects in the production line. This issue has been seriously taken into account when applying the robot arm to high-precision tasks. This research studies how to improve the performance of the industrial robot arm, SEIKO D-TRAN RT3200, performing a repetitive task by using 3 types of repetitive control designs: 1) a simple repetitive controller; 2) an optimal repetitive controller designed in the frequency domain; 3) and an optimal and robust repetitive controller designed in the frequency domain. The stability and performance of the controllers are demonstrated in the simulation results.

Keywords: Industrial Manipulator, SEIKO D-TRAN RT3200, Repetitive Control, Tracking Error, Optimization, Cost Function

1. บทนำ

ในยุคอุตสาหกรรม หุ่นยนต์แขนกลถูกนำมาแทนที่การทำงานของมนุษย์ในสายการผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์ ตามโรงงานต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการนำเอาหุ่นยนต์แขนกลมาใช้ในการเชื่อมชิ้นส่วนเพื่อสร้างเป็นโครงรถยนต์ หุ่นยนต์แขนกลตัดโลหะด้วยเลเซอร์ หุ่นยนต์แขนกลที่ทำหน้าที่ทากาวเพื่อยึดกระจัดรถยนต์เข้ากับโครงรถ เป็นต้น การใช้งานหุ่นยนต์แขนกลในรูปแบบต่างๆ ที่ได้กล่าวมานั้นเป็นการใช้งานที่หุ่นยนต์แขนกลจะต้องเคลื่อนที่ไปตามพิกัดคาร์ทีเซียนที่สั่งงานเอาไว้ [1] ซึ่งจะต้องอาศัยความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกลเป็นอย่างมาก มิฉะนั้นชิ้นงานที่ได้อาจไม่สมบูรณ์และเกิดเป็นของเสียขึ้นในโรงงาน

ในหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่มีขายโดยทั่วไปนั้น จะมีการระบุค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ซ้ำ (Position Repeatability) ไว้ในคู่มือ โดยค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ซ้ำจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าหุ่นยนต์แขนกลมีความแม่นยำ (Precision) ในการเคลื่อนที่ไปในพิกัดที่สั่งงานไว้ได้มากเพียงใด ซึ่งค่าที่น้อยย่อมหมายถึงหุ่นยนต์มีความแม่นยำในการเคลื่อนที่สูง และราคาของหุ่นยนต์ก็จะสูงตามไปด้วย

งานวิจัยในอดีตได้มีการนำเสนอการควบคุมประเภทต่างๆ สำหรับหุ่นยนต์แขนกลเพื่อลดค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ ตัวอย่างเช่น การควบคุมพีไอดีแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear PID Control) [2], [3] การควบคุมแบบคลุมเครือ (Fuzzy Logic Control) [4], [5] การควบคุมแบบปรับเปลี่ยน (Adaptive Control) [6] และการควบคุมแบบโหมดการเลื่อน (Sliding Mode Control) [7], [8]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกกลุ่มหนึ่ง [9]-[15] ที่ได้นำเอาเทคนิคการควบคุมแบบทำซ้ำ (Repetitive Control) มาเป็นขบวนการในการลดระยะผิดพลาด โดยข้อได้เปรียบของการใช้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำนั้น ผู้ออกแบบไม่จำเป็นจะต้องปรับขบวนการควบคุมของหุ่นยนต์ที่มีมาแต่เดิม แต่สามารถนำค่าอินพุตและเอาต์พุตของหุ่นยนต์มาใช้หาค่าความผิดพลาดเพื่อนำไปปรับเป็นชุดคำสั่งให้หุ่นยนต์แขนกลเคลื่อนที่ในรอบถัดไป โดยชุดคำสั่งใหม่นี้จะทำให้ค่าผิดพลาดมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ เมื่อจำนวนการทำซ้ำเพิ่มมากขึ้น งานวิจัย [9] เป็น

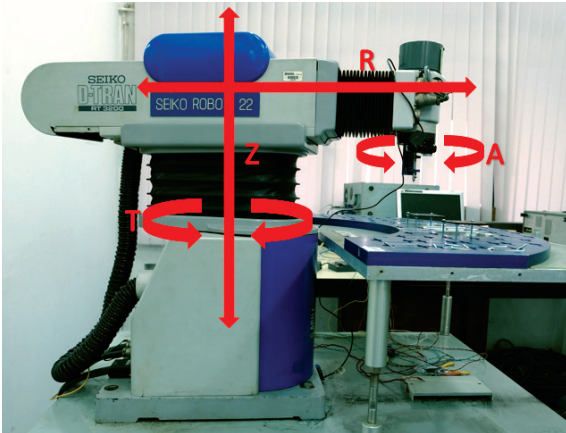
การออกแบบตัวควบคุมแบบทำซ้ำสำหรับหุ่นยนต์แขนกลโดยอาศัยเทคนิคการตัดคู่โพลและซีโร (Pole Zero Cancellation) ซึ่งการออกแบบประเภทนี้มีความคงทนต่อความคลาดเคลื่อนของระบบต่ำ ทำให้เมื่อนำไปใช้งานจริงจะต้องมีการออกแบบช่วงไร้การตอบสนอง (Deadband) เพิ่มเข้ามาในตัวควบคุมแบบทำซ้ำ [10] นอกจากนี้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำถูกพัฒนาไปใช้ในวงจรไฟฟ้าต่างๆ เช่น การออกแบบระบบควบคุมแบบทำซ้ำแบบเฟสนำเชิงเส้นในวงจรอินเวอร์เตอร์ [11] การใช้ระบบควบคุมแบบทำซ้ำแบบปลั๊กอิน (Plug-in) ในระบบเร็กตีไฟเออร์ [12] การออกแบบตัวกรองความถี่แบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนไม่จำกัด (IIR Filter) ในระบบควบคุมแบบทำซ้ำให้มีความคงทนในเซอร์โวมอเตอร์ [13] การออกแบบตัวกรองความถี่แบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (FIR Filter) ในระบบควบคุมแบบทำซ้ำให้มีความคงทน [14], [15] ซึ่งมีประสิทธิภาพเหนือกว่า [13] ในเรื่องของความมีเสถียรภาพจากการใช้ตัวกรองความถี่แบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด และด้วยจำนวนอัตราขยาย (Gain) เพียงเล็กน้อย ระบบสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนได้อย่างรวดเร็ว

งานวิจัยนี้เป็นการต่อยอดเทคนิคการออกแบบระบบควบคุมแบบทำซ้ำใน [14] และ [15] เพื่อลดระยะความผิดพลาดจากการทำซ้ำในหุ่นยนต์แขนกล SEIKO D-TRAN RT3200 โดยจะมีการศึกษาความคงทน (Robustness) ของตัวควบคุมต่อความคลาดเคลื่อนในการประมาณระบบ รวมไปถึงข้อเสนอแนะในการเลือกจำนวนอัตราขยาย โครงสร้างของตัวกรองความถี่แบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดที่จะใช้ในตัวควบคุมเพื่อทำให้การออกแบบตัวควบคุมแบบทำซ้ำประเภทนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้จะมีการเปรียบเทียบความคงทนของตัวควบคุมแบบทำซ้ำอย่างง่ายกับตัวควบคุมที่ได้ออกแบบมาในหัวข้อการทดสอบเสถียรภาพของระบบควบคุมแบบทำซ้ำ

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 หุ่นยนต์แขนกล SEIKO D-TRAN RT3200

รูปที่ 1 แสดงภาพของหุ่นยนต์แขนกล SEIKO D-TRAN



รูปที่ 1 หุ่นยนต์แขนกล SEIKO D-TRAN RT3200

RT3200 ที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ หุ่นยนต์แขนกลตัวนี้ ประกอบไปด้วย 4 แกน ได้แก่ แกน Z เป็นแกนแสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical Stroke) แกน T เป็นแกนแสดงการหมุนรอบเอว (Waist Rotation) แกน R เป็นแกนแสดงการเคลื่อนที่ในแนวราบ (Horizontal Stroke) และแกน A เป็นแกนแสดงการหมุนรอบข้อมือ (Wrist Rotation) [16]

หุ่นยนต์แขนกลจะถูกสั่งงานโดยการป้อนชุดคำสั่งไปยังโปรแกรม LabVIEW เพื่อส่งคำสั่งไปที่ตัวควบคุมหุ่นยนต์ (NI cRIO-9075) ที่ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกลให้สอดคล้องกับชุดคำสั่งที่ถูกป้อนเข้ามา ทั้งนี้การควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนจะใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ โดยจะรับค่าระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปจากเอ็นโค้ดเดอร์ที่ติดอยู่กับฐานของมอเตอร์ในแต่ละแกน

เนื่องจากการใช้งานของหุ่นยนต์แขนกลประเภทนี้ จะถูกนำไปใช้ในการจับและวางวัตถุที่อยู่ในถาด (Pick and Place) โดยจะมีการใช้งานเพียงแค่ 2 แกนหลักๆ คือแกน Z และ T ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาการลดความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่จากแกน Z และ T ซึ่งเราจะทำการหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของทั้ง 2 แกนในหัวข้อย่อยถัดไป

2.2 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแกน Z และ T

ในหัวข้อนี้จะเป็นการหาผลตอบสนองในโดเมนความถี่ของแกน Z และ T โดยจะทำการป้อนอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณ

ไซน์ซอว์ด์กวาดความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ไปจนถึง 49 Hz โดยจะเพิ่มความถี่ขึ้นทีละ 1 Hz กำหนดให้ความถี่ในการสุ่ม (Sampling Frequency) มีค่าเท่ากับ 100 Hz

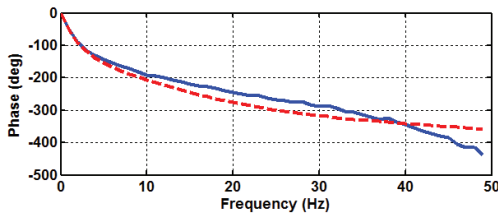
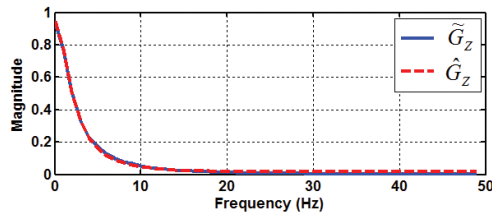
ในการพิจารณาสัญญาณในโดเมนเวลา ขนาดของไซน์ซอว์ด์ที่แกว่งระหว่าง 0% จนถึง -100% ถูกป้อนให้แก่แกน Z ซึ่งมีผลทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ลงเป็นระยะ 120 mm แล้วกลับขึ้นมาที่ระยะ 0 mm ใหม่อีกครั้งหนึ่ง ส่วนขนาดของไซน์ซอว์ด์ที่ป้อนให้แก่แกน T มีผลทำให้หุ่นยนต์หมุนไปเป็นมุม -90° ถึง 90° หรือจากตำแหน่งซ้ายสุดไปจนถึงขวาสุดของแกน

ในการทดลองจะหาผลตอบสนองเชิงความถี่ของแต่ละแกนแยกกัน กล่าวคือจะทำการสั่งอินพุตเพื่อเก็บค่าเอาต์พุตในแกนใดแกนหนึ่งก่อน แล้วจึงใช้การแปลงอนุกรมฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) ในการหาขนาด (Magnitude) และเฟส (Phase) ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตออกมา ซึ่งขนาดของระบบในแกนนั้นจะหาได้จากอัตราส่วนของขนาดของเอาต์พุตและขนาดของอินพุตในความถี่ที่สอดคล้องกัน และในทำนองเดียวกันเฟสของระบบหาได้จากผลต่างของเฟสของเอาต์พุตและเฟสของอินพุตในความถี่ที่สอดคล้องกัน ซึ่งก็จะได้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแกนนั้นออกมา ในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 เส้นทึบสีน้ำเงินแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของแกน Z และผลตอบสนองเชิงความถี่ของแกน T ตามลำดับ

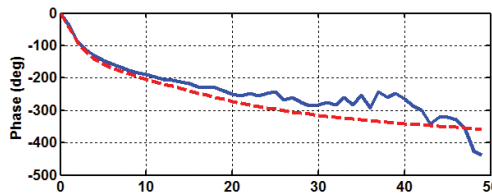
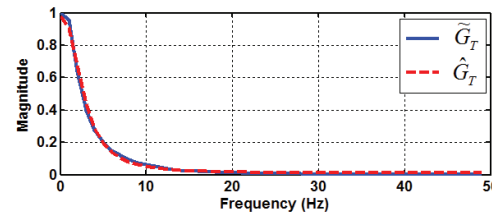
เมื่อได้ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ของแต่ละแกนแล้ว เราจำเป็นต้องประมาณหาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของแต่ละแกนออกมาเพื่อใช้ในการจำลองการทำงานของระบบ ในขั้นตอนนี้เราจะใช้คำสั่ง “fitfrd” ในโปรแกรม MATLAB เพื่อประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนของแต่ละแกน สมการที่ (1) และ (2) แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของแกน Z และ T ตามลำดับ

$$\hat{G}_Z(z) = \frac{0.006108z^2 - 0.01786z + 0.02876}{z^2 - 1.72z + 0.7378} \quad (1)$$

$$\hat{G}_T(z) = \frac{0.00589z^2 - 0.01432z + 0.02724}{z^2 - 1.765z + 0.7841} \quad (2)$$



รูปที่ 2 ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ในแกน Z



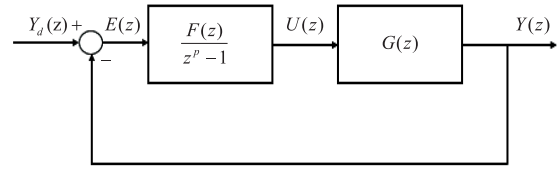
รูปที่ 3 ผลตอบสนองในโดเมนความถี่ในแกน T

ในรูปที่ 2 และ 3 เส้นปะสีแดงแสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ประมาณขึ้นมาในแต่ละแกนเปรียบเทียบกับเส้นทึบสีน้ำเงินที่แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบจริง จะเห็นได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าในช่วงของความถี่สูง ซึ่งอยู่ในช่วงที่ระบบแทบจะไม่ตอบสนองแล้วเนื่องจากขนาดของระบบในช่วงความถี่ดังกล่าวมีค่าน้อยมาก

2.3 ระบบควบคุมแบบทำซ้ำในแต่ละแกนของหุ่นยนต์แขนกล

2.3.1 พื้นฐานการควบคุมแบบทำซ้ำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบควบคุมแบบทำซ้ำ (Repetitive Control) สำหรับแต่ละแกนของหุ่นยนต์



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบทำซ้ำ

แขนกล เพื่อลดระยะการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดจากการทำงานแบบซ้ำไปซ้ำมา รูปที่ 4 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมแบบทำซ้ำในแต่ละแกนของหุ่นยนต์

กำหนดให้ $G(z)$ คือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับของแต่ละแกนของหุ่นยนต์แขนกล หรือ $\tilde{G}_Z(z)$ และ $\hat{G}_Z(z)$ ที่เราประมาณขึ้นมาในหัวข้อที่แล้ว ในการสั่งงานหุ่นยนต์แขนกลเพื่อทำงานในรอบแรก เราจะทำการป้อนมุมหมุนที่ต้องการในแต่ละแกน (Desired Output) หรือ $y_d(k)$ โดยกำหนดค่าที่ต้องการนี้ไปยังสัญญาณ $u(k)$ กล่าวคือ $u(k)$ มีค่าเท่ากับ $y_d(k)$ เมื่อยังไม่มีการใช้งานตัวควบคุมแบบทำซ้ำ ซึ่งค่ามุมที่มอเตอร์หมุนไปได้จริงจะถูกเก็บค่าไว้ใน $y(k)$ โดยจะมีระยะผิดพลาดในการเคลื่อนที่ $e(k)$ ซึ่งคำนวณได้จาก $e(k) = y_d(k) - y(k)$

เมื่อหุ่นยนต์ทำงานครบ 1 รอบ จะใช้เวลาการทำงานทั้งหมด p ขั้นตอนเวลา (Time Step) หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ซ้ำด้วยสัญญาณ $y_d(k)$ ที่ซ้ำคาบเดิม แต่ในคราวนี้ระบบจะจำระยะผิดพลาดที่เคลื่อนที่ไปในรอบที่แล้ว เพื่อมาปรับค่าในสัญญาณ $u(k)$ ดังนั้นในการทำงานที่เริ่มมีการใช้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำ $u(k)$ จะมีค่าไม่เท่ากับ $y_d(k)$ อีกต่อไป แต่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามกฎการควบคุมแบบทำซ้ำ (Repetitive Control Law) ที่ได้ออกแบบมา ซึ่งถ้ากำหนดให้ $F(z)$ คือตัวควบคุมแบบทำซ้ำ เราสามารถเขียนสมการการควบคุมแบบทำซ้ำได้ดังนี้

$$U(z) = \left[\frac{F(z)}{z^p - 1} \right] E(z) \quad (3)$$

โดยเมื่อทำการจัดรูปใหม่ จะได้

$$z^p U(z) = U(z) + F(z)E(z) \quad (4)$$

จากสมการจะเห็นว่าเทอมทางด้านซ้ายคือสัญญาณควบคุมในรอบถัดไปหรือ $u(k + p)$ ถูกคำนวณค่าได้จาก

สัญญาณควบคุมและสัญญาณระยะผิดพลาดในรอบปัจจุบัน ซึ่งหมายความว่าเราสามารถทำการออกแบบตัวควบคุม $F(z)$ แบบการใช้อัตราขยายแบบไม่คอซอล (Non-causal Gain) ได้ จากบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบทำซ้ำ เรา สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างระยะผิดพลาดและค่า เอาต์พุตที่ต้องการได้ดังนี้

$$\{1 - z^{-p} [1 - G(z)F(z)]\} E(z) = (1 - z^{-p}) Y_d(z) \quad (5)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการที่ (5) พบว่าเทอมทางด้านขวามือ มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากค่าเอาต์พุตที่ต้องการเป็นสัญญาณซ้ำ คาบในทุกๆ p ชั้นเวลา ดังนั้นเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ ของสัญญาณระยะผิดพลาดในการทำซ้ำจากครั้งหนึ่งไปยัง อีกครั้งหนึ่งได้ดังนี้

$$z^p E(z) = [1 - F(z)G(z)] E(z) \quad (6)$$

เทอมทางด้านซ้ายมือของสมการที่ (6) แสดงถึง สัญญาณระยะผิดพลาดในรอบการทำงานถัดไป หรือ $e(k + p)$ โดยจะมีค่าเท่ากับผลคูณของ $1 - F(z)G(z)$ และ สัญญาณระยะผิดพลาดในรอบปัจจุบัน โดยถ้าขนาดของ $1 - F(e^{j\omega T}) G(e^{j\omega T})$ มีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับทุกๆ ความถี่ จนกระทั่งถึงความถี่ในควิสิท (Nyquist Frequency) แล้ว ระบบควบคุมแบบทำซ้ำจะสามารถทำให้ระยะผิดพลาด ลดลงได้ในทุกๆรอบของการทำงาน หรือกล่าวได้ว่าเงื่อนไข ความมีเสถียรภาพของระบบควบคุมแบบทำซ้ำ (Stability Condition for Repetitive Control) สามารถเขียนเป็น สมการได้ดังนี้

$$|1 - F(e^{j\omega T})G(e^{j\omega T})| < 1 ; \forall \omega \quad (7)$$

โดยสมการที่ (7) เป็นทั้งเงื่อนไขความมีเสถียรภาพ ที่จำเป็น (Necessary Condition) และเงื่อนไขความมี เสถียรภาพที่เพียงพอ (Sufficient Condition) สำหรับระบบ ควบคุมแบบทำซ้ำ [17]

2.3.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบทำซ้ำในแต่ละแกน ของหุ่นยนต์แขนกล

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมแบบ ทำซ้ำในรูปแบบต่างๆ เพื่อลดระยะผิดพลาดในการเคลื่อนที่ ในแต่ละแกนของหุ่นยนต์แขนกล

1) การออกแบบตัวควบคุมแบบทำซ้ำอย่างง่าย

รูปแบบของตัวควบคุมแบบทำซ้ำอย่างง่ายสามารถถูก แสดงได้ดังนี้

$$F(z) = \phi z \quad (8)$$

โดยทั่วไปแล้วระบบควบคุมแบบป้อนกลับ $G(z)$ ที่มีการ ใช้ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (D/A Converter) แบบ ZOH จะมีค่าเวลาหน่วง (Time Delay) เท่ากับ 1 ชั้นเวลา ดังนั้นในการชดเชยผลของช่วงเวลาหน่วงนั้น เราจึงกำหนด ให้ $F(z)$ อยู่ในรูปแบบดังสมการที่ (8) ซึ่ง ϕ ในที่นี้คือค่าอัตรา ขยายของตัวควบคุมแบบทำซ้ำ

2) การออกแบบตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือน ของระบบในโดเมนความถี่

นอกเหนือจากตัวควบคุมแบบทำซ้ำอย่างง่าย งานวิจัยนี้ ได้นำเอาตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของ ระบบในโดเมนความถี่ [14] มาพิจารณาเพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการทำงาน โดยตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วน กลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่มีสมการเป็น

$$F(z) = \alpha_1 z^{m-1} + \alpha_2 z^{m-2} + \dots + \alpha_m z^0 + \dots + \alpha_{n-1} z^{-(n-m-1)} + \alpha_n z^{-(n-m)} \quad (9)$$

โดย α_i คือค่าอัตราขยายทั้งหมด n ตัวที่ถูกออกแบบ มาในแต่ละเทอม ซึ่งตัวควบคุมประเภทนี้จะประกอบไปด้วย อัตราขยายแบบไม่คอซอล ทั้งหมด $m - 1$ ตัว และอัตราขยาย แบบคอซอล (Causal Gain) อีก $n - m + 1$ ตัว

การหาค่าอัตราขยายในเทอมต่างๆ สามารถคำนวณ ได้จากการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันต้นทุน (Cost Function) ดังต่อไปนี้

$$J = \sum_{j=0}^{N-1} [1 - F(e^{i\omega_j T})G(e^{i\omega_j T})] W_j [1 - F(e^{i\omega_j T})G(e^{i\omega_j T})]^* \quad (10)$$

W_j คือ ตัวถ่วงน้ำหนักที่ความถี่ ω_j โดย $\omega_0 \leq \omega_j < \omega_N$ ซึ่ง ω_N คือความถี่ในควิส์ท์ของระบบเทอม $G(e^{i\omega_j T})$ ในสมการจะถูกแทนด้วยผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบที่หาได้จากหัวข้อ 2.2 หรือ $G(e^{i\omega_j T}) = M(\omega_j)e^{i\phi(\omega_j)}$ โดย $M(\omega_j)$ และ $\phi(\omega_j)$ คือขนาดและเฟสของระบบที่ความถี่ ω_j ตามลำดับ ในการหาค่าต่ำสุดฟังก์ชันต้นทุนในสมการที่ (10) นั้น เราจะทำการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของฟังก์ชันเทียบกับ α_i แล้วกำหนดให้เท่ากับ 0 จากนั้นทำการแก้สมการเพื่อหาค่าอัตรายาย α_i ต่อไป

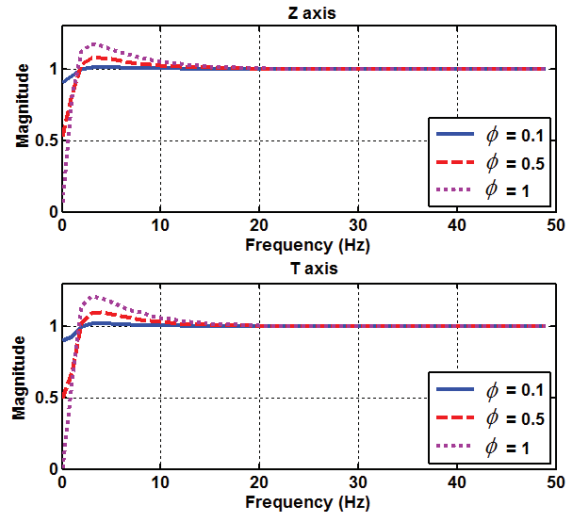
เมื่อได้ค่าอัตรายาย α_i จากการหาค่าต่ำสุดของสมการที่ (10) ออกมาแล้ว ค่าอัตรายายที่ได้อาจจะมีความสูงเกินไป ซึ่งในบางครั้งค่าที่ได้จะมีค่าสูงมากเกินไป ทำให้ระบบควบคุมแบบทำซ้ำขาดเสถียรภาพ ในหัวข้อย่อยถัดไปจะกล่าวถึงวิธีการปรับปรุงตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่เพื่อทำให้ค่าอัตรายายที่ออกแบบมามีขนาดลดลงเพื่อทำให้ระบบควบคุมแบบทำซ้ำมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

3) การปรับปรุงตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่

ในการเพิ่มความถี่เสถียรภาพของระบบควบคุมแบบทำซ้ำจากการใช้ตัวควบคุมตามที่ได้ออกแบบมาในหัวข้อย่อยที่แล้ว [15] ได้นำเสนอการปรับปรุงตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่โดยจะทำการเพิ่มเทอมผลรวมยกกำลังสองของอัตรายายเข้าไปในฟังก์ชันต้นทุนดังนี้

$$J = \sum_{j=0}^{N-1} [1 - F(e^{i\omega_j T})G(e^{i\omega_j T})] W_j [1 - F(e^{i\omega_j T})G(e^{i\omega_j T})]^* + V_j (\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots + \alpha_n^2) \quad (11)$$

V_j คือ ตัวถ่วงน้ำหนักที่ความถี่ ω_j ในการเพิ่มเทอมอัตรายายเข้าไปในฟังก์ชันต้นทุนจะทำให้ค่าอัตรายายที่ออกแบบมาได้มีขนาดลดลงจากอัตรายายที่ได้จากสมการที่ (10) ซึ่งจะส่งผลทำให้เสถียรภาพของระบบดีขึ้น



รูปที่ 5 $|1 - F(e^{i\omega T})G(e^{i\omega T})|$ ในแกน Z และ T เมื่อมีการใช้งานตัวควบคุมแบบทำซ้ำอย่างง่าย

2.4 การทดสอบเสถียรภาพของตัวควบคุมแบบทำซ้ำประเภทต่างๆสำหรับแกน Z และ T

ในที่นี้เราจะนำผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบในแต่ละแกน \tilde{G}_Z และ \tilde{G}_T มาใช้ในการทดสอบความถี่เสถียรภาพของตัวควบคุมแบบทำซ้ำประเภทต่างๆ ที่ได้กล่าวในหัวข้อที่แล้ว โดยจะเริ่มจากตัวควบคุมแบบทำซ้ำอย่างง่าย ตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ และตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูกปรับปรุง ตามลำดับ

2.4.1 ตัวควบคุมแบบทำซ้ำอย่างง่าย

รูปที่ 5 แสดงเสถียรภาพของระบบควบคุมแบบทำซ้ำเมื่อมีการใช้อัตรายาย ϕ เท่ากับ 0.1, 0.5 และ 1 สำหรับแกน Z และ T ตามลำดับ

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการใช้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำอย่างง่ายด้วย ϕ ทั้ง 3 ค่า ส่งผลให้ $|1 - \phi \tilde{G}(e^{i\omega T})|$ มีค่ามากกว่า 1 ในช่วงความถี่ 0-20 Hz สำหรับแกน Z และแกน T ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่มีค่า ϕ ใดๆ ในตัวควบคุมแบบทำซ้ำอย่างง่ายที่จะสามารถทำให้ระบบควบคุมแบบทำซ้ำมีเสถียรภาพได้ ดังนั้นการใช้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำอย่างง่ายจึงไม่เหมาะสมกับระบบ \tilde{G}_Z และ \tilde{G}_T นี้

2.4.2 ตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของ ระบบในโดเมนความถี่

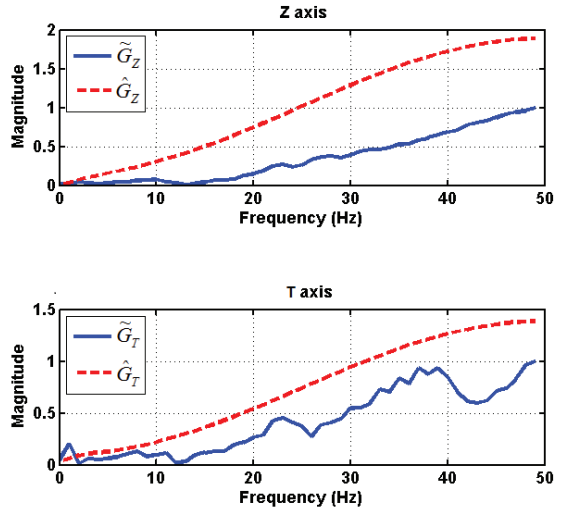
ในการออกแบบตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ เราจะใช้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ \tilde{G}_Z และ \tilde{G}_T มาทำการออกแบบตัวควบคุม โดยพิจารณาตั้งแต่ความถี่ ω_0 หรือ 0 Hz ไปจนกระทั่งถึง ω_N หรือความถี่ในควิซท์ซึ่งในระบบนี้ ω_N มีค่าเท่ากับ 50 Hz แต่เมื่อสังเกตจากรูปที่ 2 จะเห็นว่าที่ความถี่มากกว่า 20 Hz ขนาดของ \tilde{G}_Z และ \tilde{G}_T มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นในการพิจารณาช่วงของความถี่ที่มีค่ามากกว่า 20 Hz เป็นต้นไปเนื่องจากผลตอบสนองที่ความถี่ดังกล่าวมีค่าเข้าใกล้ ศูนย์ เราจึงออกแบบตัวควบคุมโดยพิจารณาความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ไปจนกระทั่งถึง 19 Hz ในสมการที่ (10)

รูปที่ 6 แสดงเสถียรภาพของระบบควบคุมแบบทำซ้ำ เมื่อมีการใช้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ซึ่งมีจำนวน $n=3$ และ $m=3$ สำหรับ แกน Z และ T ตามลำดับ ทั้งนี้กำหนดให้ W_j ที่ความถี่ใดๆ มีค่าเป็น 1

จากรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาเสถียรภาพของระบบ \tilde{G} ทั้ง 2 แกน เราจะพบว่าเส้นทึบสีน้ำเงินซึ่งแสดง $|1 - F(e^{i\omega T})\tilde{G}(e^{i\omega T})|$ มีค่าน้อยกว่า 1 ในทุกๆ ความถี่ นั่นคือตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่น่าจะถูกนำไปใช้งานได้จริง แต่เมื่อนำตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่มาทดสอบกับระบบ \hat{G} ซึ่งเป็นระบบที่ถูกประมาณขึ้นมาจาก \tilde{G} จะพบว่าเส้นประสีแดงที่แสดง $|1 - F(e^{i\omega T})\hat{G}(e^{i\omega T})|$ มีค่ามากกว่า 1 ที่ความถี่สูงนั้นหมายความว่าตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ได้ออกแบบมานั้นไม่สามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้เมื่อผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบมีค่าผิดพลาดไปเพียงเล็กน้อย หรือจะกล่าวได้ว่าตัวควบคุมที่ได้ออกแบบมานั้นไม่คงทน (Robust) ต่อระบบที่ผิดเพี้ยนไป (Mismatch Model)

2.4.3 ตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูกปรับปรุง

ในการออกแบบตัวควบคุมประเภทนี้ เราจะใช้เทคนิค

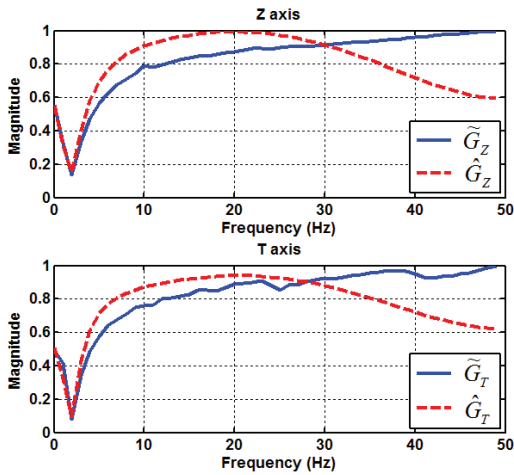


รูปที่ 6 $|1 - F(e^{i\omega T})G(e^{i\omega T})|$ ในแกน Z และ T เมื่อมีการใช้งานตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่

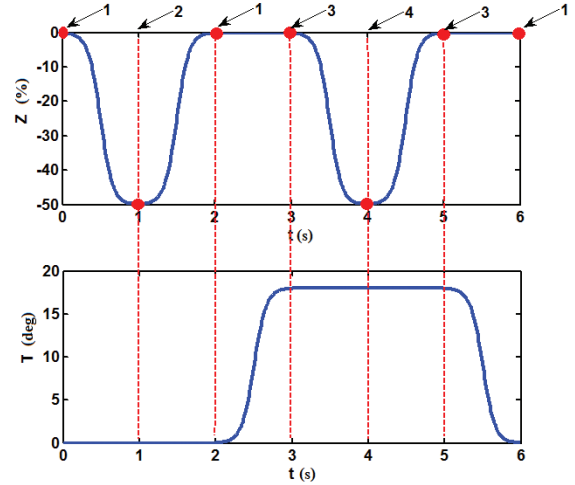
การออกแบบคล้ายกับการออกแบบตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ แต่จะควบคุมขนาดของอัตราขยายที่ใช้ในตัวควบคุมไม่ให้มีค่าสูงเกินไป โดยกำหนดให้ $V_j = 10^{-4}$ ในทุกๆ ความถี่

รูปที่ 7 แสดงเสถียรภาพของระบบควบคุมแบบทำซ้ำเมื่อมีการใช้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูกปรับปรุง ซึ่งมีจำนวน $n=3$ และ $m=3$ สำหรับแกน Z และ T ตามลำดับ

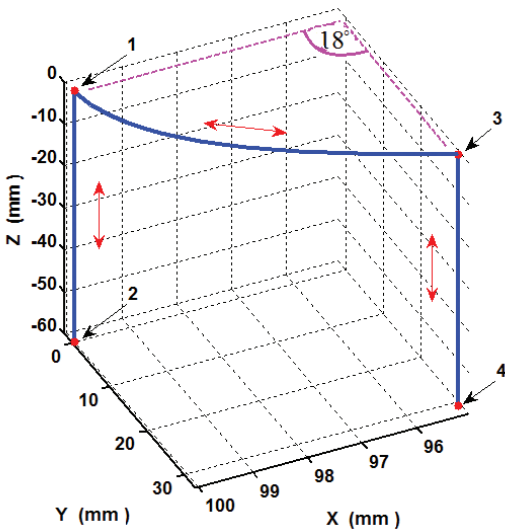
จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูกปรับปรุงสามารถทำให้ทั้งระบบจริง (แสดงโดยเส้นทึบสีน้ำเงิน) และระบบที่ถูกประมาณขึ้นมา (แสดงโดยเส้นประสีแดง) มีเสถียรภาพในทั้ง 2 แกน โดยทั้งค่าของ $|1 - F(e^{i\omega T})\tilde{G}(e^{i\omega T})|$ และค่าของ $|1 - F(e^{i\omega T})\hat{G}(e^{i\omega T})|$ มีค่าน้อยกว่า 1 ในทุกๆ ความถี่ นั้นแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูกปรับปรุงมีความคงทนต่อระบบที่ผิดเพี้ยนไป ดังนั้นเราจึงนำตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูกปรับปรุงมาใช้ในการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 7 $|1 - F(e^{j\omega T})G(e^{j\omega T})|$ ในแกน Z และ T เมื่อมีการใช้งานตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูกปรับปรุง



รูปที่ 9 สัญญาณอินพุตในแต่ละแกนที่ใช้สั่งหุ่นยนต์แขนกลเคลื่อนที่ตามเส้นทางดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 เส้นทางเคลื่อนที่ที่สั่งงานหุ่นยนต์แขนกล

2.5 การจำลองการทำงานของหุ่นยนต์แขนกล

ในการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ เราจะจำลองให้หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่แบบซ้ำไปซ้ำมาเพื่อหีบวางวัตถุลงในถาด โดยในแต่ละรอบของการทำซ้ำ หุ่นยนต์จะถูกสั่งงานให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ถูกแสดงดังรูปที่ 8

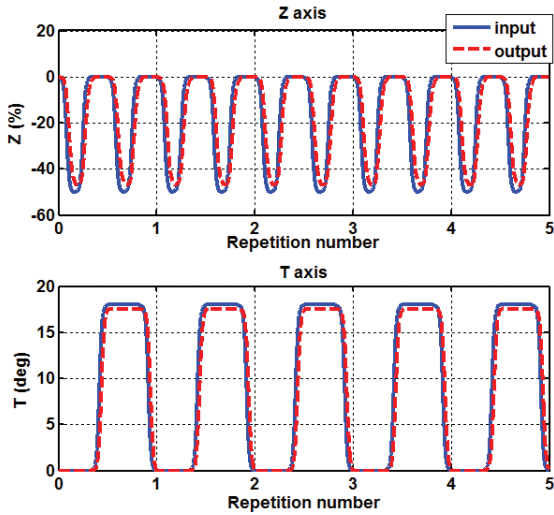
เส้นทางการทำงานของหุ่นยนต์แขนกลเริ่มจากจุดที่ 1

ซึ่งหุ่นยนต์แขนกลจะเคลื่อนที่ลงไปหีบวัตถุยังจุดที่ 2 และกลับมายังจุดที่ 1 จากนั้นจะหมุนไปจุดที่ 3 เพื่อเคลื่อนที่ลงไปวางวัตถุยังจุดที่ 4 จากนั้นจะเคลื่อนที่กลับไปยังจุดที่ 3 และจุดที่ 1 เพื่อเริ่มการทำงานครั้งถัดไป ในการควบคุมให้หุ่นยนต์แขนกลเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางดังรูปที่ 8 นั้น เราจะทำการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าไปในแต่ละแกนตามรูปที่ 9 โดยหุ่นยนต์แขนกลจะเคลื่อนที่ลงมายังจุดที่ 2 ด้วยค่าสัญญาณ -50% คิดเป็นระยะทาง 60 mm และจะกวาดมุม 18° เพื่อไปยังจุดที่ 3 ทั้งนี้หุ่นยนต์แขนกลจะใช้เวลาทำงานทั้งสิ้นเป็นเวลา 6 วินาทีต่อหนึ่งรอบการทำงาน

สัญญาณในรูปที่ 9 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

แกน Z:

$$y_d(k) = \begin{cases} -50 + \frac{50}{1 + e^{-(t-0.5)/0.08}} & ; 0 \leq t \leq 0.99 \\ -50 + \frac{50}{1 + e^{-(t-1.5)/0.08}} & ; 1.00 \leq t \leq 1.99 \\ 0 & ; 2.00 \leq t \leq 2.99 \\ -50 + \frac{50}{1 + e^{-(t-3.5)/0.08}} & ; 3.00 \leq t \leq 3.99 \\ -50 + \frac{50}{1 + e^{-(t-4.5)/0.08}} & ; 4.00 \leq t \leq 4.99 \\ 0 & ; 5.00 \leq t \leq 5.99 \end{cases} \quad (12)$$

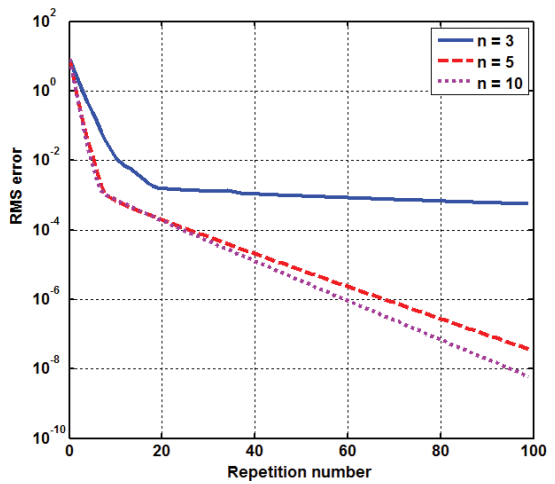


รูปที่ 10 ประสิทธิภาพการตามสัญญาณอินพุตโดยไม่ได้มีการใช้งานระบบควบคุมแบบทำซ้ำ

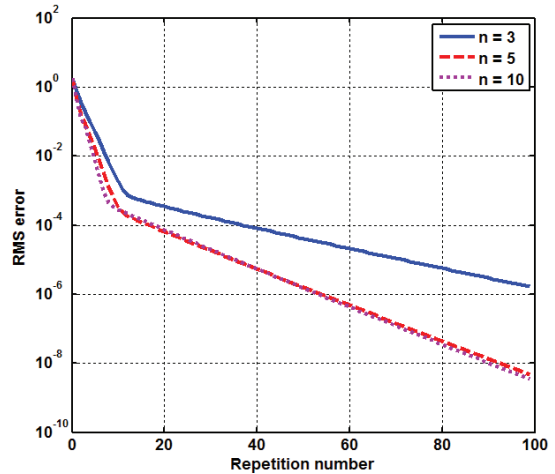
แกน T:

$$y_d(k) = \begin{cases} 0 & ; 0.00 \leq t \leq 1.99 \\ \frac{18}{1 + e^{(t-2.5)/0.08}} & ; 2.00 \leq t \leq 2.99 \\ 8 & ; 3.00 \leq t \leq 4.99 \\ \frac{18}{1 + e^{(t-5.5)/0.08}} & ; 5.00 \leq t \leq 5.99 \end{cases} \quad (13)$$

เมื่อทำการป้อนสัญญาณตั้งสมการที่ (12) และ (13) เข้าไปยังแบบจำลองที่ประมาณขึ้นมา \hat{G} ตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับแล้ว รูปที่ 10 แสดงประสิทธิภาพการตาม (Tracking) ค่าอินพุตจากการเคลื่อนที่ไปทั้งหมด 5 คาบการทำงานโดยไม่ได้มีการใช้งานระบบควบคุมแบบทำซ้ำ จะเห็นได้ว่าในทุกๆ รอบการทำงานของหุ่นยนต์ จะมีค่าความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ที่ซ้ำคาบกัน ดังนั้นเราจึงนำตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ได้ออกแบบมาจากผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบจริง \hat{G} เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ \hat{G} มาจำลองการทำงานของระบบควบคุมแบบทำซ้ำโดยรูปที่ 11 และรูปที่ 12 แสดงค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาด



รูปที่ 11 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดของแกน Z จากการใช้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูกปรับปรุง



รูปที่ 12 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดของแกน T จากการใช้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูกปรับปรุง

ที่เกิดขึ้นจากการใช้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูกปรับปรุงเป็นจำนวน 100 รอบของแกน Z และ T ตามลำดับ

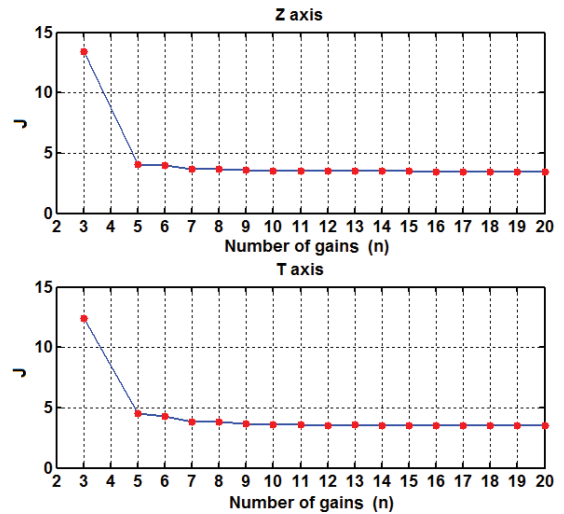
จากรูปที่ 11 และรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าผลการทดลองในโดเมนเวลาสอดคล้องกับผลการทดสอบเสถียรภาพของ

ระบบควบคุมแบบทำซ้ำในโดเมนความถี่ กล่าวคือตัวควบคุมแบบทำซ้ำที่ได้ออกแบบมาจากผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบจริง \hat{G} สามารถลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบที่ประมาณขึ้นมา \hat{G} ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่อเพิ่มจำนวนอัตราขยายที่ใช้ในระบบมากขึ้น อัตราการลดค่าความผิดพลาด (Convergence Rate) ในรอบถัดไปก็ยิ่งสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งเมื่อมีการใช้ตัวควบคุมแบบ 3 อัตราขยาย ($n = 3$) และกำหนดให้จำนวน $m = n$ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดในแกน Z มีค่าลดลงจาก 8.4265 ในรอบที่ 0 (รอบที่ยังไม่มีการใช้งานระบบควบคุมแบบทำซ้ำ) เป็น 0.0016 ในรอบที่ 20 และจะยังมีค่าลดลงอย่างช้าๆ ในรอบถัดๆ ไป ซึ่งผลการทดลองในแกน T ที่เกิดขึ้นก็จะมีลักษณะคล้ายกัน โดยค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดมีค่าลดลงจาก 1.7878 ในรอบที่ 0 เป็น 3.4629×10^{-4} ในรอบที่ 20 และจะยังมีค่าลดลงอย่างช้าๆต่อเนื่องไปเรื่อยๆ เมื่อมีการเพิ่มจำนวนอัตราขยายในตัวควบคุมจาก $n = 3$ เป็น $n = 5$ จะทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดลดลงอย่างเห็นได้ชัดในทั้ง 2 แกน อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนอัตราขยายจาก $n = 5$ เป็น $n = 10$ ไม่ได้ส่งผลทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดลดลงอย่างเห็นได้ชัดในทั้ง 2 แกน เราจึงนำเสนอวิธีการเลือกจำนวนอัตราขยายที่เหมาะสมในหัวข้อถัดไป

3. ผลการทดลอง

3.1 ข้อเสนอในการเลือกจำนวนอัตราขยาย n และ m

ในการเลือกจำนวนอัตราขยายที่จะใช้ในตัวควบคุมตามสมการที่ (9) นั้น เราจะพิจารณาจากค่าของ J ที่ได้จากสมการที่ (10) เนื่องจากค่าดังกล่าวแสดงประสิทธิภาพของตัวควบคุมในการลดค่าความผิดพลาดในรอบถัดไปตามสมการที่ (6) โดยค่า J ที่น้อยจะทำให้อัตราการลดค่าความผิดพลาดในรอบถัดไปสูงขึ้น ดังนั้นเราจึงทำการทดสอบค่า J จากสมการที่ (10) โดยใช้ตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูกปรับปรุงที่จำนวน n และ m ตามค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับแกน Z และตารางที่ 2 สำหรับแกน T



รูปที่ 13 ค่า J เปรียบเทียบกับจำนวนอัตราขยาย n ของระบบควบคุมแบบทำซ้ำที่มีเสถียรภาพ

จากตารางทั้ง 2 ตาราง ช่องที่มีสีเข้มแสดงถึงตัวควบคุมนั้นสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพเมื่อทดสอบจากสมการที่ (7) ซึ่ง n ที่มีค่ามากกว่า 3 ขึ้นไป (ยกเว้น $n = 4$) จะทำให้ระบบควบคุมแบบทำซ้ำมีเสถียรภาพ โดยมีค่า m ที่สอดคล้องเท่ากับค่า n ดังนั้นเราควรเลือกค่า m ให้มีค่าเท่ากับ n เพื่อการันตีความมีเสถียรภาพของระบบควบคุมแบบทำซ้ำ

เมื่อเราเลือกนาค่า J ของระบบควบคุมแบบทำซ้ำที่มีเสถียรภาพจากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 มาพล็อตเทียบกับจำนวนอัตราขยาย n ตามรูปที่ 13 เราจะพบว่าเมื่อเราเพิ่มจำนวนอัตราขยายจาก $n = 3$ มาเป็น $n = 5$ ค่า J จะลดลงอย่างมากในทั้ง 2 ระบบ โดย J จะลดลงจาก 13.4404 เป็น 4.0714 ในแกน Z และลดลงจาก 12.4449 เป็น 4.5150 ในแกน T แต่เมื่อเพิ่มจำนวนอัตราขยายให้มีค่ามากกว่า 5 ค่า J จะลดลงอีกเพียงเล็กน้อย ซึ่งผลในโดเมนเวลาอาจจะสังเกตเห็นค่าความผิดพลาดที่ลดลงได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 11 และรูปที่ 12 ดังนั้นค่า n และ m ที่เหมาะสมกับทั้ง 2 ระบบจะมีค่าเป็น $n = 5$ และ $m = 5$ ซึ่งจะเป็นค่าอัตราขยายที่ทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงได้มากโดยไม่ใช้จำนวนอัตราขยายเกินความจำเป็นเพราะหากใช้จำนวนอัตราขยายมากก็จะทำให้การคำนวณนั้นมากตามไปด้วย

ตารางที่ 1 ค่าฟังก์ชันต้นทุนของแกน Z

m \ n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	19.9133	20.0101	19.7306	19.9823	19.6763	19.7795	19.5745	19.4375	19.5127	19.4066
2	0	19.3602	17.9317	17.3661	17.7081	17.1787	17.4083	17.0269	16.9854	17.0188
3	0	0	13.4404	9.9099	10.4586	10.3726	10.1659	10.3332	10.0317	10.1383
4	0	0	0	5.6731	3.5934	4.2064	4.1480	4.1188	4.2297	4.1093
5	0	0	0	0		2.2941	2.7168	2.7194	2.6446	2.7583
6	0	0	0	0	0		2.3040	2.7333	2.7344	2.6687
7	0	0	0	0	0	0		2.0866	2.4618	2.4816
8	0	0	0	0	0	0	0		2.0669	2.4229
9	0	0	0	0	0	0	0	0		2.0544
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

ตารางที่ 2 ค่าฟังก์ชันต้นทุนของแกน T

m \ n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	19.9203	19.9688	19.5589	19.7990	19.5407	19.6081	19.4488	19.2966	19.3558	19.2506
2	0	18.7805	16.9382	16.0020	16.3389	15.7890	16.0032	15.6555	15.5899	15.6341
3	0	0	12.4449	8.3127	8.6419	8.5099	8.2763	8.4382	8.1316	8.2269
4	0	0	0	5.3979	2.9706	3.3787	3.2728	3.2144	3.3042	3.1492
5	0	0	0	0		2.3460	2.6032	2.5519	2.4574	2.5455
6	0	0	0	0	0		2.1996	2.4886	2.4334	2.3624
7	0	0	0	0	0	0		1.9007	2.1346	2.0968
8	0	0	0	0	0	0	0		1.8953	2.1178
9	0	0	0	0	0	0	0	0		1.8171
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบทำซ้ำ ประเภทต่างๆ สำหรับหุ่นยนต์แขนกล SEIKO D-TRAN RT3200 เพื่อลดระยะผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการทำงานแบบซ้ำไปซ้ำมาของหุ่นยนต์ โดยลักษณะการทำงานนี้จะเป็นการทำงานแบบต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ตัวควบคุมแบบทำซ้ำในแต่ละประเภทที่ได้ออกแบบมาถูกนำมาทดสอบความ มีเสถียรภาพของระบบก่อนที่จะถูกนำไปจำลองการทำงาน ซึ่งผลการทดสอบความมีเสถียรภาพ พบว่าตัวควบคุมแบบ ทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่ที่ถูก ปรับปรุงมีเสถียรภาพและความคงทนต่อความคลาดเคลื่อน ในการประมาณระบบมากกว่าตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วน

กลับเสมือนของระบบในโดเมนความถี่แบบเดิม ซึ่งเมื่อนำตัว ควบคุมแบบทำซ้ำจากส่วนกลับเสมือนของระบบในโดเมน ความถี่ที่ถูกปรับปรุงมาจำลองการทำงาน พบว่าตัวควบคุม ประเภทนี้สามารถลดค่าความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ซ้ำ ได้เป็นอย่างมากใน 15 รอบแรกของการทำซ้ำ และค่า ความผิดพลาดก็ยังคงค่อยๆลดลงต่อเนื่องไปในรอบการทำงาน ถัดๆ ไป ทั้งนี้ขอเสนอแนะในการเลือกจำนวนอัตราขยาย สำหรับตัวควบคุมประเภทนี้ได้ถูกอธิบายไว้ตอนท้ายเพื่อ ช่วยในการกำหนดรูปแบบของตัวควบคุมที่ทำให้ค่าความ ผิดพลาดจากการทำซ้ำลดลงได้มากที่สุดโดยไม่ใช้จำนวน อัตราขยายเกินความจำเป็นเพราะจะทำให้ลดเวลาในการ คำนวณได้



เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Panomruttanarug, W. Pornsukvittoon, and J. Pakkawanit, "A study of forward and inverse kinematics for 6-Link Robot Arm (Staubli RX 90)," *The Journal of KMUTNB*, vol. 27, no. 3, pp. 1-12, Jul. 2017 (in Thai).
- [2] V. Santibanez and R. Kelly, "A class of nonlinear pid global regulators for robot manipulators," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3601-3608, 1998.
- [3] J. Orrante-Sakanassi, V. Santibanez, and M. Hernández-Guzmán, "New tuning conditions for a class of nonlinear pid global regulators of robot manipulators," *International Journal of Control*, vol. 87, no. 4, pp. 728-741, Dec. 2013.
- [4] S. Alavandar and M. J. Nigam, "Fuzzy PD+ I control of a six DOF robot manipulator," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 35, no. 2, pp. 125-132, Mar. 2008.
- [5] H. Chaudhary, V. Panwar, N. Sukavanum, and R. Prasad, "Fuzzy PD+I based hybrid force/ position control of an industrial robot manipulator," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 1, pp. 429-436, 2014.
- [6] J. J. E. Slotine and L. Weiping, "Adaptive manipulator control: A case study," *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 995-1003, 1987.
- [7] C.-L. Chen and C.-J. Lin, "A sliding mode control approach to robotic tracking problem," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 35, no. 1, pp. 55-59, 2002.
- [8] K. Braikia, M. Chettouh, B. Tondou, P. Acco, and M. Hamerlain, "Improved control strategy of 2-sliding controls applied to a flexible robot arm," *Advanced Robotics*, vol. 25, no. 11-12, pp. 1515-1538, Jan. 2011.
- [9] M. Tomizuka, T.-C. Tsao, and K.-K. Chew, "Analysis and synthesis of discrete-time repetitive controllers," *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, vol. 111, no. 3, pp. 353-358, 1989.
- [10] C. Cosner, G. Anwar, and M. Tomizuka, "Plug in repetitive control for industrial robotic manipulators," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1970-1975, 1990.
- [11] B. Zhang, D. Wang, K. Zhou, and Y. Wang, "Linear phase lead compensation repetitive control of a CVCF PWM inverter," *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, vol. 55, no. 4, pp. 1595-1602, Apr. 2008.
- [12] X. H. Wu, S. K. Panda, and J. X. Xu, "Design of a plug-in repetitive control scheme for eliminating supply-side current harmonics of three phase pwm boost rectifiers under generalized supply voltage conditions," *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, vol. 25, no. 7, pp. 1800-1810, Jul. 2010.
- [13] E. Kurniawan, Z. Cao, and Z. Man, "Design of robust repetitive control with time-varying sampling periods," *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, vol. 61, no. 6, pp. 2834-2841, Jun. 2014.
- [14] B. Panomruttanarug and R.W. Longman, "Repetitive controller design using optimization in frequency domain," in *Proceedings of the 2004 AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit*, Aug. 2004.

- [15] B. Panomruttanarug and R. W. Longman, “Frequency based optimal design of FIR zero phase filters and compensators for robust repetitive control,” *Advances in the Astronautical Sciences*, vol. 123, pp. 219–238, 2005.
- [16] Seiko RT 3200. Seiko. California, United States [Online]. Available: http://web.cecs.pdx.edu/~mperkows/CLASS_ROBOTICS/2001/seikoRT3200.pdf
- [17] R. W. Longman, “Iterative learning control and repetitive control for engineering practice,” *International Journal of Control*, vol. 73, no. 10, pp. 930–954, 2000.