การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ขอนแก่น

เทคนิคการปรับค่าอย่างอัตโนมัติของการควบคุมแบบทำซ้ำในเวลาจริง

Automated Tuning Technique for Real-Time Repetitive Control

สุทธิรักษ์ ทองอรัญญิก[1] สาทิสส์ ทรงชน[2]
ภาควิศวกรรมเครื่องกลและสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม(ฟีโบ้) คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 104140
โทรศัพท์ 0-2470-9339, E-mail: t_suttiruk@yahoo.com[1], songschon@fibo.kmutt.ac.th[2]

Suttiruk Thongaranyik[1] Szathys Songschon[2]
Department of Mechanical Engineering and Institute of Field Robotics,
Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi,
91 Pracha U-Thi Khon Kaen Road, Bangmod Sub-district, Khet Thongkru, Bangkok 10140, Thailand
Tel: 0-2470-9339, E-mail: t_suttiruk@yahoo.com[1], songchon@fibo.kmutt.ac.th[2]

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ เสนอเทคนิคในการปรับค่าของตัวแปรภายในตัวควบคุมแบบทำซ้ำกับตัวกรองแบบไร้เฟสในเวลาจริงแบบอัตโนมัติ ทั้งในแบบการจำลองเชิงตัวเลข และการทดสอบจริงกับหุ่นยนต์สการา แบบ 2 แกน เราใช้ตัวกรองความถี่ไร้เฟสในเวลาจริงเพื่อตัดสัญญาณความถี่สูงออกเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพยาวนาน จากการทดสอบหุ่นยนต์สการาทดสอบพบว่าสำหรับหุ่นยนต์สการาแกนที่ 1 ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID จะมีค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่อหนึ่งรอบประมาณ 0.1032° และแกนที่ 2 เท่ากับ 0.1399° และเมื่อเปลี่ยนตัวควบคุมแบบทำซ้ำที่แกนที่ 1 ให้ค่าการเรียนรู้ เท่ากับ 0.1 ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 23.5 เฮิรตซ์ ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่อหนึ่งรอบประมาณ 0.0041° ที่คาบการทำงานที่ 20 และเมื่อเปลี่ยนตัวควบคุมแบบทำซ้ำที่แกนที่ 2 ให้ค่าการเรียนรู้ เท่ากับ 0.2 ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 11 เฮิรตซ์ ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่อหนึ่งรอบประมาณ 0.0118° ที่คาบการทำงานที่ 16 เทคนิคในการปรับค่าของตัวแปรภายในตัวแบบอัตโนมัตินี้จะให้ผลลัพธ์ในการติดตามวิถีการเคลื่อนที่ได้ดีกว่าโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยการปรับค่าอัตราการเรียนรู้และค่าความถี่ตัดด้วยมืออีก

Abstract

An automated tuning technique for real-time repetitive control with zero-phase filter is purposed in this paper. This technique has been tested by both simulation and experiment. The real-time zero-phase filter is used to cut off the high frequencies in order to get a long term stability result. We use the SCARA robot with existing PID controller as a testbed. With existing PID controller, tracking errors (root mean square error) of link 1 and link 2 are 0.1032° and 0.1399° respectively. When the purposed technique are used with final learning gain 0.1 and 23.5 Hz frequency cutoff for link 1 the tracking error is reduced to 0.0041° at the 20th repetition and for link 2 with final learning gain 0.2 and 11 Hz frequency cutoff the tracking error is reduced to 0.0118° at the 16th repetition. The results show that the automated tuning technique yield better performance in tracking the desired trajectory without manual adjusting learning gain and frequency cutoff.

1. บทนำ

ระบบควบคุมแบบทำซ้ำ (repetitive control) จะใช้ในระบบที่มีการทำงานเป็นคาบและต้องการคำสั่งในการทำงานซ้ำๆในแต่ละรอบการทำงานเพื่อลดค่าความผิดพลาดในการติดตามของแต่ละรอบการทำงาน [1] ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบ และสำหรับงานที่มีแนวทางการเคลื่อนที่ที่เป็นแบบซ้ำๆดังกล่าว เราจะพบว่าการควบคุมแบบทำซ้ำจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการควบคุมแบบพื้นฐานมาก ประสิทธิภาพในการลดค่าความผิดพลาดในการติดตามของการควบคุมแบบทำซ้ำนั้น สามารถส่งเสริมได้ด้วยการปรับค่าของตัวพารามิเตอร์เพียง 2-3 ตัวเท่านั้น

ในบทความนี้จะมุ่งเน้นถึงการปรับค่าของตัวแปรภายในการควบคุมแบบทำซ้ำกับตัวกรองแบบไร้เฟสในเวลาจริง ภายใต้การลดลงเพียงอย่างเดียวของความผิดพลาดของการติดตาม (monotonic decreasing of tracking error) และการมีพฤติกรรมของการมีเสถียรภาพอย่างยาวนาน (long term stability behavior) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ของตัวควบคุม เพื่อทำให้เกิดการเรียนรู้ที่เร็วที่สุด และทำให้ระดับค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (steady state error level) มีค่าที่พึงพอใจ ได้ตลอดช่วงการทำงาน ทั้งยังช่วยปรับเปลี่ยนค่าการควบคุม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงไปของระบบ

เนื่องจากความไม่แน่นอน โดยไม่ต้องอาศัยการปรับค่าจากผู้ออกแบบตัวควบคุม

2. การควบคุมแบบทำซ้ำ

2.1 หลักการทำงานของการควบคุมแบบทำซ้ำ

การควบคุมแบบทำซ้ำ เป็นการควบคุมที่ใช้การปรับค่าสัญญาณขาเข้าของระบบ แทนที่จะเป็นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในระบบควบคุม โดยการปรับคำสั่งที่ให้กับระบบนั้น ทำได้โดยการใช้ค่าของความผิดพลาดของการควบคุมในคาบการทำงานที่ผ่านมา มาปรับปรุงการทำงานในรอบการทำงานปัจจุบัน ซึ่งเราสามารถเขียนสมการควบคุมแบบทำซ้ำได้โดย พิจารณาสัญญาณขาเข้าที่ใช้ควบคุมในเวลาปัจจุบัน *(k)* ซึ่งได้จากการนำข้อมูลจากสัญญาณขาเข้าที่คาบที่ผ่านมา ณ ระยะเวลาเดียวกัน เมื่อเทียบกับขั้นเวลาหนึ่งคาบ *(p)* รวมกับค่าผลคูณของค่าคงที่ของการเรียนรู้ (ϕ) กับค่าของความผิดพลาดในการติดตามในช่วงเวลาที่เหมาะสม โดยสมมติให้เป็น $k-p+\gamma$ เพราะฉะนั้นเราสามารถเขียนเป็นสมการของกฎการควบคุมแบบทำซ้ำได้คือ

$$u(k)=u(k-p)+\phi e(k-p+\gamma) \quad (1)$$

เมื่อ k คือขั้นเวลาปัจจุบัน (current time step)

2.2 ความมีเสถียรภาพของการควบคุมแบบทำซ้ำ

เมื่อพิจารณาความมีเสถียรภาพของการควบคุมทำซ้ำ เราจะพบว่าเมื่อนำตัวควบคุมแบบทำซ้ำไปใช้ในการควบคุมระบบ ในช่วงแรกค่าของความผิดพลาดจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ในช่วงต่อมาค่าของความผิดพลาดกลับเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ เราสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากเงื่อนไขของความมีเสถียรภาพของการควบคุมแบบทำซ้ำ

สำหรับสมการเสถียรภาพของการควบคุมแบบทำซ้ำเมื่อพิจารณาที่โดเมนซี เราสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2)

$$\left|1-z^{\gamma}\Phi(z)G(z)\right|<1 \quad (2)$$

และเมื่อพิจารณาเงื่อนไขของเสถียรภาพของผลตอบสนองเชิงความถี่ เราสามารถแทน $z=e^{i\omega T}$ ลงในสมการที่ (2) จะทำให้เราสามารถหาเงื่อนไขของสภาวะเสถียรภาพของผลตอบสนองเชิงความถี่ ได้คือ

$$\left|1-e^{i\omega T\gamma}\Phi\left(e^{i\omega T}\right)G\left(e^{i\omega T}\right)\right|<1 \quad (3)$$

สำหรับทุกๆ $z=e^{i\omega T}$ และ ω ที่มีค่าตั้งแต่ศูนย์จนถึงความถี่ไนควิสต์

จากเงื่อนไขของความมีเสถียรภาพของผลตอบสนองเชิงความถี่ตามสมการที่ (3) เราจะพบว่าเมื่อเกิดความถี่สูงขึ้นถึงระดับหนึ่ง จะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมแบบทำซ้ำ มีความมีเสถียรภาพ จำเป็นต้องตัดช่วงของความถี่สูงที่ทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพออกไป

2.3 ตัวกรองแบบไร้เฟสแบบความถี่ต่ำผ่าน

จากเงื่อนไขของความมีเสถียรภาพของผลตอบสนองเชิงความถี่ของการควบคุมแบบทำซ้ำ ตามสมการที่ (3) นั้น มีระบบน้อยมากที่จะสอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าว เพราะฉะนั้นการที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพอยู่ได้ จำเป็นต้องตัดความถี่ในส่วนของความถี่สูงออก ซึ่งการใช้ตัวกรองนับเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่ง ซึ่งการเลือกตัวกรองที่จะนำมาใช้ในการกรองความถี่สูงนั้น เราจะเลือกใช้ตัวกรองความถี่แบบไร้เฟสความถี่ต่ำผ่าน กล่าวคือ ถ้าเราใช้ตัวกรองความถี่ต่ำธรรมดา อาจทำให้เกิดความล่าช้าของเฟส (phase lag) ซึ่งเมื่อพิจารณาเส้นทางของความถี่ไนควิสต์ จะพบว่า ความล่าช้าของเฟส จะทำให้เส้นทางของความถี่ไนควิสต์ออกนอกวงกลมหนึ่งหน่วยเร็วขึ้น โดยหลักการทำงานของตัวกรองความถี่ไร้เฟส มีหลักการง่ายๆ คือป้อนสัญญาณเข้าสู่ตัวกรอง แล้วจากนั้นนำสัญญาณที่ได้มากลับลำดับสัญญาณแล้ว จึงนำสัญญาณเข้าสู่ตัวกรองอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเราจะพบว่าสัญญาณที่ผ่านตัวกรองแบบไร้เฟสนั้นจะถูกลดทอนแอมปลิจูดสองครั้งจากสมการตัวกรองที่เลือกใช้ ส่วนเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปในตอนแรกก็จะเปลี่ยนแปลงอีกครั้งแต่จะเป็นในทิศทางตรงกันข้ามทำให้การเปลี่ยนแปลงเฟสนั้นหักล้างกันหมดไป เพราะฉะนั้นเฟสของสัญญาณที่ผ่านตัวกรองนี้ จะเท่ากับเฟสของสัญญาณเดิม เนื่องจากตัวกรองแบบไร้เฟสเป็นการป้อนสัญญาณ เดินหน้าและถอยหลัง ดังนั้นเราจึงสามารถใช้ตัวกรองชนิดนี้ได้เฉพาะสัญญาณที่มีการบันทึกค่าไว้ก่อนแล้วเท่านั้น เพราะฉะนั้นตามธรรมดาแล้วเราไม่สามารถนำตัวกรองแบบไร้เฟสมาประยุกต์ใช้ในเวลาจริงได้ แต่ถ้าอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมและการคำนวณมีความเร็วเพียงพอก็สามารถที่จะทำได้ โดยเราสามารถเขียนสมการของการนำตัวกรองไร้เฟสมาใช้ร่วมกับการควบคุมแบบทำซ้ำได้ดังสมการที่ (4) เมื่อกำหนดให้ $F(z)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองแบบไร้เฟส

$$|F(z)[1-\Phi(z)z^{\gamma}G(z)]|<1 \quad (4)$$

สำหรับทุกๆ $z=e^{i\omega T}$ และ ω ที่มีค่าตั้งแต่ศูนย์จนถึงความถี่ไนควิสต์

3. เทคนิคการปรับค่าอย่างอัตโนมัติของการควบคุมแบบทำซ้ำ

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของการลดลงของความผิดพลาดของการควบคุมแบบทำซ้ำ เราจะพบว่าการลดลงของความผิดพลาดจะขึ้นกับการปรับตัวพารามิเตอร์ ภายในกฎของการควบคุมแบบทำซ้ำเพียง 2-3 ตัวเท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบควบคุม ในการปรับตัวแปรเหล่านี้ จึงทำให้เกิดคำถามว่าจะมีวิธีใดที่จะทำให้เกิดการปรับตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างอัตโนมัติ โดยไม่ต้องการความช่วยเหลือจากผู้ออกแบบควบคุม ซึ่งเทคนิคการปรับค่าอย่างอัตโนมัตินับเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่งสำหรับช่วยแก้ปัญหานี้ [3]

ปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดขึ้นกับการควบคุมแบบทำซ้ำคือ การที่ความผิดพลาดลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่เริ่มต้น ซึ่งความผิดพลาดในการติดตามนั้นน่าจะลดลงเข้าสู่ศูนย์ แต่แล้วความผิดพลาดกลับมีค่าที่เพิ่มขึ้น และจากปรากฏการณ์นี้ ทำให้เกิดแนวคิดที่เรียก ทฤษฎีการคงค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด (method of keeping the minimal error) ซึ่งเราจะเลือกหยุดการเรียนรู้เมื่อระบบมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด และจะคงค่าการเรียนรู้ที่มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ในการทำงานคาบต่อไป ซึ่งผลของการจำลองทางตัวเลขค่าระดับความผิดพลาดจะคงที่ แต่เมื่อนำทฤษฎีการคงค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดมาทดสอบจริง กลับพบว่าค่าของความผิดพลาดกลับไม่คงที่ กล่าวคือ ค่าผิดพลาดจะยังคงเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบจริงนั้น ระบบจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น ที่ลำดับ $k+2p$ และที่ลำดับ $k+3p$ ค่าความผิดพลาดที่ใช้

ในกฎการทำซ้ำเดียวกัน อาจไม่สามารถทำให้ผลที่เกิดขึ้นเหมือนกันก็เป็นได้ ทำให้แนวคิดนี้ตกลงไป ดังนั้นเราควรเริ่มพิจารณาจากการมีเสถียรภาพของการควบคุมแบบทำซ้ำเสียก่อน

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขของสภาวะเสถียรภาพ ดังสมการที่ (3) เราจะพบว่า จะมีจุดบางจุดของเส้นทางไนควิสต์อยู่นอกวงกลมหนึ่งหน่วย เมื่อกำหนดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมหนึ่งหน่วยอยู่ที่ แกนจริงเท่ากับบวกหนึ่งและแกนจินตภาพเท่ากับศูนย์ ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมแบบทำซ้ำนั้น ระบบจะมีเสถียรภาพ ก็ต่อเมื่อเส้นทางไนควิสต์ ของระบบจะต้องอยู่ภายในวงกลมหนึ่งหน่วยทั้งหมด ทำให้เรารู้ว่า เส้นทางไนควิสต์ในส่วนที่อยู่นอกวงกลมหนึ่งหน่วยจะเป็นปัจจัยที่ทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะไม่มีเสถียรภาพ สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกตัดความถี่ที่ทำให้ระบบไม่มีเสียรภาพโดยใช้ตัวกรองไร้เฟสผ่านความถี่ต่ำ โดยตัวกรองไร้เฟสผ่านความถี่ต่ำจะช่วยในการปรับสัญญาณความผิดพลาด ที่จะนำไปใช้กับกฎการควบคุม เพื่อกำจัดเทอมของความถี่สูง ซึ่งเราจะพบว่า ระบบจะมีความมีเสถียรภาพในช่วงเวลาหนึ่ง แต่แล้วเมื่อระบบทำงานต่อไป ค่าของความผิดพลาดกลับยังมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เรารู้ว่าตัวกรองไร้เฟสผ่านความถี่ต่ำจะช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น แต่จะยังไม่สามารถช่วยในเรื่องของการมีเสถียรภาพอย่างยาวนานได้ เนื่องจากเหตุผลหลายประการเช่น เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองเราจะพบว่า ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองไม่สามารถตัดค่าความถี่ ณ จุดนั้นได้อย่างสมบูรณ์ หรือจากพฤติกรรมของตัวกรองเอง เช่น ตัวกรองบัตเตอร์เวอร์ทที่อันดับ (order) สูงๆ จะตัดช่วงความถี่ได้เร็วมาก แต่จะเกิดสัญญาณที่มีขนาดเล็กๆออกมาด้วย และเมื่อเราทำงานไปเรื่อยๆ จะทำให้ในที่สุดแล้วขนาดของสัญญาณเล็กๆนี้ เพิ่มขนาดมากขึ้น และถ้าสัญญาณเล็กๆนั้นอยู่นอกวงกลมหนึ่งหน่วย จะทำให้ระบบเข้าสู่ความไม่มีเสถียรภาพในที่สุด

เมื่อพิจารณาจากปรากฏการณ์ข้างต้น เราสามารถหาแนวทางในการแก้ปัญหาได้สองแนวทาง คือ

1. การควบคุมความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ในแต่ละคาบ โดยจะพิจารณาจากการลดลงเพียงอย่างเดียวของค่าความผิดพลาด เพราะฉะนั้น ถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย เกิดเพิ่มขึ้น เราจะลดความถี่ตัดให้น้อยลงเพื่อนำบางส่วนของสัญญาณที่มีความถี่สูงออกไป

2. การพิจารณาการแปลงฟูริเยร์อย่างเร็ว ของทุกๆคาบ ของสัญญาณความผิดพลาด ซึ่งวิธีนี้สามารถบอกถึงค่าความผิดพลาด และรวมถึงค่าความถี่ตัดที่เหมาะสม แต่วิธีนี้จำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องคำนวณที่มีสมรรถนะสูง และทำในเวลาจริงได้ยาก

สำหรับงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้วิธีการควบคุมค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ในแต่ละคาบ ซึ่งน่าจะเป็นวิธีที่ดีที่สุด โดยการออกแบบการปรับค่า เราจะพบว่ามีตัวแปรที่เราสามารถจะทำการปรับได้ทั้งหมด 3 ตัวแปรด้วยกันคือ ค่าการเรียนรู้, ค่าเฟสล้ำหน้าเชิงเส้น และค่าความถี่ตัด โดยเมื่อเราพิจารณาค่าการเรียนรู้ เมื่อกำหนดให้ตัวแปรอื่นคงที่ เราจะพบว่าที่ค่าการเรียนรู้ ที่มีค่าสูง จะทำให้การลดลงของค่าความผิดพลาดเกิดอย่างรวดเร็ว แต่ระดับค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุด จะลดลงอยู่ที่ระดับหนึ่งเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการเรียนรู้ที่มีค่าน้อยกว่า ที่ทำให้ระดับค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุดลดลงน้อยกว่า แต่ค่าการเรียนรู้ที่น้อยกว่า ก็จะทำให้การลดลงของค่าความผิดพลาดเกิดอย่างล่าช้าเพราะฉะนั้นเราจะได้ความสัมพันธ์ของการลดลงของค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย จะแปรผกผันกับระดับค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุด ดังที่แสดงในรูปที่ 1 เมื่อกำหนดให้สัญญาณขาเข้าเป็นไปดังสมการที่ (5)

$$y_d(t) = [1 - \cos(2\pi t / P)](\theta_{\max} / 2) \qquad (5)$$

และกำหนดให้ P = 5 วินาที และ $\theta_{\max}$ = 90 องศา โดยระบบที่ใช้ทดสอบจะเป็นระบบอันดับที่ 3 ตามสมการที่ (6)

$$G(s) = K_c \left(\frac{d}{s+d} \right) \left(\frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \right) \qquad (6)$$

เมื่อ $K_c = 1, d = 8.8, \zeta = 0.5, \omega_0 = 37$ รอบต่อวินาที, ค่าอัตราการเรียนรู้เท่ากับ 1.0 และค่าเฟสล้ำหน้าเชิงเส้น γ = 1 และกำหนดค่าการสุ่มสัญญาณเท่ากับ 0.01 วินาที

และจากสมการเสถียรภาพของการเรียนรู้ซ้ำ ทำให้เรารู้ว่าช่วงของค่าการเรียนรู้จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 2 [2] ทำให้เราได้แนวทางที่ว่า เราควรเลือกค่าการเรียนรู้ที่สูงก่อนเพื่อทำให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลดลงอย่างรวดเร็ว แล้วทำการลดค่าของการเรียนรู้ลง เพื่อลดระดับของค่าระดับความผิดพลาดที่น้อยที่สุด ต่อมาเราจะพิจารณาค่าความถี่ตัด โดยเรามีแนวคิดที่ว่า การเรียนรู้ที่ใช้ความถี่ที่มากที่สุด ที่ยังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพอยู่ได้ ย่อมดีกว่าการตัดช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งออกไป เพราะฉะนั้นจากแนวคิดนี้ ทำให้เรารู้ว่าการเลือกความถี่ตัดที่ดีที่สุด คือ การเลือกความถี่สุดท้ายก่อนออกนอกวงกลมหนึ่งหน่วย ต่อไปเราจะพิจารณาความสัมพันธ์ของ ค่าการเรียนรู้และค่าความถี่ตัด ซึ่งเราจะพิจารณาจากเส้นทางไนควิสต์ที่ค่าการเรียนรู้ค่าหนึ่ง และเมื่อเราเพิ่มค่าของการเรียนรู้ เราจะพบว่าที่ค่าการเรียนรู้ที่สูงกว่า เส้นทางไนควิสต์จะออกจากวงกลมหนึ่งหน่วยเร็วกว่า ดังรูปที่ 2 ซึ่งทำให้เรารู้ว่า ค่าการเรียนรู้ ที่มีค่าน้อย จะเรียนรู้ได้ที่ความถี่ที่สูงกว่าค่าการเรียนรู้ที่สูง เพราะฉะนั้นเมื่อเราเพิ่มค่าการเรียนรู้ เราก็จะต้องลดค่าของความถี่ตัดลงมา เพื่อทำให้ระบบยังคงอยู่ในสภาวะที่มีเสถียรภาพ กล่าวง่ายๆคือ ค่าการเรียนรู้จะแปรผกผันกับค่าความถี่ตัด ส่วนค่าของเฟสล้ำหน้าเชิงเส้นนั้นเป็นค่าเฉพาะตัวต่อการควบคุมในระบบหนึ่งๆเท่านั้น จากความสัมพันธ์ทั้งหลายเหล่านี้ ทำให้เราเสนอหลักการควบคุมแบบอัตโนมัติได้ดังต่อไปนี้นี้

1. กำหนดช่วงเวลาของการมีเสถียรภาพอย่างยาวนาน ซึ่งจะพิจารณาจากช่วงเวลาที่ใช้งานจริง

2. หาค่าเฟสล้ำหน้าเชิงเส้นที่เหมาะสม โดยใช้กฎการควบคุมแบบทำซ้ำ ซึ่งจะกำหนดค่าการเรียนรู้ในช่วง 0.25 ถึง 1 (เพื่อไม่ให้มีผลกระทบเนื่องจากค่าการรบกวนต่างๆ) เลือกค่าเฟสล้ำหน้าเชิงเส้นที่ทำให้ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด

3. หาเส้นความสัมพันธ์ของค่าการเรียนรู้และค่าความถี่ตัด โดยเริ่มจากค่าการเรียนรู้ต่ำๆ ก่อน เลือกค่าความถี่ตัดที่เป็นไปได้ โดยกำหนดให้มีค่าต่ำไว้ก่อน แล้วค่อยๆเพิ่มค่าความถี่ตัดไปเรื่อยๆจนระบบเข้าสู่สภาวะความไม่มีเสถียรภาพ โดยดูได้จากค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ที่เพิ่มขึ้นแล้วจึงลดค่าความถี่ตัดลงมา ถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยยังคงเพิ่มขึ้น ก็ลดค่าความถี่ตัดลงมาอีก โดยเปลี่ยนค่าการเรียนรู้ระหว่าง 0 ถึง 2 ซึ่งจากเส้นความสัมพันธ์ของค่า

การเรียนรู้และค่าความถี่ตัดนี้ จะทำให้เราได้แนวทางในการปรับค่าอย่างอัตโนมัติ โดยพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเรียนรู้และความถี่ตัด จะเป็นพื้นที่ ที่การควบคุมจะมีเสถียรภาพตลอดเวลา

4. เลือกค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ยอมรับได้ในการใช้งานมากที่สุดในการทำงาน และค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่จะใช้งาน ซึ่งสามารถดูได้จากขั้นตอนที่ 3

5. กำหนดเงื่อนไขของการควบคุม กล่าวคือทำการควบคุมตามเส้นทางความสัมพันธ์ของค่าการเรียนรู้และค่าความถี่ตัด โดยเริ่มจากค่าการเรียนรู้ที่สูงก่อนแล้วค่อยลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งได้ ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ต้องการ แล้วทำการคงค่าการเรียนรู้และค่าความถี่นั้นไว้

6. กำหนดเงื่อนไขที่ 2 กล่าวคือ ที่ค่าการเรียนรู้และค่าความถี่ตัดที่คงค่าไว้ ณ เวลาหนึ่งค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย อาจเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากความไม่แน่นอนของระบบ หรือการเปลี่ยนไปด้วยเหตุอื่นๆของระบบ โดยเราจะลดค่าของค่าความถี่ตัดลงมา จนทำให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ยอมรับได้คงที่ และถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ เราจะหยุดการทำงาน และกลับมาซ่อมแซมระบบ

รูปที่ 3 จะแสดงการใช้เทคนิคการปรับค่าอย่างอัตโนมัติโดยจะแบ่งช่วงการควบคุมออกเป็น 3 ช่วง ประกอบด้วย ช่วงแรกการควบคุมจะใช้ค่าการเรียนรู้ เท่ากับ 0.8 ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 1.4 เฮิรตซ์ ในช่วงที่สองค่าการเรียนรู้ เท่ากับ 0.4 ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 2.1 เฮิรตซ์ และช่วงสุดท้าย ค่าการเรียนรู้ เท่ากับ 0.2 ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 2.5 เฮิรตซ์ โดยจะเปลียนการควบคุมจากช่วงหนึ่งไปอีกช่วงหนึ่งเมื่อค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยเริ่มคงที่

4. การทดสอบจริง

ชุดทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้หุ่นยนต์สการาเฉพาะ 2 แกน ซึ่งเป็นมอเตอร์แบบขับตรงรุ่น RS1410 และรุ่น RS0608 ของบริษัท Nippon Seiko K.K. (NSK) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4 และในส่วนโปรแกรมและระบบปฏิบัติการที่ใช้ จะใช้ Simulink ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม Matlab และ xPC – Target Kernel ในส่วนของ Real – Time Kernel เป็นระบบปฏิบัติการ

ในการทดสอบด้วยตัวควบคุมแบบ PID กับหุ่นยนต์สการาเมื่อกำหนดให้สัญญาณขาเข้า เป็นไปตามสมการที่ (5) เราจะพบว่าค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยในแกนที่ 1 จะเท่ากับ 0.1032 และในแกนที่ 2 จะเท่ากับ 0.1399

ในส่วนของการทดสอบโดยใช้เทคนิคการปรับค่าของการควบคุมแบบทำซ้ำในเวลาจริงกับหุ่นยนต์สการานั้น เราจะทำตามขั้นตอนในหัวข้อที่ผ่านมา โดยเริ่มจาก

1. การกำหนดช่วงเวลาของการมีเสถียรภาพอย่างยาวนาน ในงานวิจัยนี้จะกำหนดช่วงเวลาในการทำงาน เท่ากับ 600 วินาที ซึ่งเท่ากับ 120 รอบการทำงาน

2. การหาค่าเฟสล้ำหน้าเชิงเส้นที่เหมาะสมของหุ่นยนต์ สการาแกนที่ 1 เราจะกำหนดให้หุ่นยนต์สการาแกนที่ 2 เคลื่อนที่ด้วยการควบคุมแบบ PID และแขนหุ่นยนต์สการาแกนที่ 1 เคลื่อนที่ด้วยการควบคุมแบบการควบคุมแบบทำซ้ำโดยให้ค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.5 และให้ค่าเฟสล้ำหน้าเชิงเส้นมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 7 โดยรูปที่ 5 จะแสดงค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยเมื่อให้ค่าเฟสล้ำหน้าเชิงเส้นเป็นค่าต่างๆ ซึ่งจะพบว่าค่าเฟสล้ำหน้าเชิงเส้นที่ทำให้ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 5 และในทำนองเดียวกันกับแขนหุ่นยนต์สการาแกนที่ 2 ค่าเฟสล้ำหน้า เชิงเส้นที่ทำให้ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด จะมีค่าเท่ากับ 2

3. สำหรับการหาเส้นความสัมพันธ์ของค่าการเรียนรู้และค่าความถี่ตัดของหุ่นยนต์สกร่าแกนที่ 1 จะกำหนดให้หุ่นยนต์สการาแกนที่ 2 เคลื่อนที่ด้วยการควบคุมแบบ PID และหุ่นยนต์สการาแกนที่ 1 เคลื่อนที่ด้วยการควบคุมแบบทำซ้ำและจะเปลี่ยนความถี่ตัด จนกระทั่งหุ่นยนต์สการา มีความมีเสถียรภาพ และในทำนองเดียวกันกับหุ่นยนต์สการาแกนที่ 2 โดยรูปที่ 6 จะแสดงเส้นความสัมพันธ์ของค่าการเรียนรู้และค่าความถี่ตัดของหุ่นยนต์สกร่าแกนที่ 1 และแกนที่ 2

4. การเลือกค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ยอมรับได้มากที่สุดในการใช้งาน สำหรับหุ่นยนต์สการาแกนที่ 1 เราจะพบว่าค่าประมาณความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุด จะเท่ากับ 0.00405 ที่ค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.1 และความถี่ตัด 23.5 เฮิรตซ์ เราเลือกค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ยอมรับได้มากที่สุดสำหรับหุ่นยนต์สการาแกนที่ 1 เท่ากับ 0.005 และค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่จะทำการใช้งานเท่ากับ 0.0041 สำหรับหุ่นยนต์สการาแกนที่ 2 เราจะพบว่าค่าประมาณความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุดจะเท่ากับ 0.0118 ที่ค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.2 ที่ความถี่ตัด 11 เฮิรตซ์ เราเลือกค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ยอมรับได้มากที่สุดสำหรับหุ่นยนต์สการาแกนที่ 2 เท่ากับ 0.015 และค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่จะทำการใช้งานเท่ากับ 0.0125

5. การกำหนดเงื่อนไขของการควบคุม สำหรับหุ่นยนต์สการาแกนที่ 1 จะเลือกช่วงการควบคุมเป็น 2 ช่วง ประกอบด้วย ค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.8 ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 2.8 เฮิรตซ์ และค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.1 ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 23.5 เฮิรตซ์ โดยจะเปลี่ยนช่วงการควบคุมเมื่อค่าความผิดพลาดของค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.8 เริ่มคงที่ ซึ่งจะประมาณ 7 รอบการทำงาน รูปที่ 7 จะแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.1 ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 23.5 เฮิรตซ์ และการการแบ่งช่วงการทำงานเป็นสองช่วง สำหรับหุ่นยนต์สการาแกนที่ 2 จะเลือกช่วงการควบคุมเป็น 2 ช่วง ประกอบด้วย ค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.8 ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 4.4 เฮิรตซ์ และค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.2 ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 11 เฮิรตซ์ โดยจะเปลี่ยนช่วงการควบคุมเมื่อค่าความผิดพลาดของค่าการเรียนรู้เท่ากับ 1 เริ่มคงที่ ซึ่งจะประมาณ 6 รอบการทำงาน รูปที่ 8 จะแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.2 ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 11 เฮิรตซ์ และการแบ่งช่วงการทำงานเป็นสองช่วง

6. การกำหนดเงื่อนไขที่ 2 จะเป็นทำให้ระบบมีเสถียรภาพอยู่ตลอดเวลาในการทำงาน และยังคงรักษาระดับค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ สำหรับหุ่นยนต์สการาแกนที่ 1 จะเพิ่มช่วงการควบคุมมาอีกหนึ่งช่วงคือ ค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.1 ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 22 เฮิรตซ์ โดยช่วงการควบคุมนี้จะไม่เกินค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ยอมรับได้ ที่

0.005 และตั้งเงื่อนไขว่าในช่วงการควบคุมที่ 2 ถ้าค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย เกินกว่าค่า 0.0041 ใน 4 รอบการทำงานแล้ว ให้มาที่ช่วงการควบคุมที่ 3 ซึ่งจากทดสอบจริงเราจะพบว่าค่าของความผิดพลาดจะมีการแกว่งไปมาในช่วงแคบๆ และค่าความผิดพลาด 0.0041 เป็นเพียงค่าเฉลี่ย โดยตั้งสมมติฐานว่าถ้าค่าความผิดพลาดเพิ่มขึ้นมากกว่า 0.0041 ใน 4 รอบการทำงานติดต่อกันแล้วค่าความผิดพลาดก็น่าจะมีแนวโน้มสูงขึ้น พร้อมยังตั้งเงื่อนไขเพิ่มขึ้นอีกข้อหนึ่งด้วยคือ เมื่อเปลี่ยนช่วงการทำงานจากช่วงที่ 2 มาช่วงที่ 3 แล้วถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 0.0041 ใน 4 รอบการทำงานติดต่อกัน ให้กลับมาสู่การควบคุมในช่วงที่ 2 เพื่อให้แน่ใจว่าการเพิ่มขึ้นของความผิดพลาดเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงไปของระบบ ในช่วงเวลานั้น แต่ถ้าค่าความผิดพลาดยังคงมากกว่า 0.0041 ใน 4 รอบการทำงานติดต่อกัน ที่ช่วงการควบคุมที่ 3 ก็ไม่ต้องกลับมาสู่ช่วงการควบคุมที่ 2 รูปที่ 13 จะแสดงการควบคุมโดยใช้ค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.1 ค่าความถี่ตัด 23.5 เฮริตซ์ การใช้เทคนิคการปรับค่าโดยไม่ใช้เงื่อนไขที่ 2 และการใช้เทคนิคการปรับค่าที่ใช้ทุกเงื่อนไข ที่ช่วงเวลาการทำงานมากกว่าค่าของการมีเสถียรภาพอย่างยาวนาน 3 เท่า สำหรับหุ่นยนต์สการาแกนที่ 2 ก็จะใช้แนวทางเดียวกับหุ่นยนต์สการาแกนที่ 1 โดยช่วงของเงื่อนไขที่ 2 จะเลือกค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.2 และค่าความถี่ตัด 9.5 เฮิรตซ์

5. สรุป

เราจะพบว่าจากการควบคุมในลักษณะนี้ เราสามารถทำให้ค่าความผิดพลาดเข้าสู่ระดับความผิดพลาดที่สภาวะคงที่ ที่ต้องการได้เร็วขึ้นกว่าที่เราจะใช้การควบคุมแบบทำซ้ำเพียงช่วงเดียว และยังทำให้ระบบมีเสถียรภาพอย่างยาวนาน ถึงแม้ว่าระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงไป เช่น เกิดการสึกกร่อน เพราะการปรับนี้ จะลดค่าของความถี่ตัดโดยอัตโนมัติ ตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

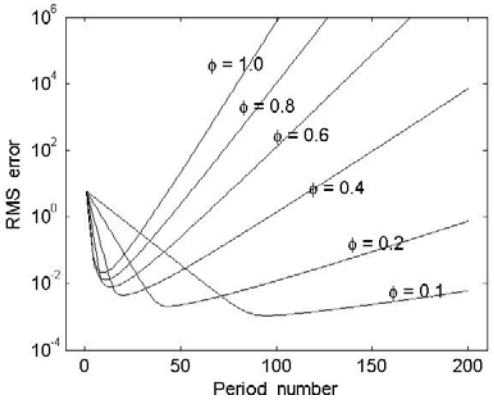
สำหรับผู้ที่จะนำเทคนิคนี้ไปใช้ จะต้องพิจารณาถึงช่วงของค่าความผิดพลาดในแต่ละค่าการเรียนรู้ว่าแต่ละช่วงมีค่าความผิดพลาดต่างกันเท่าไร เพราะถ้าช่วงของค่าความผิดพลาดไม่ห่างกันมากนักการควบคุมเพียงช่วงเดียวจะดีกว่าการแบ่งการควบคุมเป็นหลายช่วง เนื่องจากการเปลี่ยนการควบคุมจากช่วงหนึ่งไปยังอีกช่วงหนึ่งจำเป็นต้องให้ค่าความผิดพลาดเริ่มคงที่เสียก่อน

เอกสารอ้างอิง

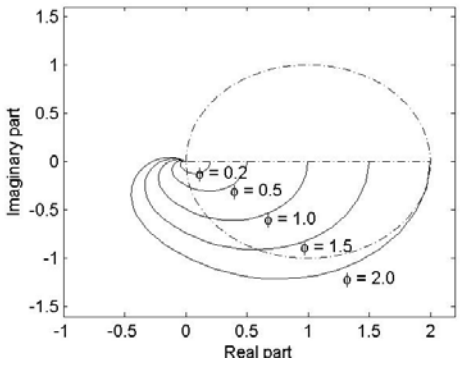
[1] Longman, R.W., 2000, “Iterative Learning Control and Repetitive Control for Engineering Practice”, International Journal of Control, Vol. 73, No.10, pp. 930-954.

[2] Songschon, S., and Longman, R.W., "Comparison of the stability boundary and the frequency response stability condition in learning and repetitive control," *Journal of applied mathematics and computer science*, 2003 , Vol. 13, No.2, 169-177

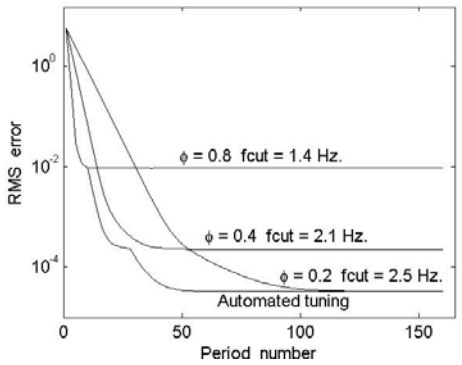
[3] Longman, R.W. and Wirkander, S.L., 1998, “Automated Tuning Concepts for Iterative Learning and Repetitive Control Laws”, Proceeding of the 37th IEEE conference on Decision and Control, December 1998, pp. 192-198.



รูปที่ 1 แสดงค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยกับคาบการทำงานของการควบคุมแบบทำซ้ำ

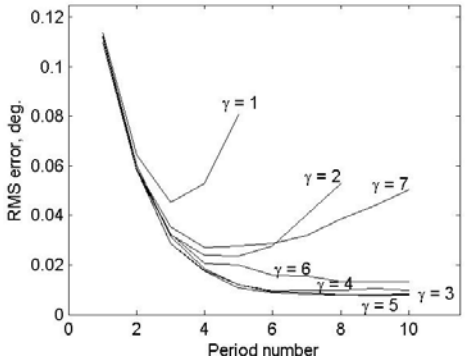


รูปที่ 2 แสดงเส้นทางไนควิสต์ที่ค่าการเรียนรู้ต่างๆ

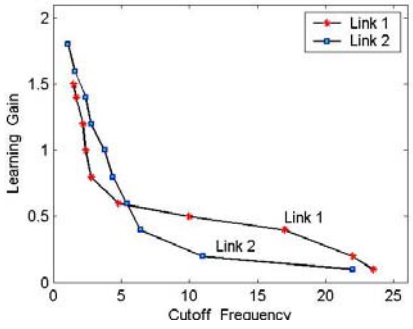


รูปที่ 3 แสดงการควบคุมโดยใช้เทคนิคการปรับอย่างอัตโนมัติและการควบคุมแบบทำซ้ำที่ใช้ค่าการเรียนรู้ต่างๆ

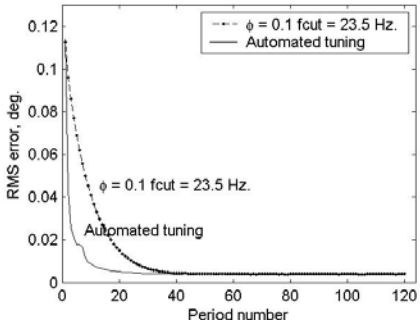
รูปที่ 4 แสดงหุ่นยนต์สการาที่ใช้ในการทดสอบ



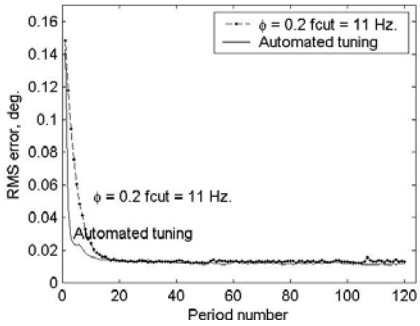
รูปที่ 5 แสดงค่า ERMS ของค่าเฟสล้ำหน้าเชิงเส้นของหุ่นยนต์สการาแกนที่ 1



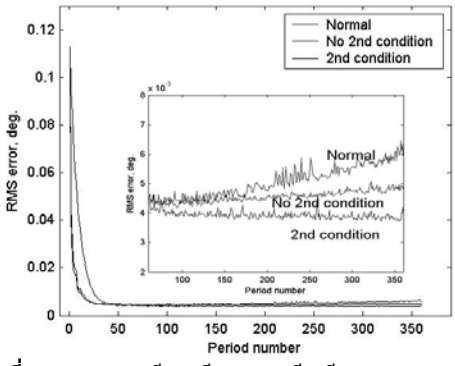
รูปที่ 6 แสดงเส้นความสัมพันธ์ของค่าการเรียนรู้กับค่าความถี่ตัดของหุ่นยนต์สการาแกนที่ 1 และแกนที่ 2



รูปที่ 7 แสดงค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการที่ใช้ค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.1 และการใช้การปรับแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์แกนที่ 1



รูปที่ 8 แสดงค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการที่ใช้ค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.2 และการใช้การปรับแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์แกนที่ 2



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบความมีเสถียรภาพยาวนานของการควบคุมแบบต่างๆ ของหุ่นยนต์แกนที่ 1