

การทดลองการใช้การควบคุมด้วยการเรียนรู้เพื่อลดความผิดพลาดในการติดตามของหุ่นยนต์สการา  
Experiments in The Use of Learning Control in Decreasing Tracking Errors of SCARA Robot

สาทิสส์ ทรงชน

ภาควิศวกรรมเครื่องกลและสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม(ฟีโบ้) คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ. ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 104140  
E-mail: songschon@fibo.kmutt.ac.th

Szathys Songschon

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  
E-mail: songchon@fibo.kmutt.ac.th

### บทคัดย่อ

ในบทความนี้กล่าวถึงผลการทดลองของการใช้การควบคุมด้วยการเรียนรู้ (Learning Control) กับหุ่นยนต์สการา โดยหลักการทำงานของตัวควบคุมชนิดนี้จะนำความผิดพลาดจากการทำงานในรอบที่ผ่านมาทำการปรับปรุงค่าคำสั่งที่ให้กับระบบควบคุมในรอบถัดไป โดยในการทดลองนี้เรากำหนดให้ปลายแขน(end-effector) ของหุ่นยนต์สการาเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี 10 เซนติเมตร และทดลองการควบคุมหุ่นยนต์สการาเฉพาะสองแกน ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ใช้มุมเฟสสำหรับเฟสชดเชยให้กับระบบของแขนหุ่นยนต์และได้ใช้ตัวกรองสัญญาณไร้เฟสชนิดต่ำผ่าน ร่วมกับตัวควบคุมด้วยการเรียนรู้ พารามิเตอร์ในการออกแบบตัวควบคุมนี้ประกอบไปด้วย ค่าสัมประสิทธิ์ของการเรียนรู้ ( $\phi$ ) ค่ามุมเฟสสำหรับ ( $\gamma$ ) และค่าความถี่ตัด เป็นต้น จากผลการทดลองที่ได้พบว่าเมื่อใช้  $\phi = 0.5$ ,  $\gamma = 5$  และใช้ตัวกรองสัญญาณแบบบัตเตอร์เวิร์ทชนิดต่ำผ่านไร้เฟสที่ความถี่ตัด 10 Hz และ 6 Hz สำหรับแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ตามลำดับ จะลดค่าผิดพลาดจากคำสั่งสองเฉลี่ยลงอยู่ในระดับ  $0.011^\circ$  สำหรับแกนแรก และ  $0.035^\circ$  สำหรับแกนที่สอง และรักษาระดับของความผิดพลาดอยู่ในระดับต่ำนี้ได้โดยกระบวนการเรียนรู้

### Abstract

In this paper, we present the experiment in using learning control with SCARA robot. Learning control is a method in improving the trajectory tracking performance from the error history of last repetitions. In the experiment, we create the desired trajectory for the end-effector of SCARA robot moving as a circle of radius 10 centimeters and operate only 2 consecutive links of the SCARA. In the experiments we also use learning control with linear phase lead ( $\gamma$ ) and zero-phase low pass filter.

Since then parameters in tuning are linear phase lead ( $\gamma$ ), learning gain ( $\phi$ ), and cutoff frequency. The experiments show that  $\phi = 0.5$ ,  $\gamma = 5$  and applying Butterworth low-pass filter in zero-phase manner with cutoff 10 Hz and 6 Hz for link 1 and 2 respectively shall reduce root mean square error to  $0.011^\circ$  for the first axis and  $0.035^\circ$  for the second axis. This method keeps the learning process of the system in order to get at this low level of error.

### 1. บทนำ

การควบคุมด้วยการเรียนรู้ (learning control, LC) นั้นใช้กับสถานะการณ์ที่ต้องให้คำสั่ง (command) กับระบบแบบเป็นรอบซ้ำๆกัน ซึ่งตัวควบคุมด้วยการเรียนรู้จะตรวจความผิดพลาดในการติดตาม (tracking error) ของระบบในแต่ละรอบของการปฏิบัติการที่เกิดขึ้นและปรับปรุงคำสั่งให้กับระบบเพื่อลดความผิดพลาดในการติดตามในรอบถัดไปโดยอัตโนมัติ

การควบคุมด้วยการเรียนรู้ (learning control, LC) [1] ของระบบควบคุม มีพื้นฐานความคิดมาจากการใช้การควบคุมแบบอินทิกรัลประยุกต์ใช้ในโดเมนการทำซ้ำ (repetition domain) เพื่อที่จะปรับปรุงการทำงานของตัวเองอย่างอัตโนมัติเมื่อเกิดความผิดพลาดเกิดขึ้นในการทำงานที่ซ้ำเดิม การควบคุมด้วยการเรียนรู้พิจารณาการทำงานที่ต้องการการติดตามวิถีที่ต้องการซ้ำเดิมหลายรอบและในแต่ละรอบของคำสั่งสั้นสุดลง ระบบจะเริ่มกลับทำงานใหม่โดยเริ่มจากค่าเริ่มต้น (initial condition) เดิม ซึ่งเป็นการควบคุมระบบที่มีช่วงเวลาคาบการทำงานจำกัด (finite time) หลักการทำงานของการควบคุมด้วยการเรียนรู้ นั้นจึงเป็นการปรับปรุงคำสั่งที่ให้กับระบบควบคุมแทนที่จะปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของระบบควบคุม การปรับปรุงคำสั่งที่ให้กับระบบควบคุมนั้นทำได้โดยใช้ค่าของความผิดพลาดจากการควบคุมใน

คาบการทำงานที่ผ่านมา มาปรับปรุงการทำงานในรอบการทำงานในปัจจุบัน Longman และคณะ [2,4] ได้แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของการควบคุมด้วยทั้งสองชนิดซึ่งมีผลโดยตรงมาจากการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบควบคุม และได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ฟิลเตอร์ไร้เฟส (zero phase filter) เพื่อที่ใช้ในการลดทอนสัญญาณของคำสั่งที่มีองค์ประกอบของสัญญาณความถี่สูงซึ่งเป็นสาเหตุของความไม่เสถียรในการควบคุมด้วยการเรียนรู้ การประยุกต์ใช้ฟิลเตอร์ไร้เฟสนั้นจะนำคำสั่งมาปรับปรุงตลอดทั้งช่วงของคาบคำสั่งเนื่องจากการทำฟิลเตอร์ไร้เฟสนั้นสามารถทำได้ในกระบวนการแบบช่วง (batch process) ซึ่งต้องป้อนข้อมูลทั้งช่วงเดินหน้าและถอยกลับ เนื่องจากการควบคุมด้วยการเรียนรู้มีปฏิบัตการด้วยค่าเริ่มต้นเดิมมีช่วงเวลาการทำงานจำกัดในแต่ละรอบ เมื่อพิจารณาในโดเมนการทำซ้ำจากรอบปัจจุบันกับรอบถัดไปอิทธิพลของมูมเพลสสะสมไม่อาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพในรอบถัดไป

ในบทความนี้มีจุดประสงค์หลักที่จะนำเสนอถึงการประยุกต์ใช้ฟิลเตอร์แบบผ่านต่ำเช่นฟิลเตอร์บัตเตอร์เวิร์ทกับตัวควบคุมด้วยการเรียนรู้ และแสดงถึงประสิทธิภาพในการติดตามวิถีที่ต้องการ ซึ่งได้กล่าวถึงทฤษฎีของการควบคุมประเภทนี้ และแสดงผลการทดลองจริงกับหุ่นยนต์สกการา

## 2. แหล่งที่มาของความผิดพลาดในการติดตาม

การใช้การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวิธีคลาสสิกซึ่งป้อนคำสั่งเดิมให้ระบบ กับปัญหาที่มีการทำงานเป็นรอบซ้ำๆ เดิมนั้น จะทำให้มีความผิดพลาดของวิถีติดตาม (trajectory tracking error) เกิดขึ้นซ้ำแล้วซ้ำเล่า เมื่อพิจารณาตัวแปรตั้งจะกล่าวต่อไปนี้ในรูปของผลแปลง  $z$  ซึ่งกำหนดให้  $U(z)$  เป็นสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบควบคุมแบบดิจิทัล  $G(z)$ ,  $Y_d(z)$  เป็นแนววิถีที่ต้องการ (desired trajectory) ซึ่งเป็นคาบ,  $W(z)$  เป็นค่าของสัญญาณรบกวนแบบกำหนดได้ซึ่งมีคาบเดียวกับ  $Y_d(z)$  เราจะเขียนได้ว่า

$$Y(z) = G(z)U(z) + W(z) \quad (1)$$

เมื่อ  $Y(z)$  เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจะระบบ  $E(z) = Y_d(z) - Y(z)$  เป็นความผิดพลาดในการติดตาม (tracking error) ที่เกิดขึ้น โดยปกติการควบคุมแบบป้อนกลับ จะให้คำสั่งด้วยเอาต์พุตที่ต้องการ (desired output)  $U(z) = Y_d(z)$  เราจะเห็นว่าจาก (1) เอาต์พุตจริง  $Y(z)$  จะมีสาเหตุมาจาก

1.) สมมติว่าเราทราบตัวแบบแม่นยำตรงของพลานต์  $G(z)$  การแปลงผกผัน  $z$  ของ (1) ได้จากผลบวกผลการประสาน (convolution sum) ของการแปลงผกผัน  $z$  ของ  $G(z)$  และ  $Y_d(z)$  ดังนั้นความผิดพลาดในการติดตามแบบกำหนดได้จะเกิดขึ้นในแต่ละเอาต์พุตที่ต้องการ ซึ่งเราจะกล่าวถึงการควบคุมด้วยการเรียนรู้เพื่อพยายามกำจัดความผิดพลาดติดตามแบบกำหนดได้นี้

2.) การรบกวน  $W(z)$  ซึ่งจะผลิตความผิดพลาดในการติดตามอีกแหล่งหนึ่ง การรบกวนนี้สามารถเป็นการรบกวนแบบสุ่ม (random disturbance) ซึ่งในบทความนี้จะไม่ขอกล่าวถึง การรบกวนสามารถเป็นแบบกำหนดได้และเป็นแบบคาบได้ในหลาย ๆ สถานการณ์ เมื่อเรา

ให้คำสั่งกับระบบซึ่งการควบคุมด้วยการเรียนรู้สามารถกำจัดผลของการรบกวนส่วนนี้ได้

3.) ความไม่แน่นอนของพลานต์  $G(z)$  เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการติดตามและการขาดความเสถียรของระบบ แต่การใช้การควบคุมด้วยการเรียนรู้จะทำให้ระบบทนทานต่อการขาดความเสถียรมากกว่า

## 3. การควบคุมด้วยการเรียนรู้ทั่วไปในโดเมนของการทำซ้ำ

พิจารณาสมการผลต่างสืบเนื่อง (difference equation) ของระบบอันดับที่  $n$  ในปริภูมิสแตต[3] สมการ (1) สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_s x(k) + B_s u(k) \\ y(k) &= C_s x(k) + w(k) \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ  $A_s, B_s, C_s$  เป็นเมทริกซ์อธิบายถึงพลวัตของระบบ,  $k$  แทนเวลาที่  $t = kT$  เมื่อ  $T$  คือเวลาในการซัดตัวอย่าง,  $x(k), y(k)$  เป็นเวกเตอร์สแตตของระบบ และเอาต์พุตตามลำดับ,  $u(k)$  เป็นคำสั่งที่ให้กับระบบหรือสัญญาณในการควบคุมระบบ พิจารณาปัญหาในช่วงเวลาจำกัด,  $t = pT$ , สมการ (2) สามารถเขียนอยู่ในรูปของผลบวกประสานได้ว่า

$$y(k) = C_s A_s^{k-1} x(0) + \sum_{i=0}^{k-1} h_s(k-i) u(i) + w(k) \quad (3)$$

$$k = 1, 2, \dots, p, \quad h_s(i) = C_s A_s^{i-1} B_s, \quad i = 1, 2, \dots, p$$

นิยามให้  $\delta_j(\bullet) = (\bullet)_j - (\bullet)_{j-1}$  เมื่อ  $j$  แทนจำนวนรอบในการทำซ้ำ  $y_j$  แทนสแตตมภ์เวกเตอร์ของเอาต์พุต  $p$  ลำดับเวลาซึ่งสมาชิกตัวแรกเริ่มจาก  $y_j(1)$  ของรอบที่  $j$   $u_j$  แทนสแตตมภ์เวกเตอร์ของอินพุต  $p$  ลำดับเวลาซึ่งสมาชิกตัวแรก เริ่มจาก  $u_j(0)$  ของรอบที่  $j$  สมการ (3) สามารถเขียนได้ว่า

$$\delta_j \underline{y} = P_s \delta_j \underline{u}; \quad P_s = \begin{bmatrix} h(1) & 0 & \dots & 0 \\ h(2) & h(1) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ h(p-1) & h(p-2) & \dots & h(1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

สมการการควบคุมด้วยการเรียนรู้ทั่วไปสามารถเขียนอยู่ในรูป

$$\delta_j \underline{u} = \underline{u}_j - \underline{u}_{j-1} = L_1 \underline{e}_{j-1}; \quad \underline{e}_j = \underline{y}_d - \underline{y}_j \quad (5)$$

เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป เราจะพิจารณาตัวแบบในการควบคุมด้วยการเรียนรู้ทั่วไปในรูปของ

$$u_j(k) = u_{j-1}(k) + \phi e_{j-1}(k + \gamma) \quad (6)$$

โดยที่  $\gamma$  คือมูมเพลสลำหน้าบวกหนึ่ง

## 4. เสถียรภาพของการควบคุมด้วยการเรียนรู้

พิจารณาสมการการควบคุมด้วยการเรียนรู้ (6) ในรูปของผลแปลง  $z$

$$U_j(z) = U_{j-1}(z) + \phi z^\gamma E_{j-1}(z) \quad (7)$$

จากสมการ (1) เขียน

$$\begin{aligned} Y_j(z) - Y_{j-1}(z) &= G(z)[U_j(z) - U_{j-1}(z)] \\ \delta_j Y(z) &= G(z) \delta_j U(z) \end{aligned} \quad (8)$$

สังเกตว่า  $\delta_j Y(z) = -\delta_j E(z)$  แทนพจน์  $\delta_j U(z) = \phi z^\gamma E_{j-1}(z)$  ลงในสมการ(8) จากนั้นจัดรูปใหม่จะเขียนได้ว่า

$$E_j(z) = S_1(z)E_{j-1}(z) \quad (9)$$

$$S_1(z) = 1 - \phi z^\gamma G(z)$$

ซึ่งเราอาจมอง  $S_1(z)$  ว่าเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนจากค่าผิดพลาดติดตามในรอบที่  $j-1$  ไปสู่ค่าผิดพลาดติดตามในรอบที่  $j$  ถ้าเราต้องการค่าผิดพลาดนี้ลดลงทางเดียวเราจะเขียนเป็นเกณฑ์ในการลู่ออกได้ว่า

$$|S_1(e^{i\omega T})| < 1, \quad 0 < \omega \leq \text{ความถี่ในควิสิสต์} \quad (10)$$

## 6. การใช้ฟิลเตอร์แบบผ่านต่ำกับการควบคุมด้วยการเรียนรู้

ในบางกรณีเราไม่สามารถหาค่า  $\phi, \gamma$  ให้สอดคล้อง (10) กรณีใช้การควบคุมด้วยการเรียนรู้ทั่วไปในรูปแบบการที่ (6) ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการใช้ฟิลเตอร์บัตเตอร์เวิร์ทแบบผ่านต่ำไร้เฟสด้วยขบวนการแบบช่วง (batch process) เราสามารถใช้ฟิลเตอร์บัตเตอร์เวิร์ทแบบผ่านต่ำทำฟิลเตอร์ไร้เฟสได้โดยป้อนสัญญาณในหนึ่งคาบเวลาเดินหน้าผ่านฟิลเตอร์บัตเตอร์เวิร์ทแล้วนำสัญญาณเอาต์พุตตลอดคาบที่ได้มากลับลำดับแล้วป้อนเข้าฟิลเตอร์บัตเตอร์เวิร์ทตัวเดิมจากนั้นก็กลับสัญญาณเอาต์พุตอีกครั้ง จะได้สัญญาณความถี่ต่ำและเฟสคงเดิม กำหนดให้  $f$  คือฟิลเตอร์ไร้เฟสแบบผ่านต่ำดังกล่าวและ  $*$  แทนสัญลักษณ์ของการคูณประสาน (convolution multiplication) เราสามารถเขียนการควบคุมด้วยการเรียนรู้ (6) เมื่อใช้กับฟิลเตอร์ไร้เฟสได้ว่า

$$u_j(k) = f * [u_{j-1}(k) + \phi e_{j-1}(k + \gamma)] \quad (11)$$

## 7. เสถียรภาพของระบบควบคุมด้วยการเรียนรู้เมื่อใช้ฟิลเตอร์ไร้เฟสผ่านต่ำ

พิจารณาระบบการควบคุมด้วยการเรียนรู้แบบเชิงเส้นตรงชนิดไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (linear time invariant) เมื่อใช้ฟิลเตอร์ (11) ในรูปของผลแปลง  $z$  สามารถแสดงได้ด้วย

$$U_j(z) - F(z)U_{j-1}(z) = F(z)[\phi z^\gamma E_{j-1}(z)] \quad (12)$$

$$Y_j(z) - F(z)Y_{j-1}(z) = G(z)[U_j(z) - F(z)U_{j-1}(z)] \quad (13)$$

สมการ (13) เพื่อความสะดวกพิจารณารณกรณี  $W(z) = 0$  โดยการเติมพจน์  $-Y_d(z) + Y_d(z) + F(z)Y_d(z) - F(z)Y_d(z) = 0$  ทางซ้ายมือของสมการ (13), แทนค่าทางขวามือของ (12) ลงใน (13) แล้วจัดรูปใหม่ ซึ่งเขียนได้ว่า

$$E_j(z) = S_2(z)E_{j-1}(z) + [1 - F(z)]Y_d(z) \quad (14)$$

$$S_2(z) = F(z)[1 - \phi z^\gamma G(z)]$$

สมการ (15) เมื่อ  $j$  มีค่ามากเพียงพอ และ  $Y_d(z) = 0$  มองได้เป็นสมการเอกพันธ์ซึ่งเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพของระบบ และถ้าเราต้องการค่าผิดพลาดนี้ลดลงทางเดียวเราจะเขียนเป็นเกณฑ์ในการลู่ออกได้ว่า

$$|S_2(e^{i\omega T})| < 1, \quad 0 < \omega \leq \text{ความถี่ในควิสิสต์} \quad (21)$$

## 8. วิถีโคจรที่ต้องการ (Desired Trajectory)

งานวิจัยนี้ต้องการให้หุ่นยนต์แบบสการา (SCARA) โดยที่ปลายแขนของตัวหุ่นยนต์ (end-effector) เคลื่อนที่เป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 เซนติเมตร ในช่วงเวลาเวลา 8 วินาทีในแต่

ละรอบ และใช้อัตราการสุ่มข้อมูล (sampling rate) ที่ 0.01 วินาที จากนั้นทำการแปลงจากขอบเขตเชิงพิกัดฉาก (cartesian space) ให้มาอยู่ในพจน์ของขอบเขตเชิงมุม (joint space) ในรูปที่ 1 แสดงการจัดเรียงแกนที่ 1 และ 2 ของแขนกลสการา แนววิถีที่ต้องการในพจน์ของขอบเขตเชิงมุมแสดงได้ดังในรูปที่ 2 และ 3

## 9. ผลการทดลองการควบคุมด้วยพีไอดี

รูปที่ 4 แสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์แบบสการา ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี ค่าผิดพลาดรากกำลังสองเฉลี่ย (Error Root Mean Square, ERMS) ในแต่ละคาบเวลา โดยค่า ERMS ของแกนที่ 1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.1530 องศา และแกนที่ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.1550 องศา จากรูปนี้จะเห็นได้ชัดเจนว่าค่าของความผิดพลาดนั้นไม่มีแนวโน้มลดลงเลย

## 10. การทดลองหาค่าอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสม

การทดลองควบคุมกับหุ่นยนต์สการาจริงได้โดยการใส่ตัวควบคุมด้วยการเรียนรู้ตามสมการที่ (6) เพิ่มจากตัวควบคุมแบบพีไอดีอีกชั้นหนึ่ง แล้วปรับค่าอัตราการเรียนรู้ในช่วง  $\phi = 0.1, 0.2, \dots, 1.0$  จากผลการทดสอบปรับค่าอัตราการเรียนรู้ ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 พบว่าไม่มีค่าอัตราการเรียนรู้ใดเลยที่ทำให้การควบคุมแบบการเรียนรู้แบบทบทวนมีเสถียรภาพยาวนานได้ แต่ค่าอัตราการเรียนรู้ที่  $\phi = 0.5$  จะให้ค่าของการลดลงของความผิดพลาดเร็วและให้ค่าต่ำสุดของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับต่ำกว่าค่าอื่น ๆ ทั้งสองแกนจึงเลือกใช้  $\phi = 0.5$  เพื่อใช้ในการควบคุมแบบการเรียนรู้ร่วมกับค่าเฟสล้าหน้าเชิงและฟิลเตอร์ไร้เฟสต่ำผ่านต่อไป

## 11. การทดลองเพื่อหาค่าเฟสล้าหน้าเชิงเส้นที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้จะใช้ตัวควบคุมตัวเดิมและเพิ่มตัวควบคุมด้วยการเรียนรู้เข้าไปยังการควบคุมทั้งสองแกน โดยใช้ค่าคงที่การเรียนรู้  $\phi = 0.5$  และทดสอบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนค่ามุมเฟสล้าหน้าเชิงเส้น  $\gamma = 1, 2, \dots, 7$  พิจารณารูปที่ 7 ที่แสดงค่าผิดพลาดรากกำลังสองเฉลี่ยที่แกน 1 และรูปที่ 8 แสดงค่าผิดพลาดรากกำลังสองเฉลี่ยของที่แกน 2 พบว่าค่ามุมเฟสล้าหน้าเชิงเส้นที่ทำให้ค่าผิดพลาดรากกำลังสองเฉลี่ย มีค่าน้อยสุดคือ  $\gamma = 5$  ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่านี้ในการทดสอบร่วมกับฟิลเตอร์ไร้เฟสต่ำผ่านต่อไป

## 12. การทดลองหาค่าความถี่ต่ำผ่าน (lowpass frequency cutoff) ที่เหมาะสม

จากการทดลองที่ผ่านมาเราเลือกใช้ค่าคงที่การเรียนรู้  $\phi = 0.5$  มุมเฟสล้าหน้าเชิงเส้น  $\gamma = 5$  แล้วปรับค่าความถี่ตัดต่ำผ่าน (low pass cut off frequency) ตั้งแต่ 5 Hz โดยเพิ่มค่าความถี่ตัดต่ำผ่านที่ละ 0.5 Hz จนกระทั่งค่าความผิดพลาดไม่มีเสถียรภาพยาวนาน ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ฟิลเตอร์บัตเตอร์เวิร์ทอันดับ 10 ในการทำฟิลเตอร์ไร้เฟสต่ำผ่าน รูปที่ 9 และ 10 แสดงค่าความผิดพลาด RMS ของการควบคุมด้วยการเรียนรู้ร่วมกับฟิลเตอร์ไร้เฟสบัตเตอร์เวิร์ทแบบ

ค่าความถี่ตัดต่ำผ่าน (butterworth lowpass filter) จะเห็นได้ว่าสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพยาวนานได้โดยขึ้นอยู่กับค่าความถี่ตัดต่ำผ่าน ความถี่ตัดต่ำผ่านที่ 7.5 Hz ดังแสดงในรูปที่ 9 ทำให้ที่แกน 1 ของหุ่นยนต์มีเสถียรภาพยาวนานได้ แต่ยังไม่สามารถทำให้ที่แกน 2 ของหุ่นยนต์มีเสถียรภาพยาวนานได้เมื่อทดสอบจนถึงรอบที่ 50 ค่าผิดพลาดรากกำลังสองเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น(ไม่ได้แสดงในรูป) เนื่องจากแต่ละแกนมีพลวัตของระบบต่างกันและทั้งสองแกนเคลื่อนที่ไปพร้อมกันทำให้มีผลคู่ควบรวมกันอยู่จึงไม่จำเป็นที่จะต้องมีความถี่ตัดต่ำผ่านที่เหมาะสมที่ค่าเดียวกัน ดังนั้นจึงทดสอบหาค่าความถี่ตัดต่ำผ่านที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเสถียรภาพยาวนานของทั้งสองแกนพร้อมกัน โดยการทดลองเลือกความถี่ตัดต่ำผ่านที่ 10 Hz ที่แกน 1 และที่ความถี่ตัดต่ำผ่านที่ 6 Hz ที่แกน 2 ดังแสดงในรูปที่ 7 จะพบว่าค่าผิดพลาดรากกำลังสองเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งทำให้ระบบมีเสถียรภาพยาวนาน โดยแกนที่ 1 มีค่าผิดพลาดรากกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 0.011 องศา และแกนที่ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.035 องศา

### 13.สรุป

จากการประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยการเรียนรู้โดยทดสอบกับหุ่นยนต์แบบสการา (SCARA) โดยกำหนดให้ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นวงกลมผ่านศูนย์กลางขนาด 20 เซนติเมตรแทนแนววิถีที่ต้องการ โดยการทดลองปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ กับค่ามุมเฟส ล้าหน้าเชิงเส้นที่เหมาะสม ซึ่งจากการทดลอง จะได้ค่า  $\phi = 0.5$  และ  $\gamma = 5$  ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นทำการทดลองหาค่าความถี่ตัดต่ำผ่าน (lowpass frequency cutoff) ที่เหมาะสม โดยใช้ฟิลเตอร์บัตเตอร์เวิร์ทเวิร์ท แบบค่าความถี่ตัดต่ำผ่าน (butterworth lowpass filter) ทำเป็นฟิลเตอร์ไร้เฟส โดยผลการทดลองพบว่าที่ค่าความถี่ตัดต่ำผ่าน 10 Hz สำหรับแกน 1 และค่าความถี่ตัดต่ำผ่านที่ 6 Hz สำหรับแกนที่ 2 เป็นค่าความถี่ตัดต่ำผ่านที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ที่ทดสอบให้มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในการทดสอบและเกิดเสถียรภาพยาวนาน โดยสามารถทำให้ความผิดพลาดลดลง เหลือเพียง 0.011 องศา สำหรับแกน 1 หรือน้อยลงจากการควบคุมแบบพีไอดี ประมาณ 14 เท่าและ 0.035 องศา สำหรับแกน 2 หรือน้อยลงจากการควบคุมแบบเดิมประมาณ 4.4 เท่า ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการควบคุมด้วยการเรียนรู้แบบทบทวนเป็นตัวควบคุมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมอย่างต่อเนื่องที่มีลักษณะของคำสั่งซ้ำเป็นคาบได้เป็นอย่างดี

### 14. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย บริษัทเทคซอสซิสเต็ม (ประเทศไทย) จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ตลอดจนสนับสนุนข้อมูลของโปรแกรม MATLAB และขอขอบคุณ คุณยุทธนา เอมยงค์ ในการประสานงานเรื่องอุปกรณ์และการทดลอง

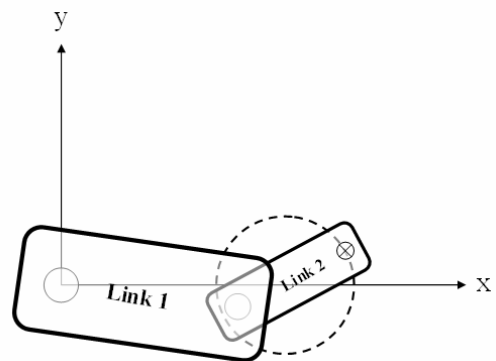
### 15. เอกสารอ้างอิง

[1] Somvittoon, P., and Songschon, S., "Analysis and synthesis of real time high-order learning control with low pass filter", Mechanical engineering network of Thailand the 16<sup>th</sup> conference, 2002, 284-289.

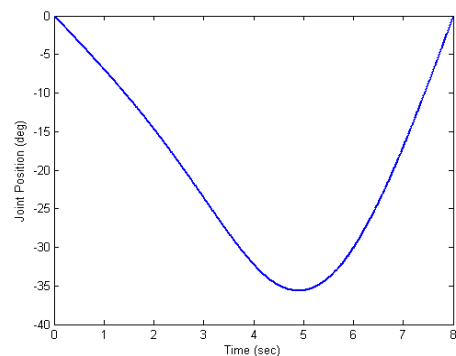
[2] Longman, R.W., 2000, "Iterative Learning Control and Repetitive Control for Engineering Practice", International Journal of Control, Vol. 73, No.10, pp. 930-954.

[3] Longman, R.W. and Songchon, T., "Trade-offs in designing learning/repetitive controllers using zero-phase filtering for long term stabilization," *Advances in the Astronautical Sciences*, 1999, Vol.102, pp. 243-262.

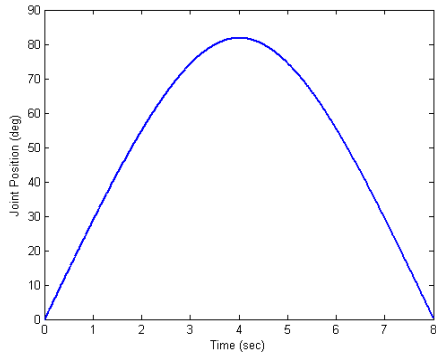
[4] Songschon, S., and Longman, R.W., "Comparison of the stability boundary and the frequency response stability condition in learning and repetitive control," *Journal of applied mathematics and computer science*, 2003 , Vol. 13, No.2, 169-177



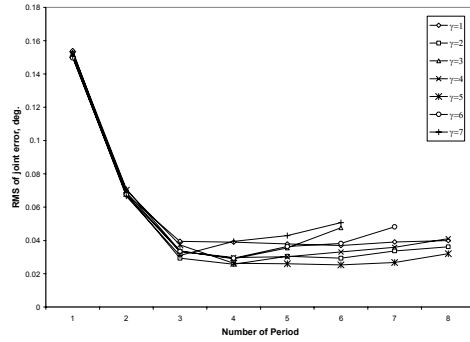
รูป 1 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบสการา



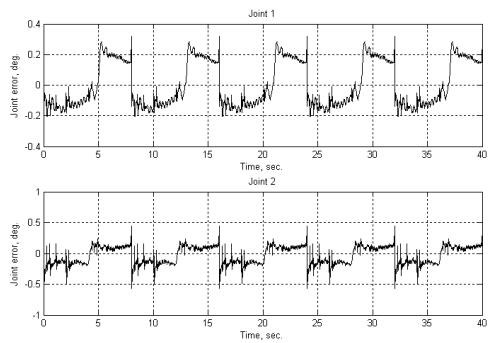
รูป 2 แสดงแนววิถีที่ต้องการของแกนที่ 1



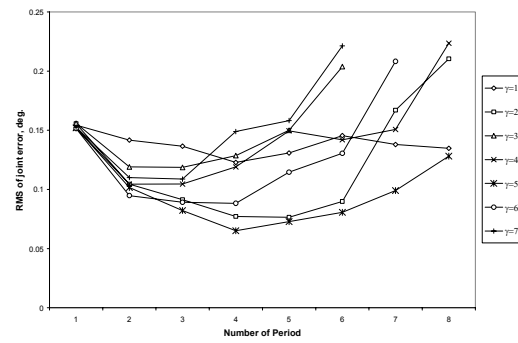
รูป 3 แสดงแนววิถีที่ต้องการของแกนที่ 2



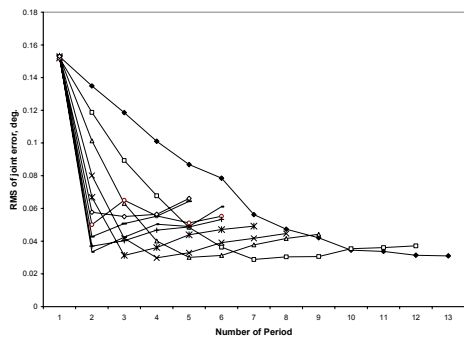
รูป 7 แสดงค่าความผิดพลาดของแกน 1 เมื่อ  $\gamma = 1, 2, \dots, 7$



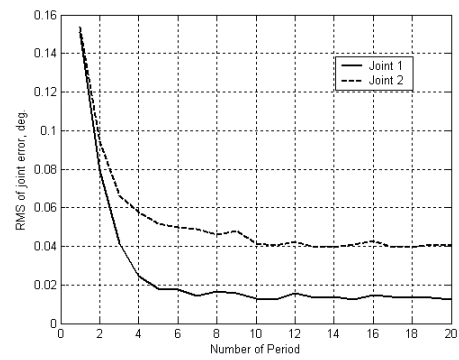
รูป 4 แสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการควบคุมแบบพีไอดี



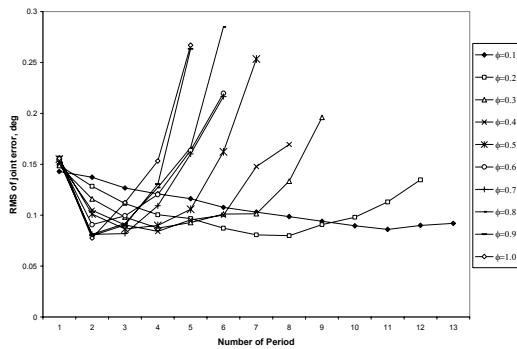
รูป 8 แสดงค่าความผิดพลาดของแกน 2 เมื่อ  $\gamma = 1, 2, \dots, 7$



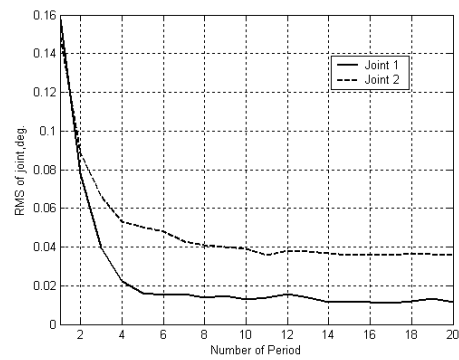
รูป 5 แสดงการลดลงของความผิดพลาดของแกน 1 ที่ค่า  $\phi$  ต่างๆ



รูป 9 แสดงผลการควบคุมหุ่นยนต์สกราราที่ความถี่ตัดผ่าน 7.5 Hz



รูป 6 แสดงการลดลงของความผิดพลาดของแกน 2 ที่ค่า  $\phi$  ต่างๆ



รูป 10 แสดงผลการควบคุมหุ่นยนต์แบบสกราราที่ค่าความถี่ตัดผ่าน 10 Hz ของแกน 1 และค่าความถี่ตัดผ่าน 6 Hz ของแกน 2