การออกแบบระบบควบคุมแบบ ADAPTIVE CONTROL เพื่อใช้ในการควบคุมแขน PUMA ROBOT ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด

DESIGN OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR TRAJECTORY TRACKING OF PUMA

**ROBOT ARM** 

**คมกฤช อาษากิจ** <sup>1</sup> และ ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ <sup>1</sup>

Khomkrit Asakit 1 and Pradya Prempraneerach 1

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม Adaptive Control ที่ไม่เชิงเส้นเพื่อใช้ควบคุมแขนหุ่นยนต์ ที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีการเคลื่อนที่ และใช้ปลายแขนของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนย้ายวัตถุจากที่หนึ่ง

ไปยังอีกที่หนึ่ง ตามที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่ออกแบบไว้

โดยการศึกษาเริ่มจากทำการวางแผนแบบจำลองโดยใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ Model Reference Adaptive Control (MRAC) ในรูปแบบอ้างอิงโดยใช้ Adaptive Control ในการจำลองเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ ที่เรายังไม่รู้ พร้อมกับแบบจำลองแขนหุ่นยนต์แบบสองข้อต่อ ทางคณิตศาสตร์หลังจากศึกษาจากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของแขนกล และตัวควบคุมแล้วจึงนำไปเปรียบเทียบเพื่อให้การทำงานของแขนกลและปลายของแขน

กลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ

**ABSTRACT** 

This thesis focuses on a design of adaptive controller for a trajectory control of a robot arm that is modeled by nonlinear mathematic equations such that the robot end effector can perform a pick-and-place operation effectively according to design specification.

This study begins with a simulation using the Model Reference Adaptive Control (MRAC) along with a reference model to estimate unknown plant parameters. Also, motion of the two-link robot arm is simulated for a trajectory following task. After studying mathematic model of robot arm, the MRAC controller will be implemented for trajectory tracking tasks.

Key Word: Model Reference Adaptive Control (MRAC), Adaptive Control, Robot Arm

E-mail address: Khomkrit@hotmail.com

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi.

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านต่างๆ ได้เจริญก้าวหน้าไปมากโดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการนำ เครื่องจักรและอุปกรณ์อัตโนมัติต่างๆ มาใช้งานแทนแรงงานคนทั้งในด้านการผลิตและรับส่งชิ้นส่วนต่างๆ ภายใน โรงงานสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความต้องการความแม่นยำสูง จึงให้ความสำคัญเป็นอย่างมากกับเครื่องจักร ที่นำมาใช้ดังนั้นระบบควบคุมที่ดีจึงมีความสำคัญและระบบควบคุมแบบต่างๆ ก็มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ออกไปแล้วแต่ประเภทและการนำไปใช้งาน จึงทำให้มีระบบการควบคุมต่างๆที่สำคัญมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากการ นำระบบการควบคุมไปใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ต่อมาระบบมีความซับซ้อนมากขึ้นซึ่งส่วนใหญ่เป็นระบบที่ไม่มี เสถียรภาพ เช่น การควบคุมแขนหุ่นยนต์ การควบคุมมอเตอร์ หรืองานควบคุมเครื่องจักรกลในด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น จึงเกิดทฤษฎีการควบคุมมากมาย เพื่อให้สามารถควบคุมอุปกรณ์ดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่ผ่านมา มีกลุ่มนักวิจัย Louis L. Whitcomb และคณะ [3] ได้ศึกษาการทดลองเชิงเปรียบเทียบของชุดคำสั่งควบคุมแรง ้ ปรับตัวพื้นฐานตัวแบบใหม่สำหรับแขนหุ่นยนต์โดยเครื่องควบคุมนี้จัดให้มีการแกะรอยวิถีโคจรของแรงและตำแหน่ง ในเวลาเดียวกันของแขนหุ่นยนต์ที่ทูลทิปของมันอยู่ในจุดที่ติดต่อกับผิวหน้าเรียบแข็ง ชุดคำสั่งคงที่เกี่ยวกับตัวแบบ พลวัตไม่เป็นเส้นตรงลำตัวแข็งที่ยอมรับทั่วไปและพิสูจน์ได้สำหรับแขนหุ่นยนต์การทดลองเชิงเปรียบเทียบแสดงให้ เห็นว่าเครื่องควบคุมพื้นฐานตัวแบบปรับตัวได้แบบใหม่จัดให้มีสมรรถภาพของทั้งเครื่องควบคุมพื้นฐานการไม่มีตัว แบบ(นอนโมเดล)และแบบปรับตัวไม่ได้ที่เหนือกว่าพิสัยกว้างของสภาพการปฏิบัติงาน John T. Wen และคณะ [4] ได้ศึกษาการทำงานแบบลีอาปูนอฟโดยใช้พลังงานการทำงานแบบลีอาปูนอฟกับพลังงานศักย์ดัดแปลง มา วิเคราะห์ความคงที่แบบเลขชี้กำลัง เมื่อมีแรงเสียดทานแบบหนืดและแบบคูลอมบ์ และความผิดพลาดของ พารามิเตอร์ของตัวแบบเกิดขึ้นการดัดแปลงแบบเลื่อนของกฎควบคุมจึงถูกนำเสนอเพื่อเพิ่มสภาพทนทานและ ยกระดับวงแหวนรอบนอก การควบคุมการปรับตัวมีตำแหน่งอยู่ภายในโครงสร้างเดียวกันเช่นกัน การกำหนด เส้นตรงในพารามิเตอร์จึงถูกได้มาและกฎควบคุมการปรับตัวคงที่เชิงเส้นกำกับระดับโลกก็ได้รับมาโดยการแทนที่ พารามิเตอร์ตัวแบบในกฎควบคุมแบบไม่ปรับตัวโดยการประมาณค่า Abd Manan Ahmad และคณะ [5] ได้ นำเสนอแบบจำลองของตัวควบคุมเครือข่ายประสาทสำหรับแขนหุ่นยนต์สามการเชื่อมต่อ เครือข่ายนี้อยู่บนพื้นฐาน แผนที่การจัดตั้งตัวเองของโคโฮเน็นแบบดัดแปลง ในตัวแบบที่นำเสนอ เครือข่ายวกกลับและเครือข่ายเอสโอเอ็ม ดัดแปลงถูกเชื่อมต่อกัน Jung Hua Yang และคณะ [6] ได้ศึกษาปัญหาการควบคุมหุ่นยนต์ที่ยืดหยุ่นได้ โดยผัง ควบคุมแบบไม่เชิงเส้น ได้ถูกนำเสนอเป็นการแก้ปัญหาต่อปัญหาการควบคุมโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เพื่อจัดการกับ ความไม่แน่นอนของตัวแบบที่มีอยู่ เวอร์ชันปรับตัวได้ของกฎควบคุมแบบไม่เชิงแส้นนี้จึงถูกนำเสนอ จากนั้นการ พิสูจน์ความคงที่ของระบบวงจรปิดโดยรวมจึงถูกมอบให้ทางการวิเคราะห์แบบลีอาปูนอฟ และยังมีการจัดให้มีผล การทดลองอย่างกว้างขวาง เพื่อสาธิตประสิทธิภาพของเครื่องควบคุม

เนื่องจากในระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมโดยส่วนมากแล้วจะใช้ PID Controller มาทำการควบคุม ซึ่งมันก็ทำงานได้ดีในช่วงที่เรา Liberalization รอบๆจุดทำงานแต่เมื่อใดก็ตามถ้าจุดทำงานของเราเริ่มมีการ เปลี่ยนแปลงหรือว่า parameter บางตัวมีการเปลี่ยนแปลงเช่น มวลของระบบ, ความยาว และอื่นๆหรืออาจมี parameter ที่เราไม่ได้นำมาคิดมันจะทำให้ controller ที่เราออกแบบไว้เริ่มทำงานไม่ได้หรือไม่สามารถทำงานได้ เลย ดังนั้น adaptive control จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นำมาใช้แก้ปัญหานี้ โดยทั่วไปแล้วการควบคุมแบบปรับตัว

แบบอ้างอิงนั้นประกอบไปด้วย 4 ส่วนได้แก่ ระบบ (plant) ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่ไม่รู้จัก ตัวแบบอ้างอิง (reference model) เพื่อการบ่งชี้ผลลัพธ์ที่ต้องการของระบบควบคุม กฎการควบคุมผลสะท้อนกลับ (feedback control law) ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่ปรับได้ และกลไกการปรับตัว (adaptation mechanism) สำหรับการ อัพเดทพารามิเตอร์ที่ปรับได้

จุดสำคัญหลักๆของการควบคุมแบบ Adaptive control คือมันสามารถปรับ gain ของตัวเองได้ถ้าเมื่อ ระบบมีการเปลี่ยนแปลง parameter ดังนั้นค่า gain จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเหมาะสม เนื่องจากมันจะนำเอา ค่าความผิดพลาดที่ได้จาก plant จริงมาเปรียบเทียบกับ model ที่เราออกแบบเมื่อได้ที่มีค่าความผิดพลาดเกินขึ้น ค่า gain จะมีการปรับตัวโดยอัตโนมัติ

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยพิจารณาแขนที่เป็นแบบราบ มีการเชื่อมต่อ 2 ส่วน และมี ส่วนเชื่อมต่อ (รูปที่1) ซึ่งตำแหน่งนั้นสามารถอธิบายได้ด้วย 2-vector q ของมุมร่วม และ Input ของ Actuator ประกอบไปด้วย 2-vector  $\tau$  ของแรงบิด (Torque) ที่ประยุกต์ใช้ที่ข้อต่อของแขน พลวัตของแขนกลแบบพื้น ๆ นั้น เป็นแบบไม่เชิงเส้นและสามารถเขียนในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

 $H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = au$  (1) H(q): เป็นแมทริกซ์ความเฉื่อยของแขนหุ่นแบบ 2 x 2 (ซึ่งเป็นจำนวนเต็มที่เป็นบวกสมมาตร)

 $C(q,\dot{q})\dot{q}$  : เป็น 2-vector ของแรงบิด (toque) ที่เคลื่อนเข้าหาศูนย์กลางและแรงบิด Coriolis

g(q) : เป็น 2-vector ของแรงบิดที่มาจากแรงดึงดูดของโลก

โดยที่

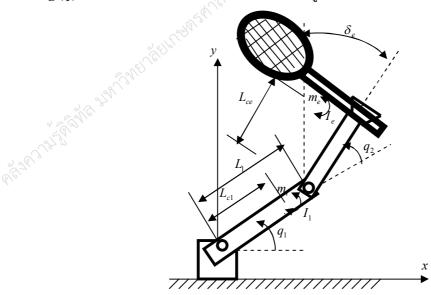


Figure 1 An articulated two-link manipulator

# 1. ว**ิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย** PD Control สมการใดนามิคสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -h\dot{q}_2 & -h(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ h\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

จากสมการไดนามิคของแขนกลสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการ (1)

$$H_{11}\ddot{q}_1 + H_{12}\ddot{q}_2(-h\dot{q}_2 - h(\dot{q}_1 + \dot{q}_2))\dot{q}_1 = \tau_1$$

$$H_{21}\ddot{q}_1 + H_{22}\ddot{q}_2(-h\dot{q}_1)\dot{q}_2 = \tau_2$$

หาค่า  $\ddot{q}_1$  และ  $\ddot{q}_2$  จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีอินเวอร์สเมตริกซ์ เพื่อแก้สมการ

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$\ddot{q}_{1} = invH_{11}\left\{-C_{11}\dot{q}_{1} - C_{12}\dot{q}_{2} + \tau_{1}\right\} + invH_{12}\left\{-C_{21}\dot{q}_{1} - C_{22}\dot{q}_{2} + \tau_{2}\right\}$$

$$\ddot{q}_2 = invH_{21}\left\{-C_{11}\dot{q}_1 - C_{12}\dot{q}_2 + \tau_1\right\} + invH_{22}\left\{-C_{21}\dot{q}_1 - C_{22}\dot{q}_2 + \tau_2\right\}$$

หาค่า  $au_1$  และ  $au_2$  จาก

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = -\left[ K_p \begin{bmatrix} \widetilde{q}_1 \\ \widetilde{q}_2 \end{bmatrix} - \left[ K_D \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \right]$$

$$\widetilde{q}_1 = q_1 - q_{d1}$$

$$\widetilde{q}_2 = q_2 - q_{d2}$$

นำสมการต่างๆที่ได้จากข้างต้นมาแทนลงในแบบจำลอง PD Control โดยกำหนดค่า Function Dynamic Model โดยใช้ Matlab/Simulink ในการจำลองเพื่อหาค่าการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์ดังนี้

$$H_{11} = a_1 + 2a_3 \cos q_2 + 2a_4 \sin q_2$$
,  $H_{12} = H_{21} = a_2 + a_3 \cos q_2 + a_4 \sin q_2$ 

$$H_{22} = a_2$$
,  $h = a_3 \sin q_2 - a_4 \cos q_2$ 

โดยให้

$$a_1 = I_1 + m_1 I_{c1}^2 + I_e + m_e I_{ce}^2 + m_e I_1^2$$
,  $a_2 = I_e + m_e I_{ce}^2$ 

$$a_3 = m_e l_1 l_{ce} \cos \delta_e, \ a_4 = m_e l_1 l_{ce} \sin \delta_e$$

โดยมีเงื่อนไขในตัวอย่างนี้คือ

 $m_1=1, l_1=1, m_e=2, \delta_e=30^\circ, I_1=0.12, I_{cl}=0.5, I_e=0.25, l_{ce}=0.6, q_1=0, q_2=0, q_{d1}=60^\circ, q_{d2}=90^\circ$   $K_D=100, K_D=0.00, K_D=0.00$ 

## 2. วิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย Adaptive Control (MRAC)

Parameter Error:  $\tilde{a} = \hat{a} - a$ 

Joint Error:  $s=\dot{\widetilde{q}}+\Lambda\widetilde{q}$  โดยที่  $\widetilde{q}=q-q_d$ 

จากทฤษฎีของ Lyapunov Function พลังงานทั้งหมดจะเท่ากับพลังงานจลน์บวกกับพลังงานศักดิ์และค่าที่ได้ จะต้องมากกว่าศูนย์เสมอ จึงได้สมการเป็น

$$V = \frac{1}{2} \left[ s^T H s \right] + \frac{1}{2} \left[ \widetilde{a}^T \Gamma^{-1} \widetilde{a} \right]$$

หา

$$\dot{V} = \frac{1}{2}\dot{s}^T H s + \frac{1}{2}s^T H \dot{s} + \frac{1}{2}s^T \dot{H} \dot{s} + \frac{1}{2}\ddot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{a} + \frac{1}{2}\tilde{a}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{a}}$$

$$\tag{1}$$

จะได้

$$s=\dot{\widetilde{q}}+\Lambda\widetilde{q}=\dot{q}-\dot{q}_d+\Lambda\widetilde{q}$$
 โดยที่  $\dot{q}_r=\dot{q}_d-\Lambda\widetilde{q}$ 

$$\dot{s} = \ddot{q} + \Lambda \dot{\tilde{q}} = \ddot{q} - \ddot{q}_{r} \tag{2}$$

จากสมการของ Robot

$$H\ddot{q} + C\dot{q} + g = \tau \tag{3}$$

$$H\ddot{q} = \tau - C\dot{q} - g$$
 โดยที่  $\dot{q} = s + \dot{q}_r$ 

$$H\ddot{q} = \tau - C(s + \dot{q}_r) - g \tag{3a}$$

จากสมการที่ (1) แทน ลงไปในสมการที่ (2)

$$\dot{V} = s^T H(\ddot{q} - \ddot{q}_r) + \frac{1}{2} s^T \dot{H} s + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{a}$$
(4)

แทนค่าสมการ (3a) ลงในสมการ (4)

$$\dot{V} = s^{T} \left( \tau - C(s + \dot{q}_{r}) - g \right) - s^{T} H \ddot{q}_{r} + \frac{1}{2} s^{T} \dot{H} s + \dot{\tilde{a}}^{T} \Gamma^{-1} \tilde{a}$$

$$\dot{V} = -s^{T} C s + \frac{1}{2} s^{T} \dot{H} s + s^{T} \left( \tau - C \dot{q}_{r} - g \right) - s^{T} H \ddot{q}_{r} + \dot{\tilde{a}}^{T} \Gamma^{-1} \tilde{a}$$

$$\dot{V} = s^{T} \left( \tau - H \ddot{q}_{r} - C \dot{q}_{r} - g \right) + \dot{\tilde{a}}^{T} \Gamma^{-1} \tilde{a} \quad \text{โดยที่} \quad H \ddot{q}_{r} + C \dot{q}_{r} + g = Y a$$

$$\dot{V} = s^{T} \left( \tau - Y a \right) + \dot{\tilde{a}}^{T} \Gamma^{-1} \tilde{a}$$
(5)

Control Law: 
$$\tau = Y\hat{a} - K_D s$$
 (6)

แทนสมการ (6) ลงในสมการ (5)

$$\dot{V} = s^{T} (Y \hat{a} - Y a - K_{D} s) + \dot{\tilde{a}}^{T} \Gamma^{-1} \tilde{a}$$

$$\dot{V} = s^{T} Y \tilde{a} - s^{T} K_{D} s + \dot{\tilde{a}}^{T} \Gamma^{-1} \tilde{a}$$
(7)

Adaptation Law:  $\dot{\hat{a}} = -\Gamma Y^T s$ 

$$\dot{\hat{a}}^T = -s^T Y \Gamma^T \tag{8}$$

แทนสมการ (8) ลงในสมการ (7)

$$\dot{V} = -s^T K_D s + s^T Y \widetilde{a} + (-s^T Y \Gamma^T) (\Gamma^{-1} \widetilde{a})$$

$$\dot{V} = -s^T K_D s$$

จากสมการข้างต้นเรากำหนดค่า Parameter ดังนี้

 $\Gamma=diag\big[0.03\quad 0.05\quad 0.1\quad 0.3\big], a_1=3.3, a_2=0.97, a_3=1.04, a_4=0.6, q_{d1}(t)=30^\circ(1-\cos(2\pi t))$   $q_{d2}(t)=45^\circ(1-\cos(2\pi t))$  เมื่อแก้สมการแล้วได้ค่า Control Law และ Adaptation Law นำไปหาการประมาณ ค่าพารามิเตอร์ที่เรายังไม่รู้ และหาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำลองการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์แบบ Adaptive control (MRAC) ตามที่กำหนดไว้

#### ผลการทดลอง

1. ทดลองแก้สมการการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อ 2.1 เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์และค่าของแรงบิด โดยใช้การควบคุมแบบ PD Control มุมเริ่มต้น ของLink  $1=60^\circ$  และมุมเริ่มต้นของ Link  $2=90^\circ$  และเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการเป็น  $q_{d1}(t)=30^\circ(1-\cos(2\pi t))$  และ  $q_{d2}(t)=45^\circ(1-\cos(2\pi t))$ 

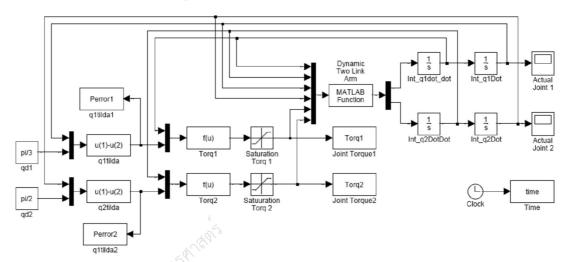


Figure 2 A model of PD Control two-link robot arm to solve equation of trajectory by

Matlab/Simulimk

2. ทดลองแก้สมการการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อ 2.2 เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์และค่าของแรงบิด (toque) โดยใช้การควบคุมแบบ Adaptive control (MRAC) และเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการเป็น  $q_{d1}(t)=30^\circ(1-\cos(2\pi t))$  และ  $q_{d2}(t)=45^\circ(1-\cos(2\pi t))$ 

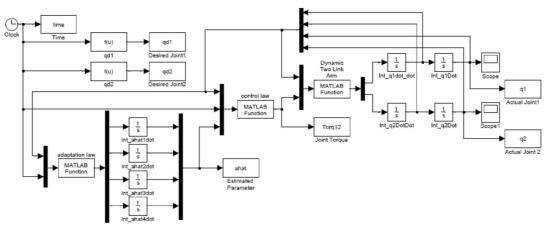


Figure 3 A model of MRAC two-link robot arm to solve equation of trajectory by Matlab/Simulimk

3. กราฟใน Figure 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและแรงบิดของ Link 1 และ Link 2 ระหว่าง PD Control กับ Adaptive Control (MRAC)

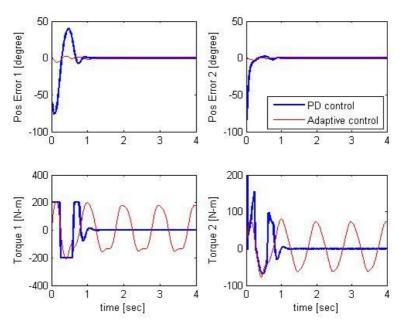


Figure 4 Comparison of position errors link 1 and link 2 (Top Row) between PD Control with Adaptive Control, and control torques link 1 and link 2 (Bottom Row)

4. กราฟใน Figure 5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่าพารามิเตอร์ของ PD control กับ Adaptive control

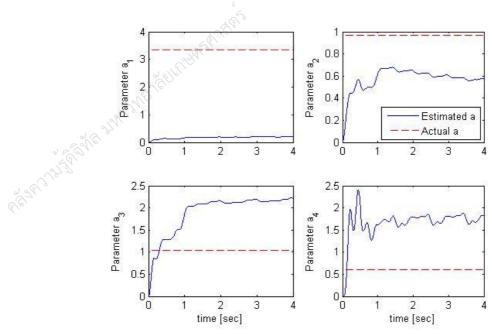


Figure 5 Comparison of parameter estimates  $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4$  (blue) and  $a_1, a_2, a_3, a_4$  (red)

ผลจากการออกแบบระบบควบคุมแบบ Adaptive Control เพื่อใช้ในการควบคุมแขน Puma Robot ให้ เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของแขนกล โดย ใช้แบบควบคุม Adaptive control ผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่ากราฟที่ได้ (Figure 4) มานั้นเป็นกราฟของตำแหน่ง Error ของ Link1 และ Error ของ Link2 โดยเส้นกราฟจะมีค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ 0 ตามที่เรากำหนดมุมองศา ของ Joint 1 และ Joint 2 ที่ Link 1จะอยู่ที่ตำแหน่ง 60° และ Link 2 จะอยู่ที่ตำแหน่ง 90° ส่วนกราฟการควบคุม แรงบิดของ Link 1 และการควบคุมแรงบิดของ Link 2 นั้นเมื่อเราใส่ Input ค่า  $K_D, K_P$  ทำให้ Joint เคลื่อนที่เข้าหา องศาที่เรากำหนด

## สรุป

จากการนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบ Adaptive Control เพื่อใช้ในการควบคุมแขนหุ่นยนต์ แบบสองข้อต่อ ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด เพื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกล ระหว่าง PD Control กับ Adaptive Control โดยทั้งสองใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าการเคลื่อนที่แบบ Adaptive Control นั้นจะมีค่า Error และแรงบิดที่ราบเรียบกว่า การเคลื่อนที่แบบ PD Control ดังนั้น การเคลื่อนที่ที่ ควบคุมโดย Adaptive Control เหมาะที่จะนำมาควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลมากกว่าแบบ PD Control โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางอุตสาหกรรมและสามารถนำไปใช้เป็น กระบวนการ ในการเทียบเคียงสมรรถภาพของตัวควบคุมต่างๆได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ผศ.ดร.สถาพร ลักษณะเจริญ. (2548).**วิศวกรรมหุ่นยนต์ Robotics Engineering**.กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. (ไทย-ญี่ปุ่น)
- [2] Jean-Lacques E.Slotine, Applied Nonlinear Control. New Jersey: Prentice-Hall
- [3] Louis L. Whitcomb, Suguru Arimoto, Tomohide Naniwa, and Fumio Ozaki, "Adaptive Model-Based Hybrid Control of Geometrically Constrained Robot Arms" IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.13, No.1, February 1997.
- [4] John T. Wen, Kenneth Kreuts, and David S. Bayard, "A New Class of Energy Based Control Laws for Revolute Robot Arms: Tracking Control, Robustness Enhancement and Adaptive Control"

  Jet Propulion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oakgrove Dr., Mail Stop 198-330 Pasadena, CA 91109.
- [5] Abd Manan Ahmad, Lee Ing Chen, and Fatimah Mohamad, "Simulation of Stable-Adaptive Control of Robot Arm Using Self-organizing Neural Network" 2002 Student Conference on Research and Development Proceedings, Shah Alam, Malaysia.
- [6] Jung Hua Yang, Feng Li Lian, and Li Chen Fu, "Nonlinear Adaptive Control for Flexible-Link
  Manipulators" IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.13, No.1, February 1997.