RMUTT 2-3-0-31 (EN-30)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอรับรองว่าผลงานวิจัย

เรื่อง

การออกแบบระบบควบคุมแบบ Adaptive Control
เพื่อใช้ในการควบคุมแขน Puma Robot ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด

โดย

คมกฤช อาษากิจ และปรัชญา เปรมปราณีรัชต์

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

และได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49
ระหว่างวันที่ 1 - 4 กุมภาพันธ์ 2554

(รองศาสตราจารย์ ดร.พนิต เข็มทอง)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 49

ผู้ทรงคุณวุฒิภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

1. ก้าธร กุลชล 2. สุวัฒนา ธาดานิติ 3. ประสงค์ เอี่ยมอนันต์

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

4. ชนิกานต์ ยิ้มประยูร

สาขาวิชาผังเมืองและสภาพแวดล้อม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

5. ธนภณ พันเสน

สาขาวิชาภูมิสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

6. ไพศาล เทพวงศ์ศิริรัตน์ 7. วันดี พินิจวรสิน

ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร

8. ณัฏฐ พิชกรรม 9. อลิศรา มีนะกนิษฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

10. สันติ ชินานุวัติวงศ์ 11. สุธารัน สถาปิตานนท์ 12. กิจพัฒน์ ภูวรวรรณ 13. วันชัย ยอดสุดใจ
14. อภินิติ โชติสังกาศ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

15. เมตตา เจริญพาณิช 16. เทอดไทย วัฒนธรรม 17. ผึ้งหวาย พรรณวดี 18. ไพศาล คงคาฉุยฉาย
19. อรรถศักดิ์ อารีย์ 20. นันทิยา หาญศุภลักษณ์ 21. มานะ เจริญไชยตระกูล 22. มนตรี สวาวพฤกษ์
23. ปริมา สุริยะธนากาล

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

24. ดวงฤดี ฉายสุวรรณ 25. อรทัย จงประทีป 26. ปฏิภาณ จุ้ยเจิม 27. อัมพิกา บันสิทธิ์
28. อภิชาติ โรจนโรวรรณ 29. นุชนภา ตั้งบริบูรณ์ 30. ปริญญา ฉกาจนโรดม 31. วิศิษฎ์ โล่เจริญรัตน์
32. อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล 33. ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

34. สมหญิง ไทยนิมิต 35. พูนลาภ ลามศรีจันทร์ 36. ชูเกียรติ การะเกตุ 37. วิรุณศักดิ์ สันติเพียร
38. ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม 39. ดุสิต ธนเพทาย 40. ปฐมาภรณ์ ศิริผดุงธรรม 41. สุเนตร พรานนท์สถิตย์
42. ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ 43. เด่นชัย วรเศวต 44. คมสันต์ หงษ์สมบัติ 45. สัญชัย เดชานุภาพฤทธา
46. พิสุทธิ์ รพีศักดิ์ 47. มิติ รุจานุรักษ์ 48. วินัย พฤกษะวัน 49. ศรีจิตรา เจริญลาภนพรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

50. ชวลิต กิตติชัยการ 51. สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์ 52. เอกโท วิโรจน์สกุลชัย 53. อภิชาต แจ้งบำรุง
54. วิชัย ศิวะโกศิษฐ 55. ณัฐศักดิ์ บุญมี 56. ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล 57. จีระชัย มิ่งบรรเจิดสุข
58. ประพจน์ ขุนทอง 59. กรรมฉันต์ ชูประเสริฐ 60. วรางค์รัตน์ จันทสาโร 61. เกรียงไกร อัศวมาศบันลือ

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

62. ฉัตรดนัย จิระเดชะ 63. ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา 64. วินัย เลียงเจริญสิทธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

65. รุ่งรัตน์ ภิสัชเพ็ญ 66. สุวิวัฒน์ สืบสานกุล 67. จุฑา พิชิตลำเค็ญ 68. วรวุฒิ หวังวัชรกุล
69. จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน 70. วิสุทธิ์ สุพิทักษ์ 71. จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

72. สมยศ เชิญอักษร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์

73. ภูมเรศ แสงราม

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

74. หวี งามวิไลกร

ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

1.	ปราโมทย์	เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2.	จตุพร	วุฒิกนกกาญจน์	สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
3.	ภาวิณี	ชัยประเสริฐ	สายวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
4.	สุธิชัย	ชัยสิทธิ์ศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5.	สมเกียรติ	ศุภเดช	สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
6.	ชนินทร์	ทิพโยภาส	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
7.	ชัยสิทธิ์	ด่านกิตติกุล	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
8.	ชำนาญ	บุญญาพุทธิพงศ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
9.	พยุงศักดิ์	จุลยุเสน	สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
10.	อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
11.	ธีรธรรม	บุณยะกุล	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
12.	ศิววรรณ	พูลพันธุ์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
13.	สิริลักษณ์	เจียรากร	สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
14.	ปานหทัย	บัวศรี	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
15.	ยุทธนา	ขำสุวรรณ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การออกแบบระบบควบคุมแบบ ADAPTIVE CONTROL เพื่อใช้ในการควบคุมแขน PUMA ROBOT ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด

DESIGN OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR TRAJECTORY TRACKING OF PUMA ROBOT ARM

คมกฤช อาษากิจ[1] และ ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์[1]

Khomkrit Asakit[1] and Pradya Prempraneerach[1]

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม Adaptive Control ที่ไม่เชิงเส้นเพื่อใช้ควบคุมแขนหุ่นยนต์ที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีการเคลื่อนที่ และใช้ปลายแขนของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนย้ายวัตถุจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ตามที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่ออกแบบไว้

โดยการศึกษาเริ่มจากทำการวางแผนแบบจำลองโดยใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ Model Reference Adaptive Control (MRAC) ในรูปแบบอ้างอิงโดยใช้ Adaptive Control ในการจำลองเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เรายังไม่รู้ พร้อมกับแบบจำลองแขนหุ่นยนต์แบบสองข้อต่อ ทางคณิตศาสตร์หลังจากศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล และตัวควบคุมแล้วจึงนำไปเปรียบเทียบเพื่อให้การทำงานของแขนกลและปลายของแขนกลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ

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

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านต่างๆ ได้เจริญก้าวหน้าไปมากโดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการนำเครื่องจักรและอุปกรณ์อัตโนมัติต่างๆ มาใช้งานแทนแรงงานคนทั้งในด้านการผลิตและรับส่งชิ้นส่วนต่างๆ ภายในโรงงานสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความต้องการความแม่นยำสูง จึงให้ความสำคัญเป็นอย่างมากกับเครื่องจักรที่นำมาใช้ดังนั้นระบบควบคุมที่ดีจึงมีความสำคัญและระบบควบคุมแบบต่างๆ ก็มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ประเภทและการนำไปใช้งาน จึงทำให้มีระบบการควบคุมต่างๆที่สำคัญมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากการนำระบบการควบคุมไปใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ต่อมาระบบมีความซับซ้อนมากขึ้นซึ่งส่วนใหญ่เป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ เช่น การควบคุมแขนหุ่นยนต์ การควบคุมมอเตอร์ หรืองานควบคุมเครื่องจักรกลในด้านอุตสาหกรรมเป็นต้น จึงเกิดทฤษฎีการควบคุมมากมาย เพื่อให้สามารถควบคุมอุปกรณ์ต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่ผ่านมามีกลุ่มนักวิจัย Louis L. Whitcomb และคณะ [3] ได้ศึกษาการทดลองเชิงเปรียบเทียบของชุดคำสั่งควบคุมแรงปรับตัวพื้นฐานตัวแบบใหม่สำหรับแขนหุ่นยนต์โดยเครื่องควบคุมนี้จัดให้มีการแกะรอยวิถีโคจรของแรงและตำแหน่งในเวลาเดียวกันของแขนหุ่นยนต์ที่ทูลทิปของมันอยู่ในจุดที่ติดต่อกับผิวหน้าเรียบแข็ง ชุดคำสั่งคงที่เกี่ยวกับตัวแบบพลวัตไม่เป็นเส้นตรงลำตัวแข็งที่ยอมรับทั่วไปและพิสูจน์ได้สำหรับแขนหุ่นยนต์การทดลองเชิงเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมพื้นฐานตัวแบบปรับตัวได้แบบใหม่จัดให้มีสมรรถภาพของทั้งเครื่องควบคุมพื้นฐานการไม่มีตัวแบบ(นิยนโมเดล)และแบบปรับตัวไม่ได้ที่เหนือกว่าพิสัยกว้างของสภาพการปฏิบัติงาน John T. Wen และคณะ [4] ได้ศึกษาการทำงานแบบลีอาปูนอฟโดยใช้พลังงานการทำงานแบบลีอาปูนอฟกับพลังงานศักย์ดัดแปลง มาวิเคราะห์ความคงที่แบบเลขชี้กำลัง เมื่อมีแรงเสียดทานแบบหนืดและแบบคูลอมบ์ และความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของตัวแบบเกิดขึ้นการดัดแปลงแบบเลื่อนของกฎควบคุมจึงถูกนำเสนอเพื่อเพิ่มสภาพทนทานและยกระดับวงแหวนรอบนอก การควบคุมการปรับตัวมีตำแหน่งอยู่ภายในโครงสร้างเดียวกันเช่นกัน การกำหนดเส้นตรงในพารามิเตอร์จึงถูกได้มาและกฎควบคุมการปรับตัวคงที่เชิงเส้นกำกับระดับโลกก็ได้รับมาโดยการแทนที่พารามิเตอร์ตัวแบบในกฎควบคุมแบบไม่ปรับตัวโดยการประมาณค่า Abd Manan Ahmad และคณะ [5] ได้นำเสนอแบบจำลองของตัวควบคุมเครือข่ายประสาทสำหรับแขนหุ่นยนต์สามการเชื่อมต่อ เครือข่ายนี้อยู่บนพื้นฐานแผนที่การจัดตั้งตัวเองของโคโฮเน็นแบบดัดแปลง ในตัวแบบที่นำเสนอ เครือข่ายวกกลับและเครือข่ายเอสโอเอ็มดัดแปลงถูกเชื่อมต่อกัน Jung Hua Yang และคณะ [6] ได้ศึกษาปัญหาการควบคุมหุ่นยนต์ที่ยืดหยุ่นได้ โดยผังควบคุมแบบไม่เชิงเส้น ได้ถูกนำเสนอเป็นการแก้ปัญหาต่อปัญหาการควบคุมโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เพื่อจัดการกับความไม่แน่นอนของตัวแบบที่มีอยู่ เวอร์ชันปรับตัวได้ของกฎควบคุมแบบไม่เชิงเส้นนี้จึงถูกนำเสนอ จากนั้นการพิสูจน์ความคงที่ของระบบวงจรปิดโดยรวมจึงถูกมอบให้ทางการวิเคราะห์แบบลีอาปูนอฟ และยังมีการจัดให้มีผลการทดลองอย่างกว้างขวาง เพื่อสาธิตประสิทธิภาพของเครื่องควบคุม

เนื่องจากในระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมโดยส่วนมากแล้วจะใช้ PID Controller มาทำการควบคุม ซึ่งมันก็ทำงานได้ดีในช่วงที่เรา Liberalization รอบๆจุดทำงานแต่เมื่อใดก็ตามถ้าจุดทำงานของเราเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงหรือว่า parameter บางตัวมีการเปลี่ยนแปลงเช่น มวลของระบบ, ความยาว และอื่นๆหรืออาจมี parameter ที่เราไม่ได้นำมาคิดมันจะทำให้ controller ที่เราออกแบบไว้เริ่มทำงานไม่ได้หรือไม่สามารถทำงานได้เลย ดังนั้น adaptive control จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นำมาใช้แก้ปัญหานี้ โดยทั่วไปแล้วการควบคุมแบบปรับตัว

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

จุดสำคัญหลักๆของการควบคุมแบบ Adaptive control คือมันสามารถปรับ gain ของตัวเองได้ถ้าเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลง parameter ดังนั้นค่า gain จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเหมาะสม เนื่องจากมันจะนำเอาค่าความผิดพลาดที่ได้จาก plant จริงมาเปรียบเทียบกับ model ที่เราออกแบบเมื่อได้ที่มีค่าความผิดพลาดเกินขึ้น ค่า gain จะมีการปรับตัวโดยอัตโนมัติ

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยพิจารณาแขนที่เป็นแบบราบ มีการเชื่อมต่อ 2 ส่วน และมีส่วนเชื่อมต่อ (รูปที่1) ซึ่งตำแหน่งนั้นสามารถอธิบายได้ด้วย 2-vector q ของมุมร่วม และ Input ของ Actuator ประกอบไปด้วย 2-vector τ ของแรงบิด (Torque) ที่ประยุกต์ใช้ที่ข้อต่อของแขน พลวัตของแขนกลแบบพื้น ๆ นั้นเป็นแบบไม่เชิงเส้นและสามารถเขียนในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \tag{1}$$

โดยที่ $H(q)$: เป็นแมทริกซ์ความเฉื่อยของแขนหุ่นแบบ 2 x 2 (ซึ่งเป็นจำนวนเต็มที่เป็นบวกสมมาตร)

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

$g(q)$: เป็น 2-vector ของแรงบิดที่มาจากแรงดึงดูดของโลก

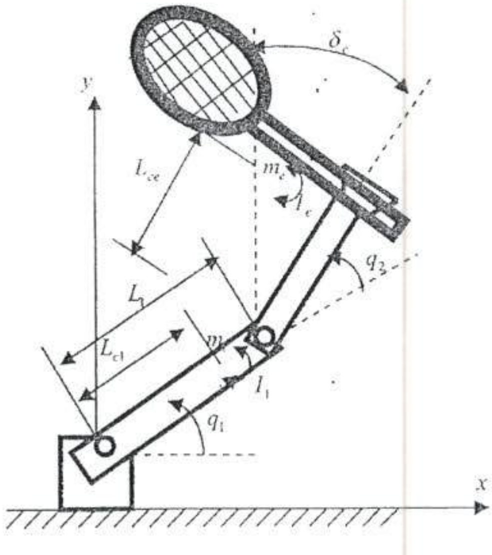

Figure 1 An articulated two-link manipulator

1. วิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย PD Control

สมการไดนามิคสามารถเขียนได้ดังนี้

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

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 เพื่อแก้สม

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

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

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

หาค่า τ_1 และ τ_2 จาก

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

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

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

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

$$a_1 = I_1 + m_1 l_{c1}^{\ 2} + I_e + m_e l_{ce}^{\ 2} + m_e l_1^{\ 2},\ a_2 = I_e + m_e l_{ce}^{\ 2}$$

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

โดยมีเงื่อนไขในตัวอย่างนี้คือ

$m_1 = 1, l_1 = 1, m_e = 2, \delta_e = 30^\circ, I_1 = 0.12, I_{c1} = 0.5, I_e = 0.25, l_{ce} = 0.6, q_1 = 0, q_2 = 0, q_{d1} = 60^\circ, q_{d2} = 90^\circ$ $K_D = 100, K_p 20K_D$ เมื่อแก้สมการแล้วจะได้ค่า $H_{11}, H_{12}, H_{21}, H_{22}$ เพื่อนำไปหาค่าการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ แล้วใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำลองการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์และค่าของแรงบิด (toque) เป็นแบบ PD Control ตามที่กำหนดไว้

2. วิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย Adaptive Control (MRAC)

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

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

จากทฤษฎีของ Lyapunov Function พลังงานทั้งหมดจะเท่ากับพลังงานจลน์บวกกับพลังงานศักดิ์และค่าที่ได้จะต้องมากกว่าศูนย์เสมอ จึงได้สมการเป็น

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

หา

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

จะได้

$$s = \dot{\tilde{q}} + \Lambda\tilde{q} = \dot{q} - \dot{q}_d + \Lambda\tilde{q} \qquad \text{โดยที่ } \dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda\tilde{q}$$

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

จากสมการของ Robot

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

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

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

จากสมการที่ (1) แทน ลงไปในสมการที่ (2)

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

แทนค่าสมการ (3a) ลงในสมการ (4)

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

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

$$\dot{V} = s^T(\tau - H\ddot{q}_r - C\dot{q}_r - g) + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{a} \quad \text{โดยที่ } H\ddot{q}_r + C\dot{q}_r + g = Ya$$

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

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

แทนสมการ (6) ลงในสมการ (5)

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

$$\dot{V} = s^T Y\tilde{a} - s^T K_D s + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{a} \tag{7}$$

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

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

แทนสมการ (8) ลงในสมการ (7)

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

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

จากสมการข้างต้นเราก้าหนดค่า Parameter ดังนี้

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

ผลการทดลอง

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

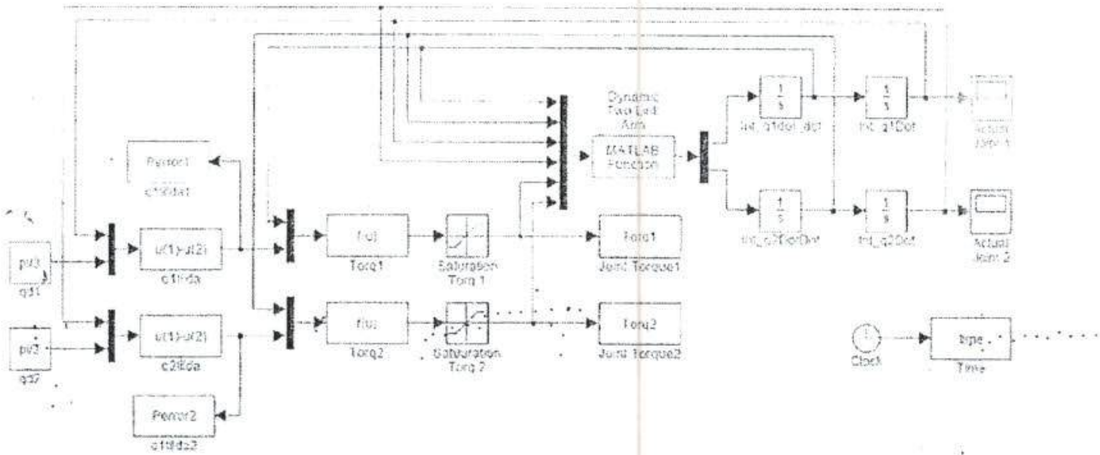

Figure 2 A model of PD Control two-link robot arm to solve equation of trajectory by Matlab/Simulimk

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

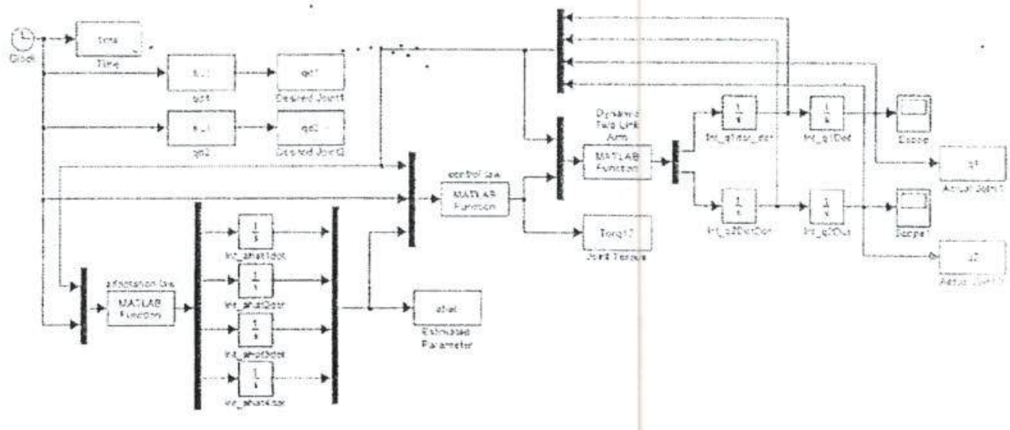

Figure 3 A model of MRAC two-link robot arm to solve equation of trajectory by Matlab/Simulimk

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

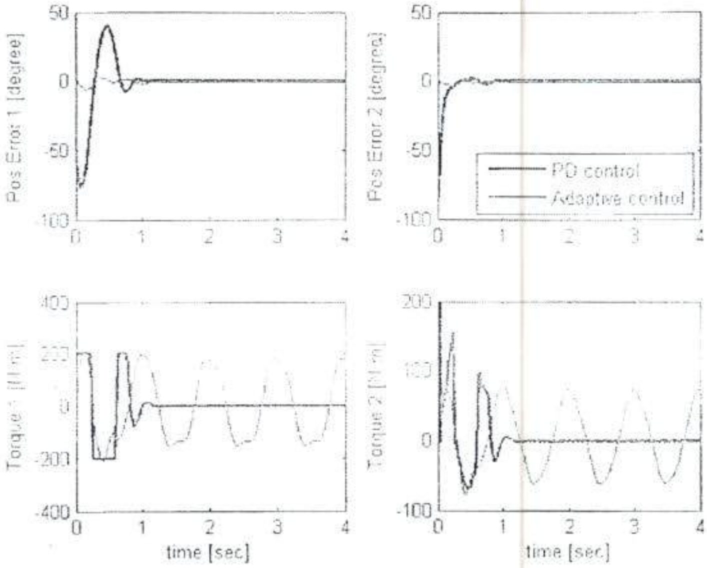

Figure 4 Comparison of position errors link 1 and link 2 (Top Row) between PD Control with Adaptive Control, and control torques link 1 and link 2 (Bottom Row)

4. กราฟใน Figure 5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่าพารามิเตอร์ของ PD control กับ Adaptive control

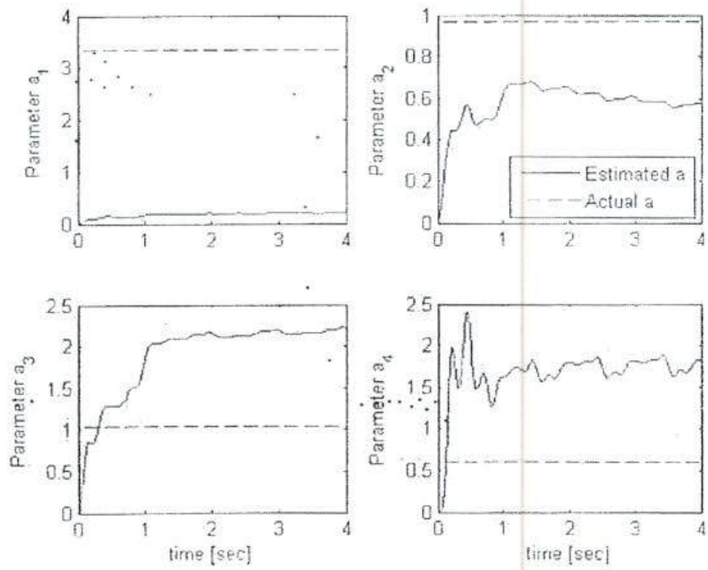

Figure 5 Comparison of parameter estimates $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4$ (blue) and a_1, a_2, a_3, a_4 (red)

ผลจากการออกแบบระบบควบคุมแบบ Adaptive Control เพื่อใช้ในการควบคุมแขน Puma Robot ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของแขนกล โดย

ใช้แบบควบคุม Adaptive control ผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่ากราฟที่ได้ (Figure 4) มานั้นเป็นกราฟของตำแหน่ง Error ของ Link1 และ Error ของ Link2 โดยเส้นกราฟจะมีค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ 0 ตามที่เรากำหนดมุมองศาของ Joint 1 และ Joint 2 ที่ Link 1จะอยู่ที่ตำแหน่ง 60° และ Link 2 จะอยู่ที่ตำแหน่ง 90° ส่วนกราฟการควบคุมแรงบิดของ Link 1 และการควบคุมแรงบิดของ Link 2 นั้นเมื่อเราใส่ Input ค่า K_D, K_p ทำให้ Joint เคลื่อนที่เข้าหาองศาที่เรากำหนด

สรุป

จากการนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบ Adaptive Control เพื่อใช้ในการควบคุมแขนหุ่นยนต์แบบ[illegible] ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด เพื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกล[illegible] PD Control กับ Adaptive Control โดยทั้งสองใช้โปรแกรม Matlab Simulink จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าการเคลื่อนที่แบบ Adaptive Control นั้นจะมีค่า Error และแรงบิดที่ราบเรียบกว่า การเคลื่อนที่แบบ PD Control ดังนั้น การเคลื่อนที่ที่ควบคุมโดย Adaptive Control เหมาะที่จะนำมาควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลมากกว่าแบบ PD Control โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางอุตสาหกรรมและสามารถนำไปใช้เป็นกระบวนการ 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.