สารบัญเรื่อง

1. บทนำ 10
   1.1. ส่วนนำ 10
   1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ 10
   1.3. การออกแบบการวิจัย 10
   1.4. ขอบเขตการวิจัย 10
2. ระเบียบวิธีวิจัย 11
   2.1. ระบบที่ถูกใช้ในการควบคุม 11
      2.1.1. ระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรผันตามเวลา 11
      2.1.2. ระบบหุ่นยนต์แขนกล 12
   2.2. ทฤษฎีพื้นฐานของระบบควบคุมจากการทำซ้ำ 13
      2.2.1. การควบคุมแบบเรียนรู้ที่ทำแบบต่อเนื่อง 14
      2.2.2. การควบคุมแบบเรียนรู้ที่มีการย้อนกลับไปสู่ภาวะเริ่มต้น 15
   2.3. วิธีพื้นฐานของการออกแบบตัวควบคุมแบบเรียนรู้ที่มีการย้อนกลับไปสู่ภาวะเริ่มต้น 17
      2.3.1. Contraction Mapping ILC Law 17
      2.3.2. Partial Isometry ILC Law 17
      2.3.3. Quadratic Cost ILC Law 17
   2.4. วิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบเรียนรู้ที่มีการย้อนกลับไปสู่ภาวะเริ่มต้นจากข้อมูล
      เชิงความถี่ของระบบ 18
      2.4.1. Optimization Control Law 18
      2.4.2. Optimization Control Law with minimal gain size 19
      2.4.3. Column cut-off control Law 19
   2.5. วิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบเรียนรู้ที่มีการย้อนกลับไปสู่ภาวะเริ่มต้น
      โดยวิธีการปรับเกนให้เกิดการเรียนรู้เร็วที่สุด 20
      2.5.1. Sensitivity function 20
      2.5.2. Steepest descent method 22
   2.6. การออกแบบตัวควบคุมแบบเรียนรู้ที่มีการย้อนกลับไปสู่ภาวะเริ่มต้นโดยวิธีการหาค่าเฉลี่ย 24
      2.6.1. Averaging Contraction Mapping ILC Law 24
      2.6.2. Averaging Partial Isometry ILC Law 24
      2.6.3. Averaging Quadratic Cost ILC Law 24
3. ผลการทดลอง 25
   3.1. ผลการทดลองจากการออกแบบตัวควบคุมแบบเรียนรู้ที่มีการย้อนกลับ
      ไปสู่ภาวะเริ่มต้นโดยวิธีการปรับค่าเกนให้เกิดการเรียนรู้เร็วที่สุด 25
      3.1.1. ผลการออกแบบ Repetitive Control Law แบบ Optimization 25
         3.1.1.1. กรณี $\nu = 0$ และ sampling time เท่ากับ 1/100 วินาที 25
         3.1.1.2. กรณี $\nu = 0.1$ และ sampling time เท่ากับ 1/100 วินาที 26
         3.1.1.3. กรณี $\nu = 0.2$ และ sampling time เท่ากับ 1/100 วินาที 26
         3.1.1.4. กรณี $\nu = 0$ และ sampling time เท่ากับ 1/50 วินาที 27

3.1.1.5. กรณี $v=0.1$ และ sampling time เท่ากับ 1/50 วินาที 27
3.1.1.6. กรณี $v=0.2$ และ sampling time เท่ากับ 1/50 วินาที 28
3.1.2. ความสัมพันธ์ระหว่าง Learning cutoff frequency กับขนาด ของ Gain size weight v 28
3.1.2.1. กรณี $v=0$ 29
3.1.2.2. กรณี $v=0.1$ 29
3.1.2.3. กรณี $v=0.2$ 30
3.1.3. ค่า Sensitivity ของการออกแบบตัวควบคุม ILC แบบต่างๆ 31
3.1.3.1. กรณี $v=0$ $c=0$ และ sampling time เท่ากับ 1/50 วินาที 31
3.1.3.2. กรณี $v=0$ $c=1$ และ sampling time เท่ากับ 1/50 วินาที 31
3.1.3.3. กรณี $v=0$ $c=2$ และ sampling time เท่ากับ 1/50 วินาที 32
3.1.3.4. กรณี $v=0$ $c=0$ และ sampling time เท่ากับ 1/100 วินาที 32
3.1.3.5. กรณี $v=0$ $c=1$ และ sampling time เท่ากับ 1/100 วินาที 33
3.1.3.6. กรณี $v=0$ $c=2$ และ sampling time เท่ากับ 1/100 วินาที 33
3.1.4. Stability ของตัวควบคุม ILC แบบมีการปรับค่าเกนเพียง 1 ค่า ที่ cutoff number (c) ค่าต่างๆ 34
3.1.4.1. กรณี $c=0$ 34
3.1.4.2. กรณี $c=1$ 35
3.1.4.3. กรณี $c=2$ 35
3.1.5. ผล simulation ของตัวควบคุม ILC แบบมีการปรับค่าเกนเพียง 1 ค่า ที่ cutoff number (c) ค่าต่างๆ 36
3.1.5.1. กรณี $c=0$ 37
3.1.5.2. กรณี $c=1$ 38
3.1.5.3. กรณี $c=2$ 39
3.1.6. Stability ของตัวควบคุม ILC แบบมีการปรับค่าเกนมากกว่า 1 ค่า 39
3.2. ผลการทดลองจากการออกแบบตัวควบคุมแบบเรียนรู้ที่มีการย้อนกลับไปสู่ภาวะเริ่มต้นโดยวิธีการหาค่าเฉลี่ย 40
4. สรุปผลการทดลอง 45
5. บรรณานุกรม 46
6. ภาคผนวก 47
6.1. ประวัตินักวิจัย 47
6.2. ผลงานตีพิมพ์จากงานวิจัย 50
6.3. เอกสารแนบหมายเลข 2 รูปแบบ abstract (บทคัดย่อ) 51
6.4. เอกสารแนบหมายเลข 3 output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจากสกว 53

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 ขนาดและเฟสของระบบหุ่นยนต์แขนกลที่ใช้ในการทดลอง 13

รูปที่ 2.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ในแต่ละ iteration update โดยใช้ Steepest descent 23

รูปที่ 3.1 Polar plot ของ $G(e^{i\omega T})F(e^{i\omega T})$ เมื่อ $v=0$ และ t_s เท่ากับ 1/100 วินาที 25

รูปที่ 3.2 Polar plot ของ $G(e^{i\omega T})F(e^{i\omega T})$ เมื่อ $v=0.1$ และ t_s เท่ากับ 1/100 วินาที 26

รูปที่ 3.3 Polar plot ของ $G(e^{i\omega T})F(e^{i\omega T})$ เมื่อ $v=0.2$ และ t_s เท่ากับ 1/100 วินาที 26

รูปที่ 3.4 Polar plot ของ $G(e^{i\omega T})F(e^{i\omega T})$ เมื่อ $v=0$ และ t_s เท่ากับ 1/50 วินาที 27

รูปที่ 3.5 Polar plot ของ $G(e^{i\omega T})F(e^{i\omega T})$ เมื่อ $v=0.1$ และ t_s เท่ากับ 1/50 วินาที 27

รูปที่ 3.6 Polar plot ของ $G(e^{i\omega T})F(e^{i\omega T})$ เมื่อ $v=0.2$ และ t_s เท่ากับ 1/50 วินาที 28

รูปที่ 3.7 ขนาดของเกน เมื่อ $v=0$ และ t_s เท่ากับ 1/50 วินาที 29

รูปที่ 3.8 ขนาดของเกน เมื่อ $v=0.1$ และ t_s เท่ากับ 1/50 วินาที 29

รูปที่ 3.9 ขนาดของเกน เมื่อ $v=0.2$ และ t_s เท่ากับ 1/50 วินาที 30

รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง v และ learning cutoff frequency 30

รูปที่ 3.11 Sensitivity เมื่อ $v=0$ $c=0$ และ sampling time เท่ากับ 1/50 วินาที 31

รูปที่ 3.12 Sensitivity เมื่อ $v=0$ $c=1$ และ sampling time เท่ากับ 1/50 วินาที 31

รูปที่ 3.13 Sensitivity เมื่อ $v=0$ $c=2$ และ sampling time เท่ากับ 1/50 วินาที 32

รูปที่ 3.14 Sensitivity เมื่อ $v=0$ $c=0$ และ sampling time เท่ากับ 1/100 วินาที 32

รูปที่ 3.15 Sensitivity เมื่อ $v=0$ $c=1$ และ sampling time เท่ากับ 1/100 วินาที 33

รูปที่ 3.16 Sensitivity เมื่อ $v=0$ $c=2$ และ sampling time เท่ากับ 1/100 วินาที 33

รูปที่ 3.17 ค่า Singular value ที่สูงสุดและสูงสุดอันดับสอง
และค่า spectral radius เมื่อ $c=0$ 34

รูปที่ 3.18 ค่า Singular value ที่สูงสุดและสูงสุดอันดับสอง
และค่า spectral radius เมื่อ $c=1$ 35

รูปที่ 3.19 ค่า Singular value ที่สูงสุดและสูงสุดอันดับสอง
และค่า spectral radius เมื่อ $c=2$ 35

รูปที่ 3.20 Trajectory input ทั้ง 4 ประเภทที่ใช้ในการทำ simulation 36

รูปที่ 3.21 RMS error จาก Trajectory input ทั้ง 4 ประเภท 37

รูปที่ 3.22 RMS error จาก Trajectory input ทั้ง 4 ประเภท โดยไม่นำค่า error
ใน time step แรกมาคิด 38

รูปที่ 3.23 RMS error จาก Trajectory input ทั้ง 4 ประเภท โดยไม่นำค่า error
ใน 2 time step แรกมาคิด 39

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบเสถียรภาพของระบบโดยใช้ตัวควบคุมแบบcontraction mapping 41
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเสถียรภาพของระบบโดยใช้ตัวควบคุมแบบ partial isometry 42
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเสถียรภาพของระบบโดยใช้ตัวควบคุมแบบ quadratic cost 43