

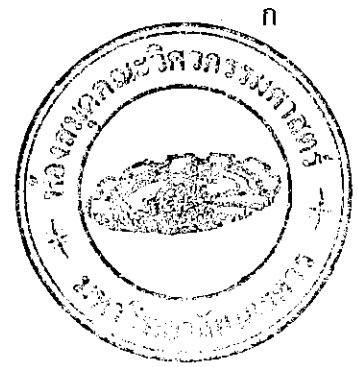
การสร้างเสถียรภาพให้กับลูกตุ้มล้อเฉื่อย
Stabilizing of Inertia Wheel Pendulum

นายพยนต์ ลิ้มประดิษฐ์ รหัส 48361042
นายชินนทร มั่งมี รหัส 48363473
นายชนศักดิ์ สุระเสียง รหัส 48363596

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ.....
เลขทะเบียน..... 5200094
เลขเรียกหนังสือ.....
มหาวิทยาลัย.....

5094409. e.2
พ.ร.
พ215ก.
2551

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2551



ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

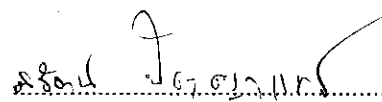
หัวข้อโครงการ : การสร้างเสถียรภาพให้กับลูกตุ้มล้อเข็ญ

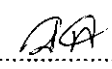
ผู้ดำเนินโครงการ : นายพนต์ ลืมประดิษฐ์ รหัส 48361042
นายชินทร มั่งมี รหัส 48363473
นายธศศักดิ์ สุระเสียง รหัส 48363596

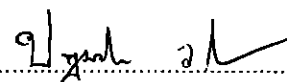
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา : 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาดตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว)


..... กรรมการ
(ผศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)


..... กรรมการ
(ผศ.ดร.ปฐมศก วิไลพล)

หัวข้อโครงการ : การสร้างเสถียรภาพให้กับลูกคัมล้อยืด
ผู้ดำเนินโครงการ : นายพนต์ ลิ้มประดิษฐ์ รหัส 48361042
นายชนินทร์ มั่งมี รหัส 48363473
นายธนศักดิ์ สุระเสียง รหัส 48363596
อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา : 2551

.....

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบสร้างระบบควบคุมให้กับลูกคัมล้อยืด ซึ่งระบบนี้เป็นระบบที่มีรูปแบบสมการทางพลศาสตร์ที่ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสื่อการสอนให้กับนักศึกษาที่เริ่มต้นเรียนทฤษฎีระบบควบคุมและเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นชุดทดลองสอบเทียบเพื่อศึกษาทฤษฎีระบบควบคุมขั้นสูงอีกด้วย อาทิ เช่น ไฮบริดคอนโทรล

ในโครงการนี้ได้ทำการออกแบบระบบควบคุมให้ลูกคัมล้อยืดมีการเคลื่อนที่ 2 โหมด โดยโหมดแรกจะควบคุมให้ลูกคัมล้อยืดมีเสถียรภาพในแนวตั้งด้านบน ส่วนโหมดที่สองนั้นจะควบคุมให้ลูกคัมล้อยืดเคลื่อนที่กวัดแกว่งจากแนวตั้งด้านล่างขึ้นไปด้านบน

จากการทดสอบในโปรแกรม MATLAB พบว่า การตอบสนองในโหมดแรกนั้นมี Settling time เท่ากับ 0.6 และ Percent overshoot เท่ากับ 0.7 ส่วนในโหมดที่สองนั้นจะกวัดแกว่งด้วยความถี่เชิงมุมเท่ากับ 6.98 rad/s และมีคาบเวลาเท่ากับ 0.9

Project Title : Starbilizing of Inertia wheel pendulum

Name : Mr.Phayon Limpradit Code 48361042
Mr.Chanintorn Mungmee Code 48363473
Mr.Tanasak Soorasiang Code 48363596

Project Advisors : Mr.Surut Punyakeaw

Department : Mechanical Engineering

Academic Year : 2008

Abstract

This project proposes to study and design the control system for inertia wheel pendulum. The dynamics of this system are simple so that it can be introduced to students earlier in control theory and can be used as a benchmark experiment to study advanced control, such as hybrid control

This is a project to designing the controls system by inertia wheel pendulum has the movements 2 mode by first mode; control inertia wheel pendulum have the stability of top vertical. Second mode; control inertia wheel pendulum oscillate from the vertical below goes up the top.

From the test the MATLAB PROGRAM findings that response of first mode that has Setting Time = 0.6 and Percent Overshoot = 0.7 and second mode will wave by Angular Frequency = 6.98 rad/s and Period Time = 0.9

กิตติกรรมประกาศ

โครงการด้านวิศวกรรมเครื่องกลนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือในด้านการให้คำแนะนำในการทำโครงการจากอาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำปรึกษาผู้ดำเนินโครงการตลอดมา คณะผู้ดำเนินงานขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณสำนักงานหอสมุดมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านการให้สืบค้นด้านเนื้อหาที่เกี่ยวข้องและวารสาร จากสำนักหอสมุดจากมหาวิทยาลัยอื่นๆ

ขอขอบคุณ อาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนินโครงการ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่กรุณาให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในด้านหนังสือสำหรับค้นคว้าเพิ่มเติมตลอดโครงการนี้

ขอขอบคุณ อู่ สุขเจริญแทรกเตอร์ อำเภอ ศรีสังขนาลัย จังหวัด สุโขทัย ที่ให้ความเอื้อเฟื้อและการอนุเคราะห์ในด้านการจัดสร้างแบบจำลองลูกตุ้ม Pendulum จนเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้คณะผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้การอบรมเลี้ยงดูสั่งสอน สนับสนุนและเป็นกำลังในด้านการศึกษาจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีจนสำเร็จการศึกษาแก่ผู้ดำเนินโครงการอย่างสม่าเสมอตลอดมา

คณะผู้ดำเนินโครงการ

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการงาน	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ-ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ซ
ลำดับสัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของ โครงการงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขต	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 อุปกรณ์ที่ใช้	4
1.8 งบประมาณ	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 ระบบควบคุม	5-6
2.2 การควบคุมป้อนกลับ (Feedback control)	
2.2.1 ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุม- แบบเปิด-ปิด (On-off Control)	7
2.2.2 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)	8-11
2.2.3 ระบบควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control)	11-12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional plus integral Control)	12-14
2.2.5 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)	15-16
2.2.6 การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ (Proportional plus Derivative Control)	16-17
2.2.7 Proportional plus Integral control (PID control)	17-18
บทที่ 3 การวิเคราะห์ระบบทางคณิตศาสตร์ให้กับ Inertia wheel pendulum	
3.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้กับ Inertia wheel pendulum	19-21
3.2 การออกแบบระบบควบคุมให้กับ Inertia pendulum	
3.2.1 การออกแบบระบบควบคุมโหมดการควบคุมที่ 1	21-23
3.2.2 การออกแบบระบบควบคุมโหมดการควบคุมที่ 2	23-24
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์	
4.1 โหมดที่ 1	25
4.2 โหมดที่ 2	26
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์วิเคราะห์	27
5.2 ข้อเสนอแนะ	27
บรรณานุกรม	28
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	30-35
ภาคผนวก ข	36-39
ประวัติผู้เขียน โครงการงาน	40

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 2.1 ระบบควบคุมแบบเปิด	6
รูป 2.2 ระบบควบคุมแบบปิด	6
รูป 2.3 ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด	7-8
รูป 2.4 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต	9
รูป 2.5 การตอบสนองของคอนโทรลเลอร์แบบ Proportional control	10
รูป 2.6 ระบบควบคุมแบบ Proportional control	10
รูป 2.7 ลักษณะการตอบสนองของคอนโทรลเลอร์แบบ Integral control	11
รูป 2.8 ระบบควบคุมแบบ Integral control	12
รูป 2.9 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย Proportional plus Integral	12
รูป 2.10 การตอบสนองของ PI controller	13
รูป 2.11 การตอบสนองของ Derivative Control	15
รูป 2.12 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย Derivative Control	16
รูป 2.13 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย PD Control	17
รูป 2.14 Block diagram ที่ประกอบด้วย PID control	17
รูป 4.1 การออกแบบโหมดการควบคุมที่ 1	25
รูป 4.2 การออกแบบโหมดการควบคุมที่ 2	26

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1.1 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน	3
ตาราง 1.2 งบประมาณ	4
ตาราง 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแต่ละประเภท	18



ลำดับสัญลักษณ์

B_n	แรงในแนวแกน n	N
B_t	แรงในแนวแกน t	N
J	โมเมนต์ความเฉื่อย	$kg.m^2$
k_p	ค่าคงที่ของ Proportional control	-
k_d	ค่าคงที่ของ Derivative control	-
l_p	ระยะของก้าน	m
l_r	ระยะของลูกตุ้ม	m
M	โมเมนต์	$N.m$
m_p	มวลของแท่ง Pendulum	kg
m_r	มวลของมอเตอร์	kg
U	สัญญาณควบคุม (input)	-
Q	สัญญาณควบคุม (output)	-
a_t	ความเร่งเชิงเส้นในแนวแกน t	m/s^2
a_n	ความเร่งเชิงเส้นในแนวแกน n	m/s^2
$\ddot{\theta}$	ความเร่งเชิงมุมของลูกตุ้ม pendulum	rad/s^2
ω_n	ความถี่ธรรมชาติ	Hz
ξ	สัญญาณ Out put ที่ออกจากตัว Integrator	-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ลูกตุ้มล้อเฉื่อย (Inertia pendulum) เป็นระบบทางกลที่ประกอบด้วยลูกตุ้มฟิสิกส์ และมีล้อหมุนติดที่ปลาย ระบบนี้เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ประกอบการสอน ทฤษฎีระบบควบคุมและงานวิจัยทางด้านระบบควบคุมอัตโนมัติ ทั้งนี้เนื่องจากว่า พลศาสตร์ของลูกตุ้มล้อเฉื่อยนั้นมีรูปแบบที่ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับลูกตุ้มแบบอื่นๆ อาทิเช่น invert pendulum, double invert pendulum, couple pendulum เป็นต้น

ในโครงการนี้จะทำการออกแบบระบบควบคุมเพื่อให้ลูกตุ้มทรงตัวเองอยู่ได้ในแนวตั้งด้านบน โดยระบบควบคุมที่ทำการออกแบบนั้นจะประกอบด้วย 2 โหมดคือ โหมดแรกจะเป็นโหมดที่ทำให้ลูกตุ้มแกว่งขึ้นไปจากด้านล่างไปตั้งตรงด้านบน ส่วนโหมดที่สองจะเป็นโหมดที่ทำให้ลูกตุ้มทรงตัวเองอยู่ได้ในแนวตั้งด้านบน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้กับ Inertia wheel pendulum

1.2.2 เพื่อสร้างระบบทางกล IWP ได้

1.2.3 เพื่อออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับให้กับ IWP เพื่อให้ลูกตุ้มสามารถทรงตัว และตั้งตรงอยู่ในแนวตั้งได้

1.3 ขอบเขต

1.3.1 ไม่คิดแรงเสียดทานของระบบ

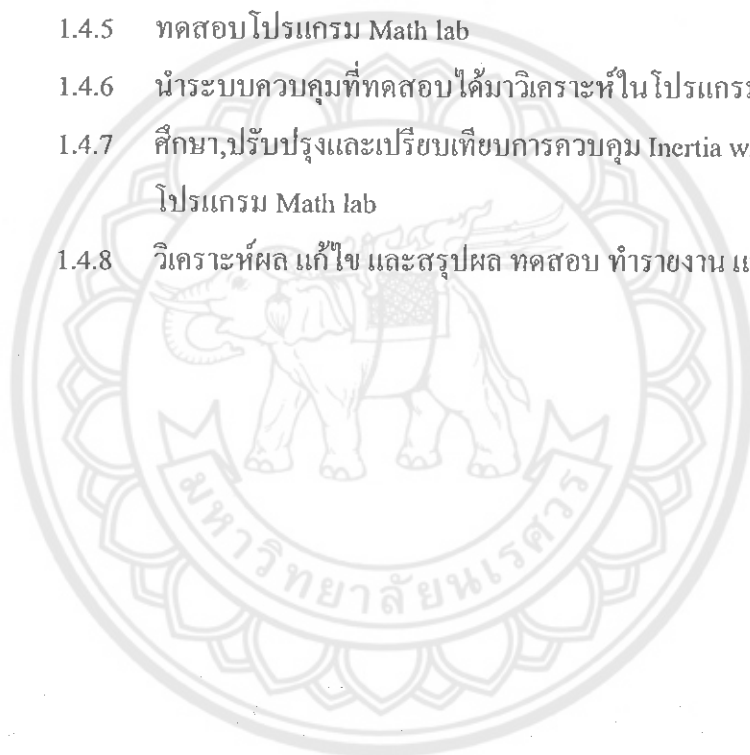
1.3.2 เหล็กมีความหนาแน่นคงที่

1.3.3 ในการออกแบบทางกลจะไม่นำคำนึงถึงทฤษฎีความเสียหาย

1.3.4 ระบบควบคุมที่ออกแบบมานั้นจะไม่นำมาทดสอบกับเครื่องจริงแต่จะนำมาสร้างแบบจำลองและทดสอบในโปรแกรม Math lab

1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลทั่วไปและเก็บข้อมูล สำหรับเลือกหัวข้อ โครงการงาน
- 1.4.2 เลือกหัวข้อโครงการงาน
- 1.4.3 สร้างระบบทางกลของ Inertia wheel pendulum และหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ
- 1.4.4 ออกแบบระบบควบคุมให้กับ Inertia wheel pendulum
- 1.4.5 ทดสอบโปรแกรม Math lab
- 1.4.6 นำระบบควบคุมที่ทดสอบได้มาวิเคราะห์ใน โปรแกรม Math lab
- 1.4.7 ศึกษา,ปรับปรุงและเปรียบเทียบการควบคุม Inertia wheel pendulum กับโปรแกรม Math lab
- 1.4.8 วิเคราะห์ผล แก้ไข และสรุปผล ทดสอบ ทำรายงาน และนำเสนอ



1.5 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน

ตาราง 1.1 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน

แผนการปฏิบัติงาน	2551							2552		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ค.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาข้อมูลทั่วไปและเก็บข้อมูล สำหรับเลือกหัวข้อโครงการ	↔									
2. เลือกหัวข้อโครงการ		↔								
3. สร้างระบบทางกลของ Inertia wheel pendulum และหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ		↔	↔							
4. ออกแบบระบบควบคุมให้กับ Inertia wheel pendulum				↔	↔					
5. ทดสอบ โปรแกรม Math lab					↔					
6. นำระบบควบคุมที่ทดสอบได้มาวิเคราะห์ในโปรแกรม Math lab					↔	↔				
7. ศึกษา, ปรับปรุงและเปรียบเทียบการควบคุม Inertia wheel pendulum กับโปรแกรม Math lab						↔	↔			
8. วิเคราะห์ผล แก้ไข และสรุปผล ทดสอบ ทำรายงานและนำเสนอ								↔	↔	↔

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ระบบทางกลของ Inertia wheel pendulum

1.6.2 ได้ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ทำให้การตอบสนองของระบบเป็นไปตามต้องการ

1.7 อุปกรณ์ที่ใช้

1.7.1 แผ่นเหล็ก และ เหล็กกล่อง

1.7.2 Bearing จำนวน 3 ตัว

1.7.3 ไฟเบอร์

1.7.4 DC มอเตอร์ 12V 20000 rpm

1.7.5 potenmitor 10 k Ω

1.7.6 พู่เด่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 205 mm

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 14 mm และหนา 10 mm

1.7.7 น็อตขนาด 14 mm จำนวน 2 ตัว และน็อตขนาด 4 mm จำนวน 4 ตัว

1.7.8 สายไฟยาว 1 m

1.7.9 แบตเตอรี่ 12 V

1.7.10 สีส้มและสีเทากันสนิม

1.7.11 กาวเชื่อมเหล็ก

1.8 งบประมาณ

ตาราง 1.2 งบประมาณ

รายการ	จำนวนเงิน(บาท)
ค่าวัสดุและอุปกรณ์	5,000
ค่าเอกสารประกอบการทำโครงการ	1,000
ค่าเช่าเล่มรายงาน	3,000
รวมงบประมาณทั้งสิ้นทั้งสิ้น	9,000

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

เนื้อหาในบทนี้จะประกอบด้วย

2.1 ระบบควบคุม

2.2 ระบบควบคุมป้อนกลับ

2.1 ระบบควบคุม

ระบบควบคุม คือ การจัดองค์ประกอบต่างๆภายในระบบ เพื่อให้การตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่ต้องการ โดยอาศัยพื้นฐานทางทฤษฎีระบบเชิงเส้นเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ บทประยุกต์ของระบบควบคุมนั้นมีหลากหลายและกว้างขวาง มีเครื่องมือและอุปกรณ์หลายอย่างที่ถูกรอบตัวเราที่เป็นระบบควบคุมอาทิเช่น เครื่อง CNC, ลิฟท์, ระบบแอร์ ที่มีแผงไว้ปรับอุณหภูมิ เป็นต้น

ระบบควบคุมนอกจากจะเป็นระบบที่สร้างขึ้นมาโดยมนุษย์แล้ว ยังมีระบบควบคุมที่มีอยู่เองตามธรรมชาติอีกด้วยอาทิ เช่น ในร่างของเรามีอวัยวะหลายส่วนที่เป็นระบบควบคุม หรือ การใช้มือหยิบของจากที่หนึ่งไปวางอีกที่หนึ่งซึ่งตาคอยเฝ้ามองการเคลื่อนไหวของมือ ไปตลอดเพื่อจะได้หยิบและวางของถูกที่

2.1.1 ประเภทของการควบคุม

ในระบบควบคุมสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

- 1.ระบบควบคุมแบบเปิด (open - loop control system)
- 2.ระบบควบคุมแบบปิด (closed – loop control system)

2.1.1.1ระบบควบคุมแบบเปิด (Open – loop control System)

ในระบบควบคุมแบบเปิด หรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ โดยระบบนี้เป็นระบบนี้เป็นระบบที่ค่า output ที่ได้ไม่มีผลต่อการควบคุมในขบวนการของระบบ นั่นคือ การนำค่า output ที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า input ที่ป้อนให้ระบบ ดังรูป 2.1

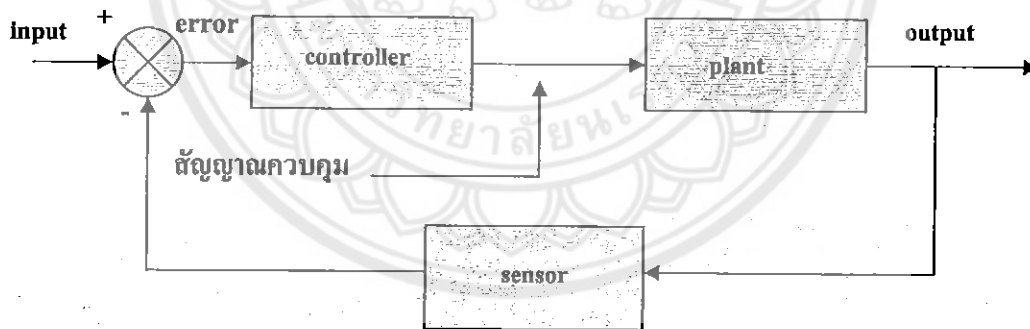


รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมแบบเปิด[4]

ระบบควบคุมแบบปิด (Closed-loop Control System)

ระบบควบคุมแบบปิด หรือระบบควบคุมแบบย้อนกลับ นั้นจะนำค่า Output ที่วัดได้ของระบบมาเปรียบเทียบกับค่า input แล้วนำ ความแตกต่างระหว่างค่า output ที่จัดการและ output ที่แท้จริง ส่งไปสู่อุปกรณ์ควบคุมแล้วส่งต่อไปเป็นค่า input เพื่อเข้าสู่ระบบเพื่อให้ความแตกต่างของ output ที่ต้องการและ output ที่แท้จริงลดลงเรื่อยๆ จนไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง

ดังนั้นพบว่า ค่า output ของระบบจะเป็นไปตามต้องการของระบบควบคุมแบบย้อนกลับ ดังแสดงดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบควบคุมแบบปิด[4]

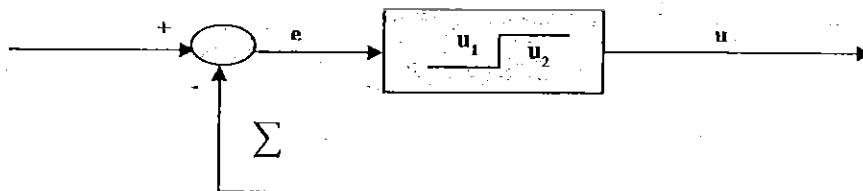
2.2 การควบคุมป้อนกลับ (Feedback control)

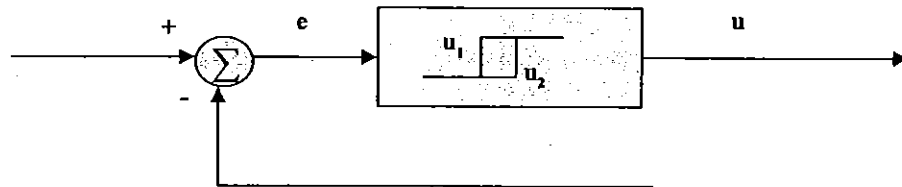
ระบบควบคุมที่ดีนั้นจะต้องมีผลตอบสนองเวลาต่อสัญญาณด้านเข้าแบบต่างๆ มีเสถียรภาพที่ดี ดังนั้นต้องมีตัวควบคุมที่ดีที่สามารถทำให้ระบบสามารถทำงานให้มีสมรรถนะตามต้องการ ซึ่ง กฎการควบคุม (control law) มี 7 แบบ ดังนี้

1. On – off control
2. Proportional control (P-control)
3. Integral control (I-control)
4. Proportional plus Integral control (PI-control)
5. Derivative control
6. Proportional plus Derivative control (PD-control)
7. Proportional plus Integral plus Derivative control (PID-control)

2.2.1 ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด (On – off control)

ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งคือ เปิด-ปิด นี้พบเห็นมากในอุปกรณ์ที่ใช้ภายในบ้าน เช่น การนำร้อน หรือการควบคุม ระดับน้ำในแทงค์น้ำ ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมสามารถแสดงได้ ดังรูป 2.3





รูปที่ 2.3 ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด[4]

โดยพบว่าสัญญาณควบคุม u จะมีอยู่สองค่าคือ u_1 และ u_2 ขึ้นอยู่กับค่าสัญญาณผิดพลาด (e) ระบบควบคุมแบบนี้บางครั้งอาจจะไม่จัดอยู่ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

2.2.2 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

ในระบบควบคุมแบบสัดส่วน พบว่า เอาท์พุทของคอนโทรลเลอร์เป็นสัดส่วนกับอินพุทของคอนโทรลเลอร์ และเมื่อกำหนดสัญญาณอินพุทที่ให้กับคอนโทรลเลอร์เป็น ค่าความผิดพลาด (e) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา จะได้

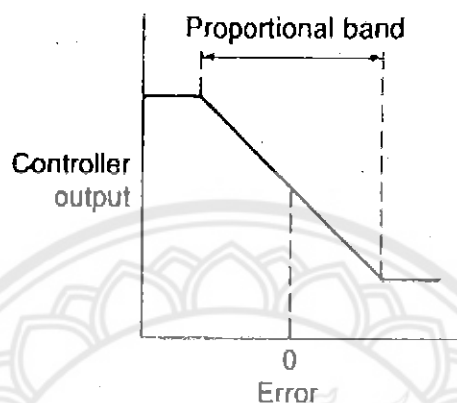
$$\text{output} = K_p e \quad 2.1$$

เมื่อ K_p เป็นค่าคงที่เรียก proportional gain พบว่าเอาท์พุทที่ออกจากคอนโทรลเลอร์แบบ Proportional control จะขึ้นกับขนาดของความผิดพลาดในขณะที่กำลังพิจารณา ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์ $G_c(s)$ จะมีค่าเป็น

$$G_c(s) = K_p \quad 2.2$$

ดังนั้นการควบคุมด้วยคอนโทรลเลอร์แบบนี้ก็เป็นเพียงการขยายสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น การที่ได้สัญญาณความผิดพลาดขนาดใหญ่ที่เวลาหนึ่ง ทำให้เกิดเอาท์พุทที่มีขนาดใหญ่จากคอนโทรลเลอร์ในเวลานั้น อย่างไรก็ตามการที่กำหนดให้ gain คงที่นั้นในทางปฏิบัติ อาจกำหนดไว้ในบางช่วงของสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น ซึ่งกำหนดให้คอนโทรลเลอร์ของค่าเอาท์พุทไม่น้อยกว่าค่าหนึ่งและไม่มากเกินไปกว่าค่าอีกค่าหนึ่งก็ได้ ซึ่งการกำหนดช่วงจำกัดของเอาท์พุทมีลักษณะ

ดังรูป 2.4 และการกำหนดเอาต์พุตแบบ proportional control ช่วงที่มีการกำหนดสัดส่วนนี้ เรียกว่า proportional band.

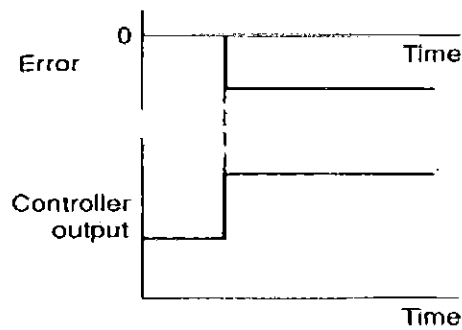


รูปที่ 2.4 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต[4]

การกำหนด proportional band นี้ ช่วยให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าจำกัดไม่ไปสู่ค่าอนันต์ ทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบ และเมื่อคอนโทรลเลอร์มีเอาต์พุตสูงที่สุดที่เป็นไปได้ค่าหนึ่งแล้ว นิยมที่จะกำหนดเอาต์พุตค่าใด ๆ เป็นร้อยละของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์ 100% ก็หมายถึงว่าเอาต์พุตเปลี่ยนจากค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ ไปเป็นค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ซึ่งพบว่า

$$K_p = \frac{100}{\text{proportional band}} \quad 2.3$$

เนื่องจากเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์เป็นสัดส่วนกับอินพุตดังนั้น ถ้าหากอินพุตมีลักษณะเป็น step เอาต์พุตที่ได้ มีลักษณะเป็น step เช่นกัน โดยลักษณะของกราฟแสดงอินพุตและเอาต์พุตจะมีสัดส่วนที่แน่นอนค่าหนึ่ง ตามรูป 2.5 โดยรูปนี้แสดงถึงการตอบสนองของคอนโทรลเลอร์ เมื่ออินพุตอยู่ในช่วง proportional band

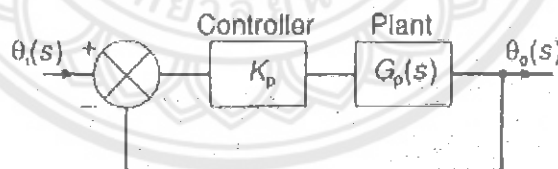


รูปที่ 2.5 การตอบสนองของคอนโทรลเลอร์แบบ proportional control[4]

ในทางปฏิบัติ proportional control นี้ มีลักษณะเหมือนกับเครื่องขยายสัญญาณรูปแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นในลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือเป็นเครื่องขยายสัญญาณเชิงกล เช่น คาน ลักษณะของระบบที่ควบคุมแบบ proportional control มีลักษณะดังที่แสดงในรูป 2.6 และทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเกิดเป็น

$$G_o(s) = K_p G_p(s) \quad 2.4$$

เมื่อ $G_p(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ



รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมแบบ proportional control[4]

ข้อเสียประการสำคัญของระบบควบคุมที่คอนโทรลเลอร์คือ ไม่ได้มีการเพิ่มเทอม $\frac{1}{s}$ (หรือการเพิ่มปริพันธ์) ในส่วน forward path ซึ่งหมายความว่า ถ้าระบบเป็นระบบ type 0 คอนโทรลเลอร์จะไม่ได้เปลี่ยนแปลง type ของระบบ ทำให้ระบบเป็น type 0 เหมือนเดิม และทำให้เกิดความผิดพลาดที่สภาพคงตัว เนื่องจากคอนโทรลเลอร์ไม่ได้ทำการเพิ่มโพลหรือศูนย์ใหม่ให้กับระบบ เพียงแต่เปลี่ยนตำแหน่งของโพล หรือศูนย์เท่านั้น เนื่องจากระบบควบคุมแบบป้อนกลับหนึ่งหน่วยตามภาพ C จะมี ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเป็น

$$G(s) = \frac{K_p G_p(s)}{1 + k_p G_p(s)} \quad 2.5$$

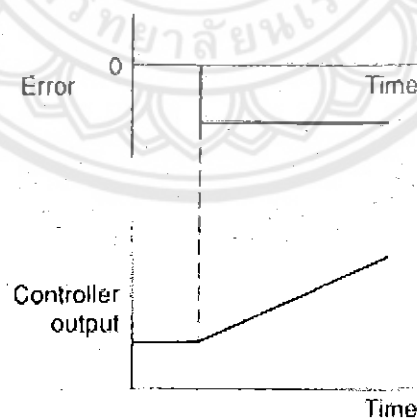
และสมการคุณลักษณะจะเป็น $(1 + K_p G_p(s))$ และมีรากเปลี่ยนไปตามค่าของ K_p

2.2.3 ระบบควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control)

ในระบบควบคุมแบบปริพันธ์เอาต์พุทของคอนโทรลเลอร์จะเป็นสัดส่วนกับปริพันธ์ของสัญญาณผิดพลาดเทียบกับเวลา หรือ

$$\text{Output} = K_i \int e dt \quad 2.6$$

เมื่อ K_i เป็นค่าคงที่เรียกว่า integral gain ซึ่งจะมีหน่วยเป็น $\frac{1}{\text{sec}}$ ดังรูป 2.7 แสดงลักษณะการตอบสนองของ integral control เมื่อได้รับสัญญาณความผิดพลาดแบบ step ค่าปริพันธ์ระหว่างเวลา t และ 0 หมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณความผิดพลาดจากเวลา 0 ถึง t ดังนั้นเนื่องจากเริ่มการมีสัญญาณความผิดพลาดแบบ step เอาต์พุทที่ออกจากคอนโทรลเลอร์จะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยอัตราที่คงที่ ทำให้เอาต์พุทที่เวลาใดๆ เป็นสัดส่วนกับความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

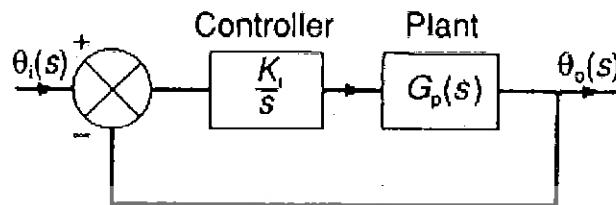


รูปที่ 2.7 ลักษณะการตอบสนองของคอนโทรลเลอร์แบบ integral control [4]

เปลี่ยนรูปลาปลาซของสมการ 2.6 ทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์เป็น

$$G_c(s) = \frac{\text{output}(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s} \quad 2.7$$

ดังนั้นสำหรับระบบที่แสดงในรูป 2.8 การควบคุมแบบ integral control ให้ forward-path transfer function เป็น $\frac{K_i}{s}G_p(s)$ และทำให้มี ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดดังรูป



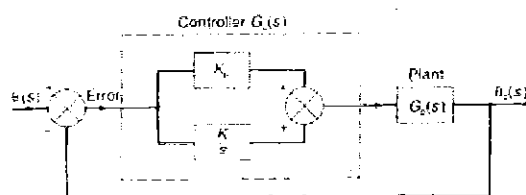
รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมแบบ integral control[4]

เมื่อพิจารณาถึงข้อได้เปรียบของการควบคุมแบบ integral control ได้จากสมการ 2.8 พบว่า ระบบควบคุมแบบ integral control จะเพิ่มจำนวนโพลให้กับระบบควบคุมและเพิ่ม type ของระบบ จาก type 0 เป็น type 1 ซึ่งทำให้ระบบมีความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวเป็นศูนย์เทียบต่อ step input อย่างไรก็ตามการเพิ่มโพลที่ $s = 0$ และไม่มีการเพิ่มศูนย์ให้กับระบบควบคุม ทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล (n) และจำนวนศูนย์ (m) เพิ่มขึ้นอีก 1 ซึ่งจะมีผลให้ asymptote angles ของทางเดินรากลดลง และจุดตัดเคลื่อนไปทางครึ่งขวาของ s -plane มากขึ้น มีผลทำให้ ความเสถียรสัมพัทธ์ของระบบลดลง

$$\text{Asymptote angle} = \pm \frac{\pi}{n-m}, \frac{3\pi}{n-m}, \dots \quad 2.8$$

2.2.4 การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับปริพันธ์ (Proportional plus integral Control)

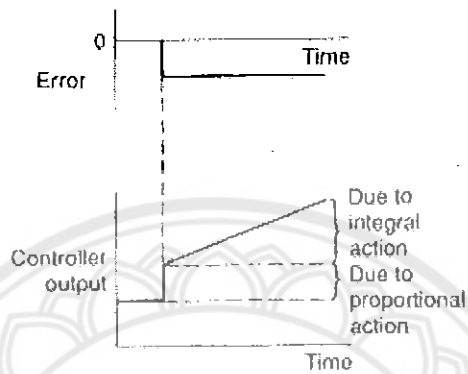
การที่ระบบควบคุมมีความเสถียรสัมพัทธ์ลดลง เมื่อใช้การควบคุมแบบปริพันธ์สามารถแก้ไขได้ในระดับหนึ่ง โดยการใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์ (Proportional plus Integral, PI) ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมเป็นตามภาพ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย Proportional plus Integral[4]

สำหรับระบบดังกล่าวมีเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์เป็น

$$\text{output} = K_p e + K_i \int e dt \quad 2.9$$



รูปที่ 2.10 การตอบสนองของ PI controller[4]

รูป 2.10 แสดงเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับเมื่อมีอินพุตเป็นสัญญาณความผิดพลาดแบบ step ถ้าเปลี่ยนรูปถ่ายของสมการ 2.9 ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์แบบ PI เป็น

$$\begin{aligned} G_0(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} \\ &= \frac{sK_p + K_i}{s} \\ &= K_p \frac{(s + K_i/K_p)}{s} \end{aligned}$$

โดยให้ Integral time constant τ_i เป็น $\tau = \frac{K_p}{K_i}$

ดังนั้นจะได้

$$G_c(s) = \frac{K_p \left[s + \left(\frac{1}{\tau_i} \right) \right]}{s} \quad 2.10$$

และได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น

$$G_o(s) = G_c(s)G_p(s) = \frac{k_p \left[s + \left(\frac{1}{\tau_i} \right) G_p(s) \right]}{s} \quad 2.11$$

พบว่ามีส่วนศูนย์ที่ $s = -\frac{1}{\tau_i}$ และโพลที่ $s=0$ เพิ่มให้กับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อใช้การควบคุมแบบ PI การที่เพิ่มตัวประกอบ s เข้ากับเทอมส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนก็เสมือนกับเพิ่มแบบของระบบขึ้นไป 1 จึงทำให้ระบบนี้ไม่มีความผิดพลาดที่สภาพคงตัวสำหรับอินพุตแบบขั้นบันได นอกจากนั้นการที่เพิ่มศูนย์ให้กับระบบไปพร้อม ๆ กัน ทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล n และจำนวนศูนย์ m มีค่าคงที่ ดังนั้นมุมของ asymptote สำหรับทางเดินของรากมีค่าคงที่ อย่างไม่ขึ้นกับตามจุดตัดของเส้น asymptotes บนแกนจริง เกิดขึ้นที่เข้าหาจุดกำเนิดมากขึ้น ยังผลให้ความเสถียรของระบบลดลง

จากการพิจารณาพบว่า

$$\text{Intersection / point} = (\text{ผลรวมของโพล} - \text{ผลรวมของศูนย์}) / (n - m)$$

การเพิ่มโพลที่ $s=0$ และศูนย์ที่ $s = -\frac{1}{\tau_i}$ ทำให้จุดต้องเปลี่ยนไปเท่ากับ $\pm \frac{\left(\frac{1}{\tau_i} \right)}{(n - m)}$ ซึ่ง

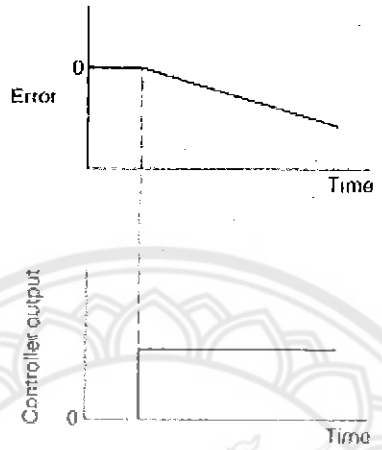
ทำให้มีค่าเป็นบวกมากขึ้น และจุดตัดเคลื่อนที่ห่างจากขวามือเข้าใกล้จุดกำเนิดมากขึ้น อย่างไม่ขึ้นกับการลดลงของความเสถียรสัมพัทธ์นี้ น้อยกว่าการใช้การควบคุมแบบปริพันธ์เพียงอย่างเดียวค่าของ K_p และ K_i เป็นค่าที่ใช้กำหนดตำแหน่งของศูนย์ และโพลของระบบ โดยตำแหน่งของศูนย์กำหนดด้วยค่า K_p ในขณะที่ K_i เป็นค่าที่ใช้กำหนดโพลระบบปิด

2.2.5 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

การควบคุมอีกแบบหนึ่งก็คือการควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Controller) การควบคุมแบบนี้ เอาท์พุทจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาดเทียบกับเวลา นั่นคือ

$$\text{output} = k_d \frac{de}{dt} \quad 2.12$$

เมื่อ K_d คือ Derivative gain และมีหน่วยเป็นวินาที



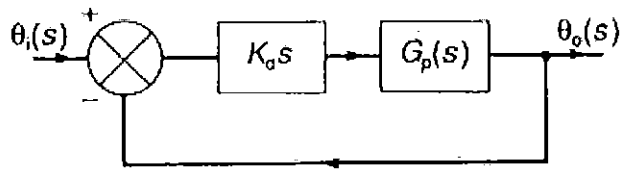
รูปที่ 2.11 การตอบสนองของ Derivative Control[4]

รูป 2.11 แสดงสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณความผิดพลาดเป็นสัญญาณแบบ ramp เมื่อเริ่มได้รับสัญญาณความผิดพลาดและไม่ใช่ค่าของความผิดพลาดซึ่งทำให้ได้สัญญาณส่งออกจากคอนโทรลเลอร์มีค่ามากกว่าก่อนที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นมากจริง ๆ อย่างไรก็ตามหากความผิดพลาดมีค่าคงที่จะไม่มีการสะสมค่าความผิดพลาดแม้ว่าค่าความผิดพลาดจะมีมากก็ตาม ทำให้การควบคุมแบบอนุพันธ์นี้ไม่อ่อนไหวต่อค่าความผิดพลาดที่คงที่หรือเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ซึ่งผลที่ตามมาการควบคุมแบบนี้จะไม่ใช้เพียงตัวเดียว แต่มักจะใช้ควบคู่กับการควบคุมแบบอื่นเปลี่ยนรูปลาปลาสมการ 2.12 เพื่อที่หาฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์ พบว่า

$$G_c(s) = K_d s \tag{2.13}$$

ดังนั้นสำหรับระบบควบคุม ดังที่แสดงในรูป 2.12 มีการควบคุมแบบอนุพันธ์ทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G_o(s) = \frac{K_d s G_p(s)}{1 + K_d s G_p(s)} \tag{2.14}$$



รูปที่ 2.12 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย Derivative Control[4]

ถ้าหากระบบเป็นแบบ type 1 หรือสูงกว่า การควบคุมแบบอนุพันธ์จะลด S ในเทอมส่วนลง และลด type ของระบบลง 1 อย่างไม่ก็ตามได้กล่าวก่อนหน้านี้แล้วว่า การควบคุมแบบอนุพันธ์นี้มักไม่ใช่เพียงลำพังแต่ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น เพราะเมื่อใช้การควบคุมแบบอนุพันธ์จะทำให้เพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติการนำกฎการควบคุมแบบอนุพันธ์ไปใช้นั้นค่อนข้างลำบาก ดังนั้นในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะเป็นการประมาณการควบคุมแบบอนุพันธ์ โดยใช้ lead compensator

2.2.6 การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ (Proportional plus Derivative Control)

ถ้าการควบคุมแบบอนุพันธ์ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบสัดส่วน (PD) ดังที่แสดงในภาพ

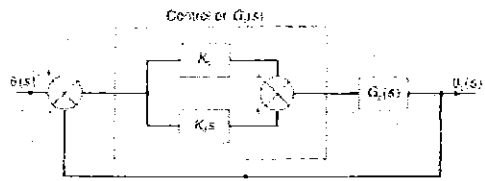
2.13 ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น

$$G_o(s) = (K_p + K_d s) G_p(s)$$

$$G_o(s) = K_d [(1/\tau_d) + s] G_p(s) \tag{2.15}$$

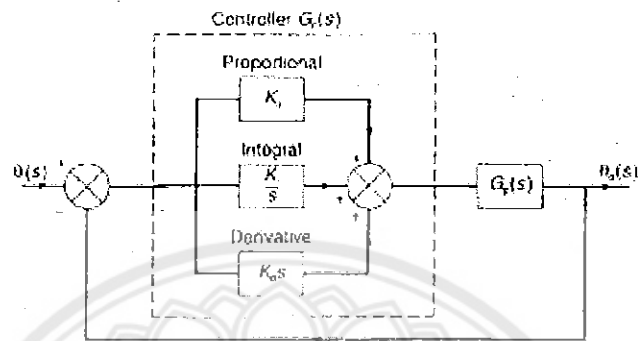
เมื่อ $\tau_d = \frac{K_p}{K_d}$ คือ Derivative time constant ซึ่งในการควบคุมแบบนี้ศูนย์เพิ่มขึ้น

ที่ $s = -\frac{1}{\tau_d}$ พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของระบบ ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว



รูปที่ 2.13 แผนภาพบล็อกที่ประกอบด้วย PD Control[4]

2.2.7 Proportional plus Integral control (PID control)



รูปที่ 2.14 Block diagram ที่ประกอบด้วย PID control [4]

การควบคุม โดยใช้แบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์และร่วมกับแบบอนุพันธ์ (PID control) หรือ ที่เรียก การควบคุมแบบ 3 เทอม (Tree-term control) ระบบมีลักษณะตามรูป 2.14 ทำให้เอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์เมื่อรับอินพุตเป็นความผิดพลาด ดังนี้

$$\text{output} = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{d_e}{d_t} \quad 2.16$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนโทรลเลอร์ จะเป็น

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + k_d s \quad 2.17$$

ซึ่งสามารถจัดรูปได้เป็น

$$G_c(s) = K_p \left[1 + \frac{K_i}{K_p s} + \frac{K_d s}{K_p} \right] \quad \text{or}$$

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดของระบบที่แสดงในรูป 2.11 จะเป็น

$$G_o(s) = G_c(s)G_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) G_p(s)$$

$$G_o(s) = \frac{K_p (\tau_i s + 1 + \tau_i \tau_d s^2) G_p(s)}{\tau_i s}$$

2.19

ดังนั้นการควบคุมแบบ PID controller จะเพิ่มจำนวนศูนย์ให้กับระบบเท่ากับ 2 โดยเพิ่มจำนวนโพล 1 โพล และทำให้ชนิด type ระบบเพิ่มขึ้น

ตาราง 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแต่ละประเภท

การควบคุมแบบ P	การควบคุมแบบ I	การควบคุมแบบ D
-ทำให้ระบบมีการตอบสนองต่อตัวแปรเข้าสู่ระบบได้เร็วขึ้น -ทำให้ระบบการควบคุมมีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมภายหลังการเปลี่ยนแปลงภาระการควบคุม	-การตอบสนองจากตัวแปรเข้าภายนอกช้าลง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเดิมและผลการตอบสนองมีการกวัดแกว่งเพิ่มขึ้น -ทำให้ระบบการควบคุมรวมไม่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุม -เมื่อเกิดการตอบสนองสูงสุดทำให้ความคลาดเคลื่อนในกระบวนการช่วงแรกมากกว่ากระบวนการเดิม	-การควบคุมส่งสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพการก่อนคลาดเคลื่อนจริง โดยเกิดขึ้นกับกระบวนการทำให้ระบบควบคุมมีผลดีกว่าระบบควบคุมแบบอื่น -การควบคุมช่วยเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการให้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 3

การวิเคราะห์ระบบทางคณิตศาสตร์ให้กับ Inertia wheel pendulum

3.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้กับ Inertia wheel pendulum [3]

ลูกตุ้มล้อเลื่อนสามารถแยกออกมาเป็น Freebody diagram และ Kinetics diagram จะได้ดังรูปที่ 3.1 โดยรายละเอียดและคุณสมบัติมีดังนี้

m_r = น้ำหนักของลูกตุ้มล้อเลื่อน

m_p = น้ำหนักของก้านที่ติดกับลูกตุ้มล้อเลื่อน

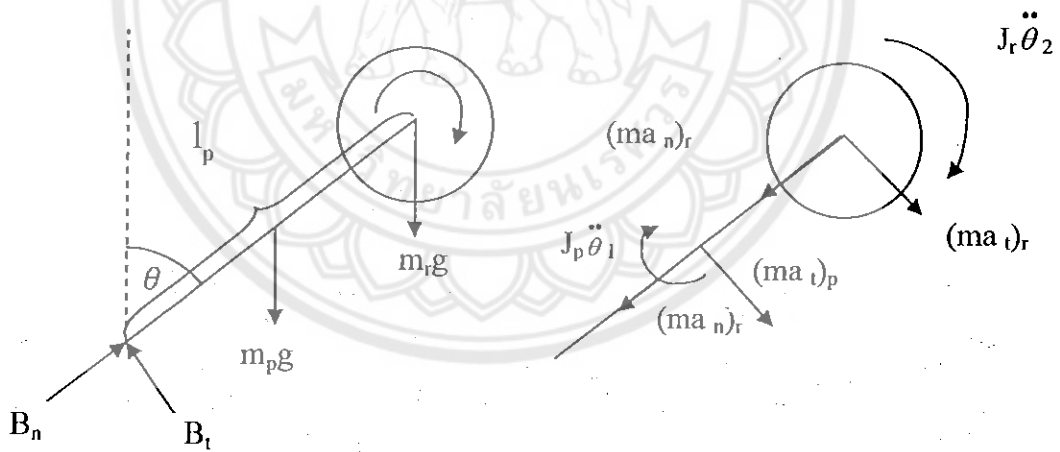
J_p = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของก้านที่ติดกับลูกตุ้มล้อเลื่อน มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{3}m_p l_p^2$

J_r = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของลูกตุ้มล้อเลื่อน มีค่าเท่ากับ $\frac{2}{3}m_r l_r^2$

l_p = ระยะจากต้นก้านถึงกึ่งกลางของก้าน

l_r = ระยะรัศมีของลูกตุ้ม

l = ความยาวของก้าน



FBD

Kinetic Diagram

รูปที่ 3.1 แสดง Freebody diagram และ Kinetic diagram ของ ลูกตุ้มล้อเลื่อน

จาก Freebody diagram สามารถวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปแบบสมการของนิวตัน จะได้ว่า

$$\Sigma M_B = \Sigma J\alpha + \Sigma ma_d$$

เมื่อแทนค่าจะได้

$$m_p \sin \theta_1 + m_r \sin \theta_1 = j_p \ddot{\theta}_1 + Jr \ddot{\theta}_2 + (mg_r)_p l_p + (ma_r)_r l \dots \dots \dots (3.1)$$

จาก

$$(a_r)_p = \ddot{\theta}_1 l_p ; (a_r)_r = \ddot{\theta}_1 l_r$$

แทนค่าในสมการ (3.1)

$$m_p g \sin \theta_1 + m_r g \sin \theta_1 = j_p \ddot{\theta}_1 + j_r jr \ddot{\theta}_2 + m_p \ddot{\theta}_1 l_p^2 + m_r \ddot{\theta}_1 l_r^2$$

$$(J_p + m_p l_p^2) \ddot{\theta}_1 - (m_p + m_r) g \sin \theta_1 = -J_r \ddot{\theta}_2$$

ต่อมาทำการคิด โมเมนต์ที่จุดหมุนของดัด จะได้จาก

$$\Sigma M_O = J_r \ddot{\theta}_2 ; \tau = J_r \ddot{\theta}_2 \dots \dots \dots (3.2)$$

$$(J_p + m_p l_p^2 + m_r l_r^2) \ddot{\theta} - (m_p + m_r) g \sin \theta_1 = -\tau \dots \dots \dots (3.3)$$

เมื่อทำการวัดขนาดและคุณสมบัติมวลของลูกตุ้มดัดเจ็อยของจริงจะได้ค่าพารามิเตอร์ออกมาได้ดังนี้

$$m_p = 0.14 \text{ kg} , m_r = 0.7 \text{ kg} , l_p = 0.23 \text{ m} , l_r = 0.27 \text{ m}$$

เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.3) จะได้

$$0.07 \ddot{\theta}_1 + 8.24 \sin \theta_1 = -ku \dots \dots \dots (3.4)$$

จากสมการที่ 3.4 เมื่อนำมาทำ lineariazation โดยการประมาณค่า $\sin \theta \approx \theta$ จะได้

$$0.07 \ddot{\theta}_1 + 8.24 \theta_1 = -ku \dots \dots \dots (3.5)$$

จากสมการที่ 3.5 จะได้ Transfer function ออกมาเป็น

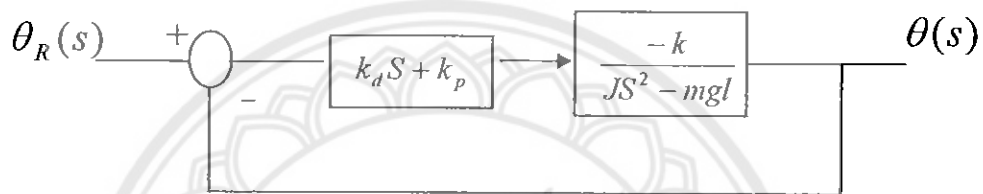
$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{-k}{S(0.075S^2 + 8.24)} \dots \dots \dots (3.6)$$

3.2 การออกแบบระบบควบคุมให้กับ Inertia pendulum[1]

ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของ Inertiapendulum นี้เราสามารถออกแบบให้มี 2 โหมด ดังนี้

3.2.1 การออกแบบระบบควบคุมโหมดการควบคุมที่ 1

ในโหมดนี้จะทำการออกแบบเพื่อควบคุมให้ Inertiapendulum รักษาตัวเองให้ตั้งตรงในแนวตั้งด้านบน โดยจะเลือกใช้ชนิดการควบคุมแบบ PD-control ซึ่งมีแผนภาพการควบคุมตามที่แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบ โหมดการควบคุมที่ 1

$$\begin{aligned} \frac{\theta(s)}{\theta_R(s)} &= \frac{[k_d s + k_p] \left[\frac{-k}{J s^2 - mgl} \right]}{1 + [k_d s + k_p] \left[\frac{-k}{J s^2 - mgl} \right]} \\ &= \frac{[k_d s + k_p] [-k]}{J s^2 - mgl - [k_d s + k_p] [-k]} \\ &= \frac{[k_d s + k_p] [-k]}{J s^2 - mgl + [k_d s + k_p] [-k]} \\ &= \frac{[k_d s + k_p] [-k]}{\left[\frac{1}{3} m_p l^2 + \frac{2}{3} m_r l^2 \right] s^2 - [m_p g l_p] + [k_d s + k_p] [-k]} \\ &= \frac{-0.03 k_d s - 0.03 k_p}{0.036 s^2 - 0.03 k_d s - 0.03 k_p - 2.156} \dots\dots\dots(3.7) \end{aligned}$$

จาก Transfer function เมื่อนำมาวิเคราะห์ Routh's array จะได้ผลออกมาดังนี้

S^2	0.036	$-0.03 k_p - 2.156$
S^1	$-0.03 k_d$	0
S^0	$-0.03 k_p - 2.156$	0

จาก Routh's array ที่ได้จะได้เงื่อนไขที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ดังนี้

$$-0.03k_p - 2.156 > 0$$

$$k_p < -71.867$$

และ $-0.03k_d > 0$

$$k_d < 0$$

จากทฤษฎี Final value จะได้ค่า Steady State error ดังนี้

$$e_{ss} = 1 - \frac{0.03k_p}{0.03k_p - 2.156} = 0$$

$$e_{ss} = \frac{-2.156}{0.3k_p - 2.156} = 0 \dots\dots\dots (3.8)$$

จาก Routh's array และค่า Steady State error เราจะตัดสินใจเลือกค่า $k_p = -200$ ซึ่งเมื่อนำไปแทนลงในสมการที่ (3.7) จะได้ผลออกมาเป็น

$$\frac{\theta(s)}{\theta_R(s)} = \frac{-0.03k_d S + 6}{0.036S^2 - 0.03k_d S + 3.844} \dots\dots\dots (3.9)$$

จากสมการที่ (3.9) จะได้สมการ Characteristic Equation ออกมาเป็น

$$0.036S^2 - 0.03k_d S + 3.844 \dots\dots\dots (3.10)$$

จากสมการ Characteristic Equation โดยทั่วไปของระบบอันดับที่ 2

$$S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2 = 0 \dots\dots\dots (3.11)$$

เพื่อให้การตอบสนองของระบบเป็นแบบ Underdamped ดังนั้นจึงเลือกกำหนดให้ $\xi = 0.6$

$\omega_n = 3.0778$ แทนค่าใน สมการ 3.11 จะได้ว่า

$$S^2 + 4.25S + 9.474 = 0$$

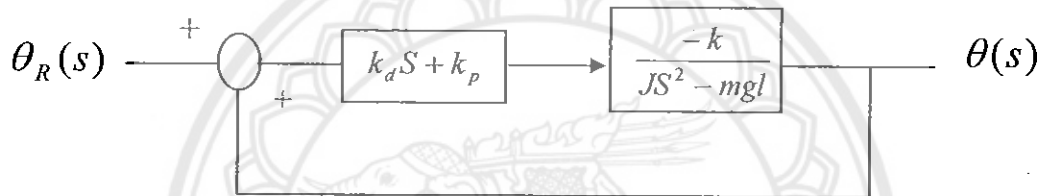
$$-0.83K_d = 4.25$$

$$K_d = -5.12$$

$$\frac{\theta(s)}{\theta_R(s)} = \frac{0.154S + 6}{0.036S^2 + 0.154S + 3.844} \dots\dots\dots (3.12)$$

3.2.2 การออกแบบระบบควบคุมโหมดการควบคุมที่ 2

ในการออกแบบการควบคุมในโหมดที่ 2 นี้จะเป็นโหมดที่ทำให้ Inertia Pendulum แกว่งขึ้นไปตั้งตรงในแนวตั้งด้านบน ดังนั้นในโหมดนี้จึงต้องออกแบบให้การตอบสนองของระบบเป็นแบบกวัดแกว่งแบบไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งการที่จะทำให้ระบบมีการตอบสนองในลักษณะนี้ได้นั้นจะต้องออกแบบให้ Pole ของระบบเป็นแบบ Eumplex enjugate pair และอยู่ทางด้านขวามือของแกนจินต-ภาพ แผนภาพระบบควบคุมในโหมดที่ 2 จะเหมือนกับโหมดแรกตามที่แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการออกแบบระบบควบคุมในโหมดที่ 2

จากรูปที่ 3.3 จะได้ Transfer function ออกมาได้ดังนี้

$$\frac{\theta(s)}{\theta_R(s)} = \frac{-0.03k_d s - 0.03k_p}{0.03s^2 - 0.03k_d s - 0.03k_p - 0.576}$$

จากTransfer function จะได้สมการ Characterristic ออกมาเป็น

$$s^2 - 0.83k_d s - 0.83k_p - 59.89 = 0 \dots\dots\dots (3.13)$$

และจะได้ค่า Pole ออกมาเป็น

$$s = \frac{0.83k_d \pm \sqrt{(-0.83k_d)^2 + 4(0.83k_p + 59.89)}}{2} \dots\dots\dots (3.14)$$

จากค่า Pole ที่ได้จะพบว่าถ้าต้องการให้ Pole อยู่ทางขวามือและเป็นแบบ Complex Conjuget pare โดยจะต้องเลือกใช้ค่า k_d ที่เป็นบวกและค่าในเครื่องหมาย Square root ต้องติดลบ ดังนั้นจะเลือกที่ค่า $k_d = 2$ และจะได้

$$(0.83 \times 2)^2 + 4(0.83k_p + 59.89) < 0$$

$$4(0.83k_p + 59.83) < -2.7556$$

$$k_p < -72.987$$

จาก Routh's array และค่า Steady state error เราจะตัดสินใจเลือกค่า $k_p = -80$

$$\frac{\theta(s)}{\theta_r(s)} = \frac{-S + 40}{0.6S^2 - S + 30.4} \dots\dots\dots(3.15)$$

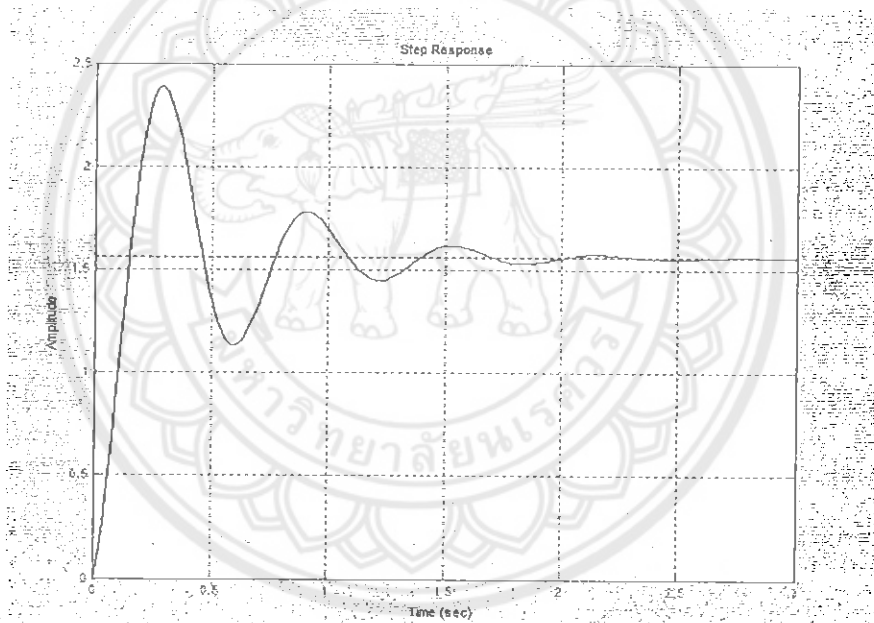


บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์

ในบทนี้เป็นการนำระบบควบคุมของลูกตุ้มล้อเดี่ยวที่ออกแบบได้ในบทที่ 3 มาทำการทดสอบสมรรถนะในโปรแกรม MATLAB โดยการทดสอบนี้จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

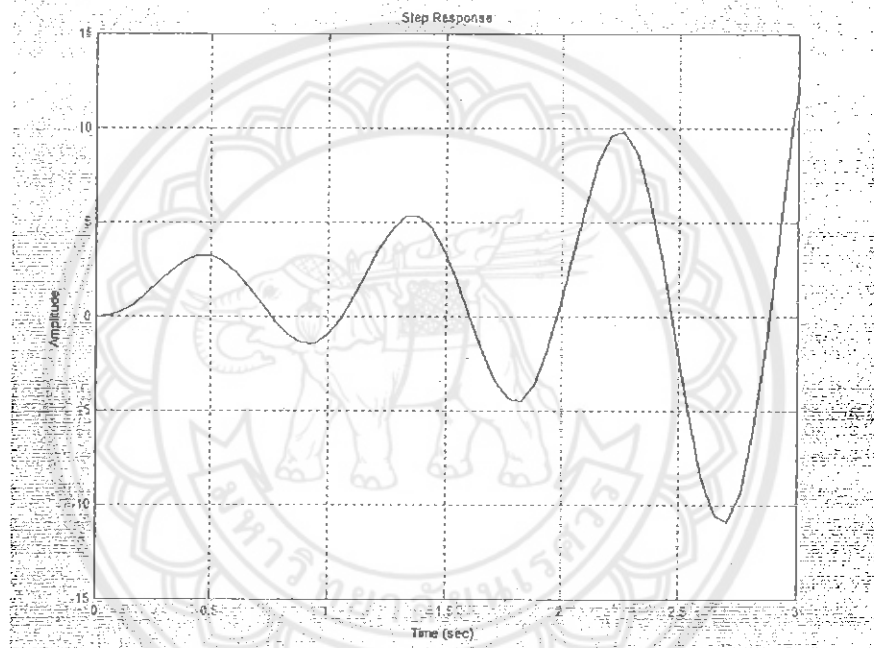
4.1 โหมดที่ 1 ทำการออกแบบเพื่อควบคุมให้ Inertia pendulum รักษาตัวเองให้ตั้งตรงในแนวตั้งด้านบน โดยในที่นี้จะเลือกชนิดการควบคุมแบบ PD-Control ซึ่งได้กราฟของสมการ ดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงการออกแบบโหมดควบคุมที่ 1

จากรูปกราฟที่ 4.1 พบว่าลักษณะการตอบสนองของระบบนั้นมีการกวัดแกว่งก่อนและพยายามลู่เข้าใกล้ 1 ตามสัญญาณอินพุตที่ตั้งไว้ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่เราออกแบบนั้นจะพยายามรักษาเสถียรภาพของ IWP ในแนวตั้งด้านบนและเมื่อวิเคราะห์จากกราฟจะได้ว่า ค่า Setting time = 0.6 และ เปอร์เซนต์ Overshoot = 0.7

4.2 โหมดที่ 2 เป็นโหมดที่ทำให้ Inertia Pendulum กวัดแกว่งขึ้นไปตั้งตรงในแนวตั้งด้านบนจะได้ค่ากราฟของสมการ ดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงการออกแบบ โหมดการควบคุมที่ 2

จากรูปกราฟที่ 4.2 เมื่อดูจากกราฟในโหมดที่ 2 พบว่าลักษณะการตอบสนองของระบบมีการกวัดแกว่งและแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมในโหมดที่ 2 นี้จะพยายามทำให้ IWP แกว่งตัวขึ้นไปในแนวตั้งด้านบน และจากกราฟเราสามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าความถี่เชิงมุม $\omega = 6.98 \text{ rad/s}$ และ คาบการกวัดแกว่ง $T = 0.9 \text{ s}$

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปและการวิเคราะห์ผล

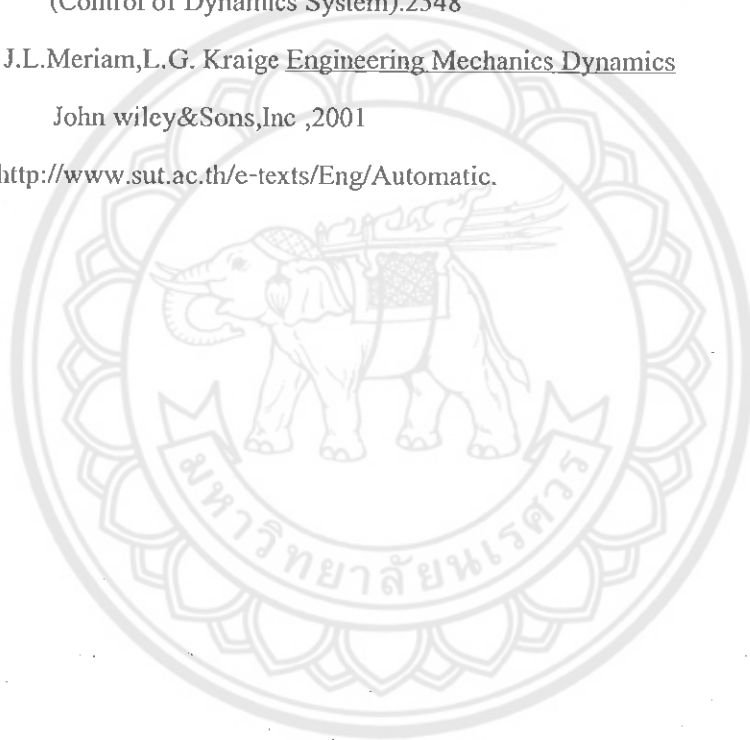
โครงการนี้มีจุดมุ่งหมาย 2 อย่าง คือศึกษาหาแบบจำลองของลูกตุ้มล้อเฉื่อยและออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ให้กับลูกตุ้มล้อเฉื่อย โดยระบบควบคุมของลูกตุ้มล้อเฉื่อยนั้นจะมี 2 โหมด โดย โหมดแรกจะควบคุมให้ลูกตุ้มแกว่งขึ้นไปตั้งตรงในแนวตั้งด้านบน ส่วน โหมดที่สองจะเป็นโหมดที่รักษาเสถียรภาพของลูกตุ้มล้อเฉื่อยให้ตั้งตรงอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งใน โหมดที่สองนี้เราจะเลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PD-Control จากผลการทดสอบในโปรแกรม MATLAB พบว่าระบบควบคุมที่ออกแบบมานั้นสามารถทำงานให้ตรงตามเป้าหมายที่วางไว้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการออกแบบระบบควบคุมไม่ได้คำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้น และแรงเสียดทานของระบบ เมื่อนำระบบควบคุมนี้ไปใช้งานจริงอาจไม่ได้ผลตรงตามที่ตั้งไว้ ดังนั้นเพื่อพัฒนาให้ระบบควบคุมทำงานดียิ่งขึ้นในการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงผลดังกล่าว

บรรณานุกรม

- [1] อ.สุรัตน์ ปัญญาแก้ว.เอกสารประกอบการเรียนวิชาระบบควบคุมอัตโนมัติ
(Automatics of Control). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- [2] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ.การควบคุมระบบพลศาสตร์
(Control of Dynamics System).2548
- [3] J.L.Meriam,L.G. Kraige Engineering Mechanics Dynamics
John wiley&Sons,Inc ,2001
- [4] <http://www.sut.ac.th/e-texts/Eng/Automatic>.





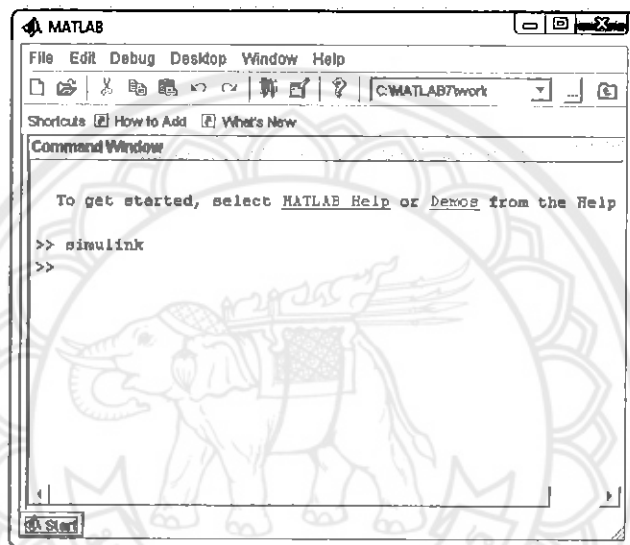


1. วิธีการประมวลผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB

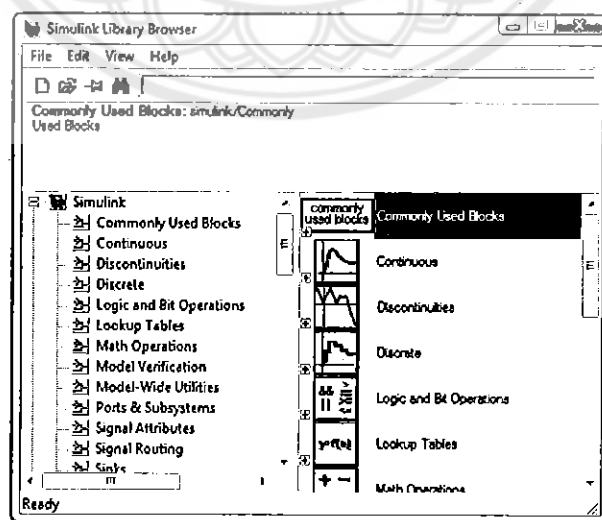
1.1 วิธีการใช้โปรแกรม

1.1.1 การใช้ Simulink

1.1.1.1 เปิดโปรแกรม MATLAB ขึ้นมาใช้งานให้พิมพ์คำว่า Simulink 3 บนหน้าต่างคำสั่ง ก็จะปรากฏ หน้าต่าง Library Simulink ดังรูป

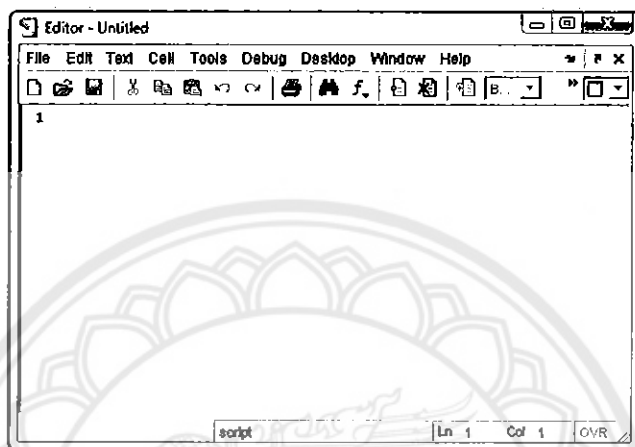


รูปที่ ก.1.1 โปรแกรม Math lab



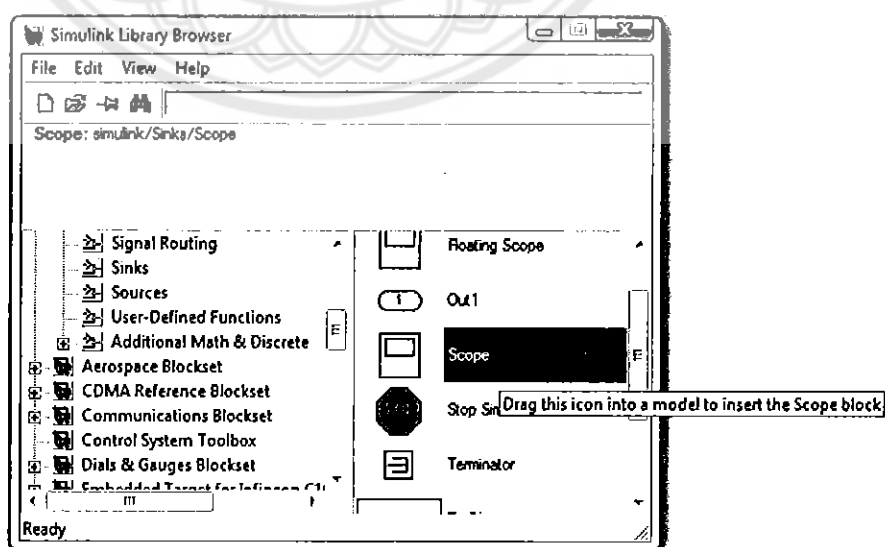
รูปที่ ก.1.2 การเปิดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโปรแกรม

1.1.1.2 จากนั้นให้คลิกที่คำว่า File ที่หน้าต่าง Library Simulink แล้วคลิกเลือก New Model จะได้ Workspace ชื่อ Untitled ดังรูป



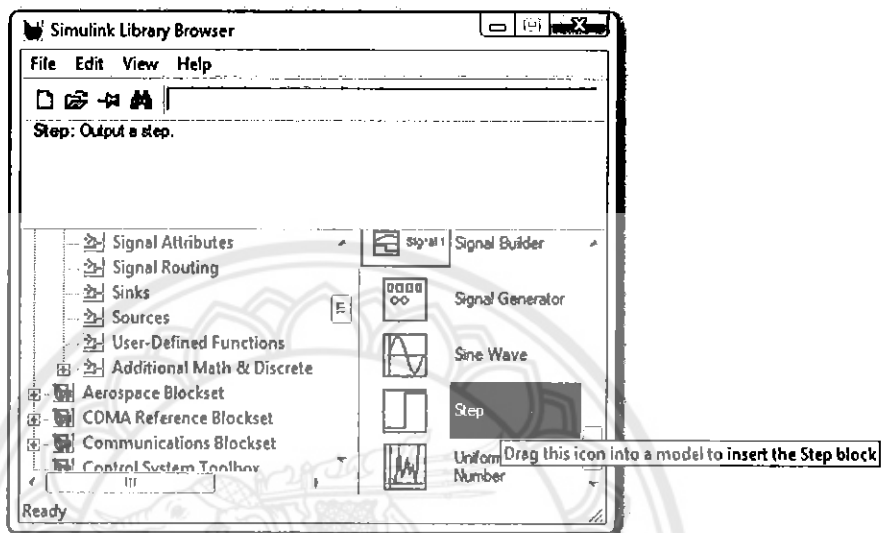
รูปที่ ก. 1.3 workspace ชื่อ Untitled

1.1.1.3 ดับเบิลคลิกที่ Sinks แล้วคลิกที่ Block Scope ลากเมาส์ไปยังหน้าต่าง Untitled



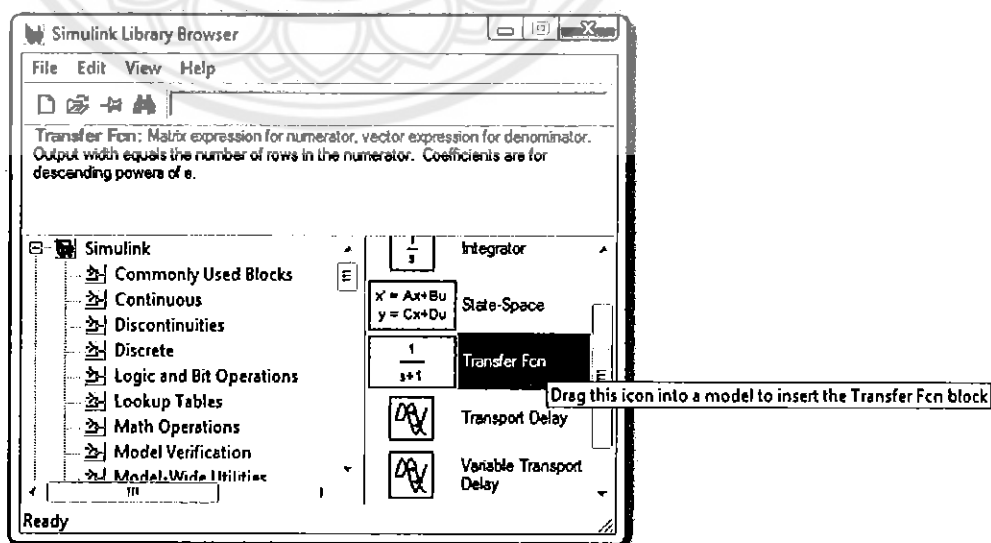
รูปที่ ก 1.4 Block Scope

1.1.1.4 คับเบิ้ลคลิกที่ Sources แล้วคลิกที่ Block Step ลากเมาส์ไปยังหน้าต่าง Untitled



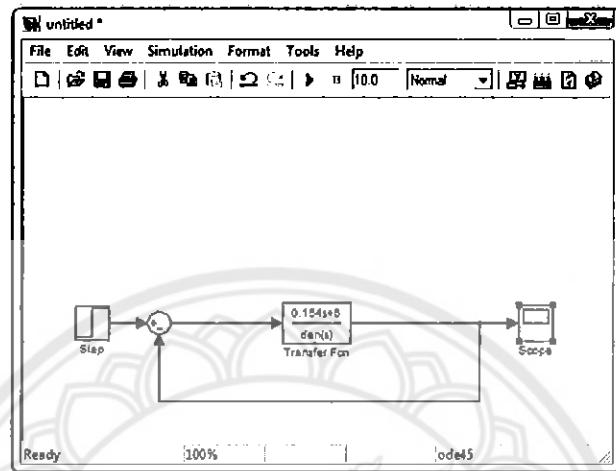
รูปที่ ก 1.5 Block Step

1.1.1.5 คับเบิ้ลคลิกที่ Continuous แล้วคลิกที่ Transfer Fcn ลากเมาส์ไปยังหน้าต่าง Untitled



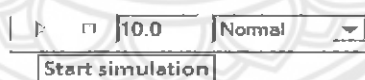
รูปที่ ก 1.6 Block Transfer Font

1.1.1.6 เชื่อมโยง Block ต่างๆเข้าด้วยกันดังรูป



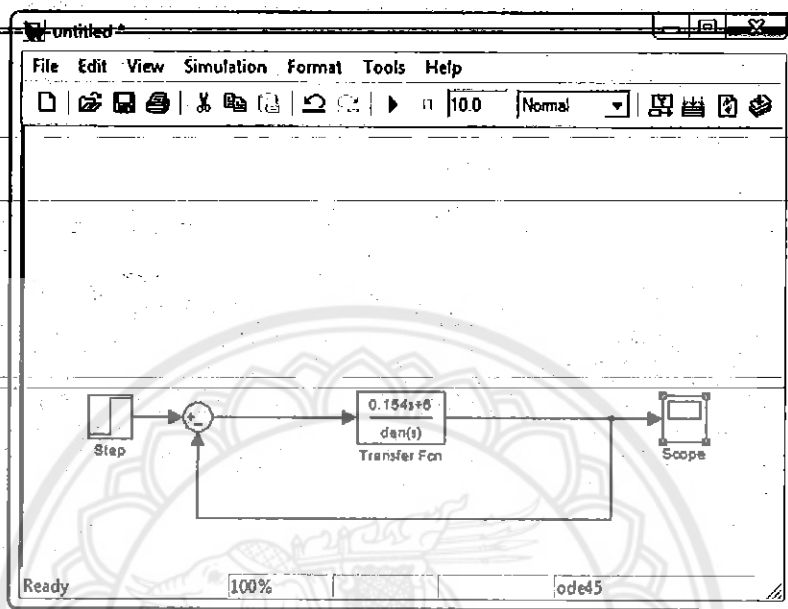
รูปที่ ก 1.7 การเชื่อมโยง Block

1.1.1.7 ประมวลผลโปรแกรมคลิกที่รูปสามเหลี่ยมสีดำจะมีคำว่า Start simulation บอกรไว้ดังรูป

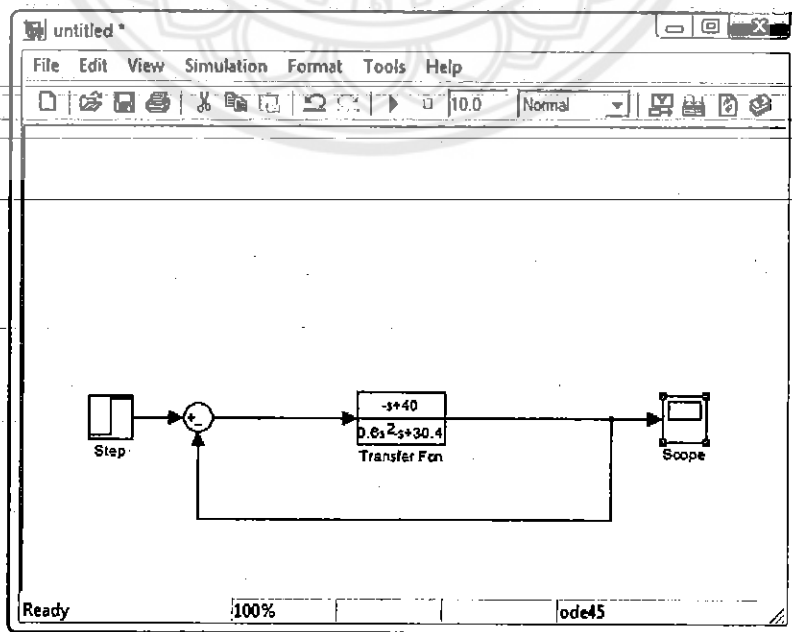


รูปที่ ก 1.8 การรันโปรแกรม

โหมดที่ 1



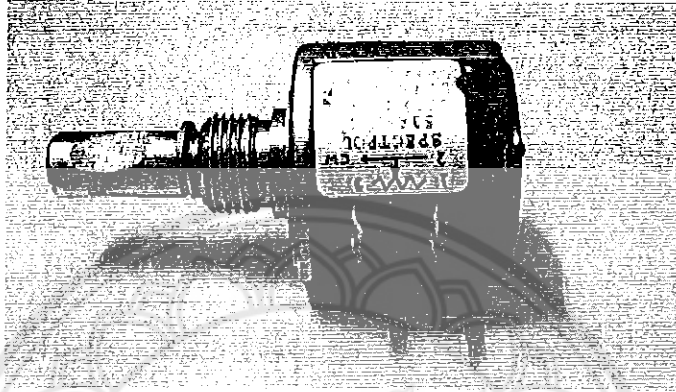
โหมดที่ 2



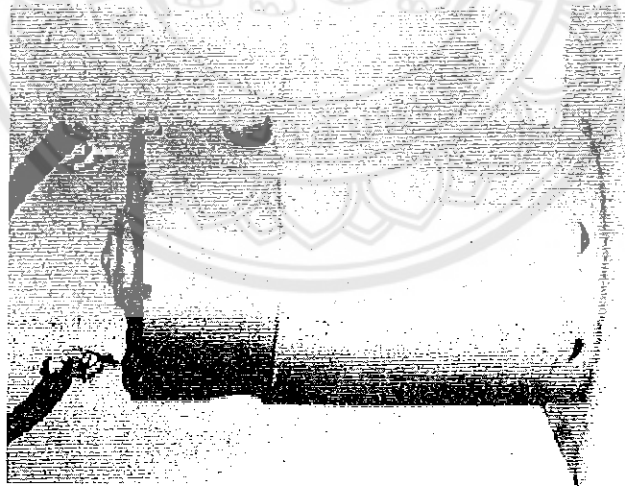


ภาคผนวก ข
แสดงรูปเครื่องแกว่งตุ้มตุ้ยเนื้อย

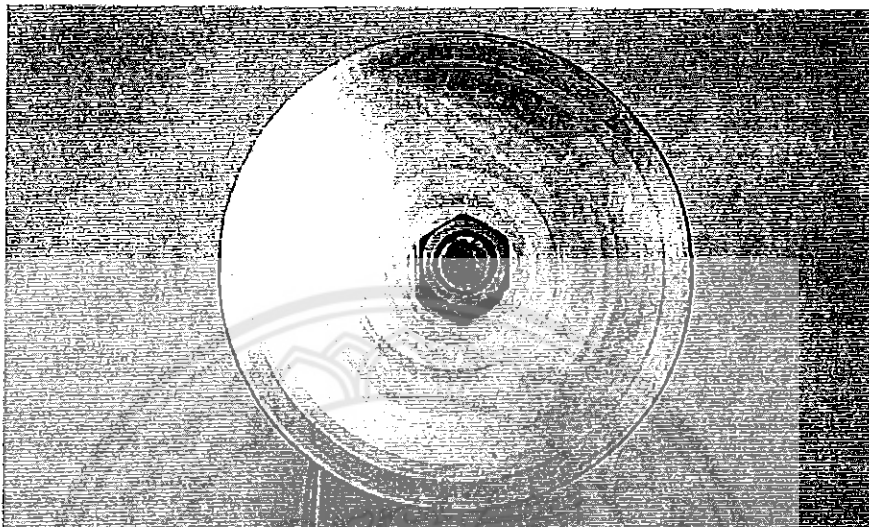
រូប Potentiometer



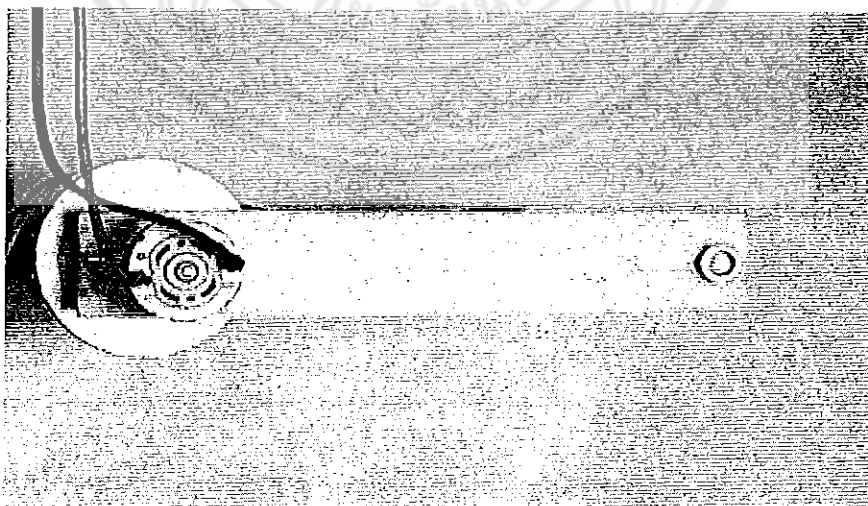
រូប DC Motor



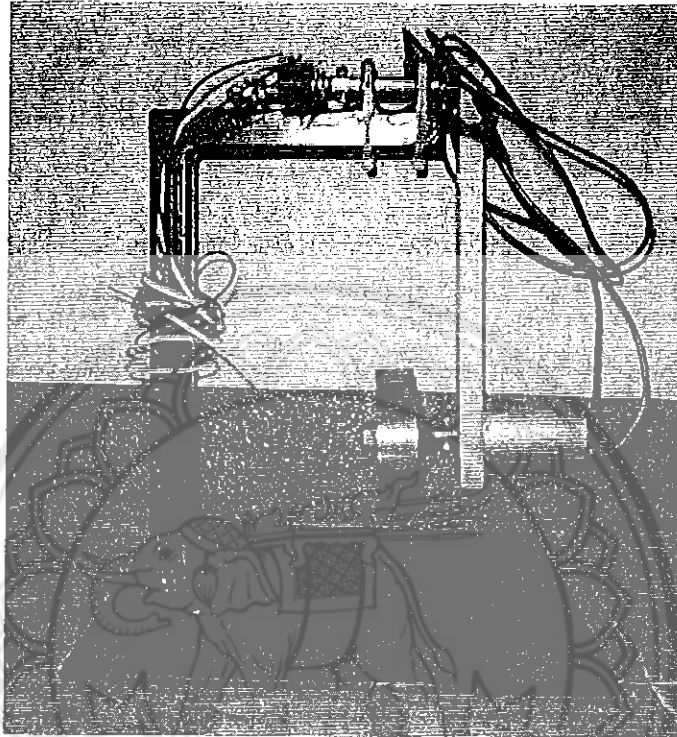
รูปล้อเหยียบ



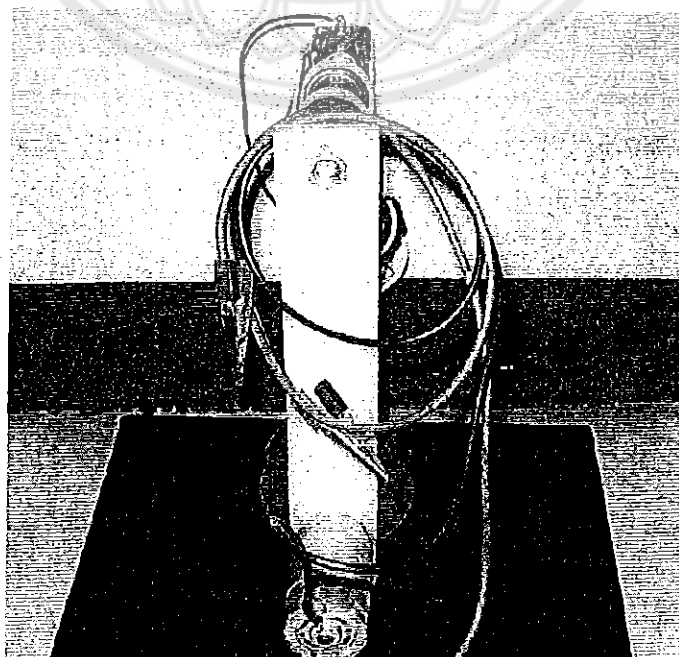
รูปก้าน



รูปเครื่อง (IWP) ด้านข้าง



รูปเครื่อง (IWP) ด้านหน้า



ประวัติผู้จัดทำโครงการ

นายพยนต์ ลิมประดิษฐ์

เกิดเมื่อ วันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2529

ที่อยู่ปัจจุบัน 180/1 หมู่ 10 ต. ท่าชัย อ. ศรีสะเกษ จ. สุโขทัย 64190

ประวัติการศึกษา

- การศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น ณ โรงเรียนสวรรคโลกอนันต์วิทยา อ.สวรรคโลก จ. สุโขทัย
- การศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ณ โรงเรียนสวรรคโลกอนันต์วิทยา อ.สวรรคโลก จ. สุโขทัย

นายชนินทร์ มั่งมี

เกิดเมื่อ วันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 2529

ที่อยู่ปัจจุบัน 113/7 ก.345 ต.บางคูวัด อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000

ประวัติการศึกษา

- การศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น ณ โรงเรียนประชาอุทิศ
- การศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ณ โรงเรียนปากเกร็ด

นายชนศักดิ์ สุระเสียง

เกิดเมื่อ วันที่ 8 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2530

ที่อยู่ปัจจุบัน 44 หมู่ที่ 8 ต.หนองห้าง อ.กุฉินารายณ์ จ.กาฬสินธุ์ 46110

ประวัติการศึกษา

- การศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น ณ โรงเรียนหนองห้างพิทยา อ. กุฉินารายณ์ จ.กาฬสินธุ์
- การศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ณ โรงเรียนหนองห้างพิทยา อ. กุฉินารายณ์ จ. กาฬสินธุ์