

งานวิจัยของวิทยานิพนธ์ พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน

BALL & BEAM POSITION CONTROL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน
BALL & BEAM POSITION CONTROL

ผู้จัดทำ นายศรณรินทร์ แก้วภู 46015323

นายสมชาติ โഴ๊ะเฮง 46015324


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.ชনীต์ ฉะอองเพชรพันธุ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน
BALL & BEAM POSITION CONTROL

โดย

นายศรนรินทร์ แก้วภู 46015323

นายสมชาติ โจ๊ะเฮง 46015324

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ชนัดต์ ละออเพชรพันธุ์

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การศึกษาและการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่ง เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้ ในการควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน ตัวควบคุมที่เลือกมาใช้เป็นแบบ PD ซึ่งออกแบบแตกต่างกันโดยการกำหนดตำแหน่งโพล ให้ลูกบอลไปยังตำแหน่งที่ต้องการและรักษาตำแหน่งนั้นไว้โดยการปรับเนวระนาบของคาน ซึ่งมุมของคานมีผลต่อขนาดของแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อลูกบอล

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้อธิบายถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์, การออกแบบตัวเซนเซอร์และตัวชดเชยของระบบ รวมถึงผลการทดลองที่ได้จากการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB นอกจากนี้ ได้มีการสร้างระบบจริงขึ้นมา โดยมีดีซีมอเตอร์เป็นตัว actuator

ในระบบควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคานนี้ ได้ทำให้เราได้เข้าใจถึงหลักการและความสำคัญของการควบคุมอย่างลึกซึ้ง

BALL & BEAM POSITION CONTROL

Mr. Sornnarin Kaewpu 46015323

Mr. Somchat Sohngeng 46015324

Advisor

Dr. Chanat La-orphacharapan

ABSTRACT

This thesis presents the design of position control system with a ball-and-beam application. A proportional derivative controller (PD) base on the pole placement is used to automatically control. The angle of the horizontal beam as a result, gravity causes the ball to roll along the beam to the desired position and then maintain the ball there.

System modeling, sensor and compensator design are detailed in this thesis. Simulation results, run on MATLAB program are also included. For future experiment purposes, a ball-and-beam system with a DC Motor actuator was built. The ball-and-beam system study give insights into important principles and processes in control.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาเป็นอย่างสูง จากอาจารย์ชยันต์ ละเอียดเพชรพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ความรู้ทางด้าน วิศวกรรมระบบควบคุม และความช่วยเหลืออื่นๆแก่คณะผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณอาจารย์พรสุข รติโรจน์อนันต์และอาจารย์ธวัชชัย คำศรี เป็นอย่างสูง ที่ให้ความเอาใจใส่ตามถึงความก้าวหน้าและคอยกระตุ้นเตือน ทำให้ผู้จัดทำมีความกระตือรือร้นที่จะทำงานให้สำเร็จลุล่วง รวมไปถึงอาจารย์ท่านอื่นๆ ที่ธุรการภาค พิษโตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุกๆ เรื่อง ในการทำโครงการ

ขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุนอุปกรณ์ อาหาร สถานที่ และกิจกรรมบันเทิง เพื่อผ่อนคลายความตึงเครียดของการทำโครงการ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของคณะผู้จัดทำ ที่ได้ให้ความสนับสนุน ให้โอกาสผู้จัดทำได้เล่าเรียนจนถึงทุกวันนี้ และเป็นกำลังใจให้ผู้จัดทำตลอดมา และขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งนางสาวโสภา สุดเลิศศิลป์ ที่อยู่ใใจของผู้จัดทำคนหนึ่ง เป็นแรงผลักดันให้การทำโครงการ และปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

นายศรณรินทร์ แก้วภู

นายสมชาติ โฉ๊ะเฮง

สารบัญ

	หน้า
บทกัณฑ์ย่อ	I
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของบอลบนคาน (System Dynamics of Ball and Beam)	3
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับความเร็ว	7
2.3 ระบบควบคุมที่ใช้เวลาน้อยที่สุด(Time Optimal Control System)	9
2.4 DC MOTOR IN CONTROL SYSTEM	12
2.4.1 Mathematical Modeling of PM DC Motor	13
2.4.2 ระบบเกียร์	16
2.5 ตัวควบคุม (Controller)	20
2.5.1 ระบบควบคุมแบบ P (Proportional Control)	20
2.5.2 ระบบควบคุมแบบ I (Integral Control)	23
2.5.3 ระบบควบคุมแบบ D (Derivative Control)	25
2.5.4 ระบบควบคุมแบบ PI (Proportional plus Integral Control)	26
2.5.5 ระบบควบคุมแบบ PD (Proportional plus Derivative Control)	29
2.5.6 ระบบควบคุมแบบ PID (Proportional plus Derivative plus Integral Control)	30
2.6 ระบบควบคุมวงเปิดของการควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน	32
2.7 ระบบควบคุมวงปิดของการควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน	40
บทที่ 3 หลักการทำงานและการออกแบบ	45
3.1 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพล	45
3.1.1 ตัวควบคุมตำแหน่งลูกบอล (G_{c1}) เป็นตัวควบคุมแบบ P และตัวควบคุมตำแหน่งมุม (G_{c2}) เป็นตัวควบคุมแบบ PD	48
3.1.2 ตัวควบคุมตำแหน่งลูกบอล (G_{c1}) เป็นตัวควบคุมแบบ PD และตัวควบคุมตำแหน่งมุม (G_{c2}) เป็นตัวควบคุมแบบ PD	51
3.2 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Symmetrical Optimum ร่วมกับตารางเร้าท์	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1 การหาตัวควบคุมตำแหน่งมุม	55
3.2.2 การหาตัวควบคุมตำแหน่ง	56
3.2.2.1 กำหนดตัวควบคุม(G_{cl})เป็นตัวควบคุมแบบ P	57
3.2.2.2 กำหนดตัวควบคุม(G_{cl})เป็นตัวควบคุมแบบ PD	57
3.3 ส่วนประกอบของระบบ	59
3.3.1 โครงสร้างของบอลและคาน	60
3.3.2 ดิฟเฟอเรนเชียลพร้อมเกียร์บล็อก	61
3.3.3 วงจรขับดิฟเฟอเรนเชียล	61
3.3.4 ตัวควบคุมตำแหน่งมุมและตำแหน่งของลูกบอลบนคาน	62
3.3.5 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	63
3.3.6 เซนเซอร์วัดตำแหน่งของลูกบอลบนคาน	64
3.3.7 เซนเซอร์มุมของคาน	66
บทที่ 4 การทดลอง	68
4.1.ผลตอบสนองของระบบเมื่อมีตัวควบคุม(จำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB)	68
4.1.1 ออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพล	68
4.1.1.1 ตัวควบคุม G_{cl} และ G_{cl} เป็นแบบ PD(กำหนดค่าเกน K_p , กรณีที่ 1)	68
4.1.1.2 ตัวควบคุม G_{cl} และ G_{cl} เป็นแบบ PD(กำหนดค่าเกน K_p , กรณีที่ 2)	69
4.1.1.3 ตัวควบคุม G_{cl} และ G_{cl} เป็นแบบ PD(กำหนดค่าเกน K_p)	70
4.1.2 ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Symmetrical Optimum ร่วมกับตารางเร้าท์	71
4.1.2.1 เกนของตัวควบคุมถูกกำหนดขึ้นมาคือ $K_p = 5$ และ เกน $K_u = 2$	71
4.1.2.2 เกนของตัวควบคุมได้จากวิธีการกำหนดตำแหน่งโพล	72
4.2.ผลการทดลองที่ได้จากระบบจริง	73
4.2.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานของลวดความร้อน	73
4.2.2 ผลการทดสอบวงจรเซนเซอร์ตำแหน่งของลูกบอล	75
4.2.3 ผลการทดสอบวงจรเซนเซอร์มุมของคาน	77
4.2.4 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบ(เปรียบเทียบตำแหน่ง)	78
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	79
5.1 การจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB	79

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 การทดสอบส่วนต่างๆของระบบ	79
5.3 ข้อเสนอแนะ	80
ภาคผนวก ก ความสัมพันธ์ของ ζ กับ ω_n ที่เป็นตัวกำหนดตำแหน่งโพล	81
ภาคผนวก ข โครงสร้างของบอดและคาน พร้อมดีซีมอเตอร์และโพเทนชิโอมิเตอร์	83
ภาคผนวก ค วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในโครงการ	85
เอกสารอ้างอิง	88



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการเคลื่อนที่ของลูกบอลบนคาน	3
รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้น	9
รูปที่ 2.3 สัญญาณอินพุต Bang-Bang ⁹	
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของ $a(s)$, $V(s)$ และ $X(s)$	10
รูปที่ 2.5 ลักษณะของสัญญาณ Bang-Bang ที่ใช้กับระยะทาง 1 เมตรและท่ามม 5 องศา	12
รูปที่ 2.6 equivalent circuit diagram ของดีซีมอเตอร์	13
รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์	15
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์การกระจัดเชิงมุม, ความเร็วเชิงมุมและสัญญาณอินพุต	16
รูปที่ 2.9 ระบบเกียร์	16
รูปที่ 2.10 ระบบเกียร์ที่รวมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	18
รูปที่ 2.11 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต	21
รูปที่ 2.12 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ P	22
รูปที่ 2.13 ระบบควบคุมแบบ P	23
รูปที่ 2.14 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ I	24
รูปที่ 2.15 ระบบควบคุมแบบ I	24
รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองของระบบ ควบคุมแบบ D	25
รูปที่ 2.17 ระบบควบคุมแบบ D	26
รูปที่ 2.18 บล็อก ไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ PI	27
รูปที่ 2.19 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PI	27
รูปที่ 2.20 บล็อก ไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ PD	29
รูปที่ 2.21 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PD	30
รูปที่ 2.22 บล็อก ไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ PID	30
รูปที่ 2.23 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PID	31
รูปที่ 2.24 บล็อก ไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์ที่ได้จากสมการที่(2-30)	33
รูปที่ 2.25 ผลตอบสนองของดีซีมอเตอร์แบบวงเปิด	33
รูปที่ 2.26 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของดีซีมอเตอร์ที่มีอินพุตเป็น square wave	34
รูปที่ 2.27 ผลตอบสนองของดีซีมอเตอร์ที่มีอินพุตเป็น square wave	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.28 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของคิซิมอเตอร์ที่มีอินพุทเป็น squarewave(2)	34
รูปที่ 2.29 ผลตอบสนองของคิซิมอเตอร์ที่มีอินพุทเป็น square wave(2)	35
รูปที่ 2.30 simul ink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของคิซิมอเตอร์ที่มีตัวควบคุม PID	35
รูปที่ 2.31 ผลตอบสนองของคิซิมอเตอร์ที่มีตัวควบคุม $P=4, I=0, D=0$	36
รูปที่ 2.32 ผลตอบสนองของคิซิมอเตอร์ที่มีตัวควบคุม $P=20, I=0, D=0$	36
รูปที่ 2.33 ผลตอบสนองของคิซิมอเตอร์ที่มีตัวควบคุม $P=20, I=0, D=2$	37
รูปที่ 2.34 ผลตอบสนองของคิซิมอเตอร์ที่มีตัวควบคุม $P=50, I=0, D=1$	37
รูปที่ 2.35 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้น ซึ่งมีอินพุทเป็นมุมของคิซิมอเตอร์	38
รูปที่ 2.36 ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้นซึ่งมีอินพุทเป็นมุมของคิซิมอเตอร์	38
รูปที่ 2.37 รูปขยายระบบการเคลื่อนที่ของระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้น ซึ่งมีอินพุทเป็นมุมของคิซิมอเตอร์	39
รูปที่ 2.38 รูปขยายความเร็วของระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้น ซึ่งมีอินพุทเป็นมุมของคิซิมอเตอร์	39
รูปที่ 2.39 บล็อกไดอะแกรมของระบบวงปิดที่สมบูรณ์	40
รูปที่ 2.40 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของคิซิมอเตอร์ที่มีอินพุทเป็น unitstep	41
รูปที่ 2.41 ผลตอบสนองของคิซิมอเตอร์ที่มีอินพุทเป็น unitstep	41
รูปที่ 2.42 simulink model ของระบบวงปิดที่สมบูรณ์	42
รูปที่ 2.43 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่สมบูรณ์	42
รูปที่ 2.44 simulink model ของระบบวงปิดที่สมบูรณ์เมื่อไม่มีตัวควบคุม	43
รูปที่ 2.45 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่สมบูรณ์เมื่อไม่มีตัวควบคุม	43
รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบวงเปิดของระบบควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน	46
รูปที่ 3.2 simulink model ระบบวงเปิดของระบบควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน	46
รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน	47
รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบวงปิด	47
รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมตำแหน่งของลูกบอล และตำแหน่งมุม(1)	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมตำแหน่งของลูกบอล และตำแหน่งมุม(2)	51
รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของระบบวงเปิดควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน	54
รูปที่ 3.8 ระบบควบคุมวงปิดของระบบ	54
รูปที่ 3.9 Control loop ซึ่งมี Integrating , first order delays	55
รูปที่ 3.10 ระบบของ Loop ในเมื่อใส่ตัวควบคุมแบบ PI	56
รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมของ loop ใน ที่ประมาณเป็น first order delay	56
รูปที่ 3.12 ระบบที่ใช้ในการหาตัวควบคุมตำแหน่งของลูกบอล	57
รูปที่ 3.13 ระบบเมื่อใส่ตัวควบคุมตำแหน่งแบบ PD (1)	58
รูปที่ 3.14 ระบบเมื่อใส่ตัวควบคุมตำแหน่งแบบ PD (2)	59
รูปที่ 3.15 รูปหน้าตัดของลูกบอลบนคาน	60
รูปที่ 3.16 วงจรขับมอเตอร์	62
รูปที่ 3.17 วงจรควบคุมแบบ PD	62
รูปที่ 3.18 วงจร Comparator Amplifier	63
รูปที่ 3.19 วงจรแบ่งแรงดัน	64
รูปที่ 3.20 วงจรปรับ zero-span	65
รูปที่ 3.21 การติดตั้ง โฟเทนซี โอมิเตอร์	67
รูปที่ 3.22 วงจรการต่อใช้งาน	67
รูปที่ 4.1 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบ (1)	68
รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองของระบบ (1)	68
รูปที่ 4.3 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบ (2)	69
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของระบบ (2)	69
รูปที่ 4.5 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบ (3)	70
รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของระบบ (3)	70
รูปที่ 4.7 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบ (4)	71
รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองของระบบ (4)	71
รูปที่ 4.9 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบ (5)	72
รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองของระบบ (5)	72

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางบนคานกับค่าความต้านทานของลวดความร้อน	75
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางบนคานกับแรงดันที่วัดได้	76
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของคานกับแรงดันที่วัดได้	77
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง ผลต่างของตำแหน่งอ้างอิงกับตำแหน่งของลูกบอล	78
รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมระบบใหม่	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานที่จุดต่างๆบนคานและค่าคงที่ ณ จุดที่ลูกบอลเชื่อมต่อ	73
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวงจรเซนเซอร์ตำแหน่งของลูกบอล	75
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบวงจรเซนเซอร์มุมของคาน	77
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบ ผลต่างของตำแหน่งอ้างอิงกับตำแหน่งของลูกบอล	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการจัดทำโครงการนี้เป็นผลมาจากหลักสูตรของภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่กำหนดให้นักศึกษาชั้นปีสุดท้ายในระดับปริญญาตรี ต้องทำโครงการชั้น 1 ขึ้น ที่เกี่ยวข้องกับการเรียนของภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ผู้จัดทำเห็นว่า ระบบควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน เป็นโครงการที่น่าสนใจ เพราะได้มีการจัดทำมาแล้วถึงสามครั้ง โดยครั้งแรกจัดทำในปี 2536 ซึ่งใช้ชดลวดนิโครมเป็นตัววัดตำแหน่งของลูกบอล แต่ไม่สามารถควบคุมได้ ครั้งที่สองจัดทำในปี 2542 ใช้ตัวรับส่งอินฟราเรด จัดเรียงกันบนคานเพื่อวัดตำแหน่งของลูกบอล แต่ไม่สามารถควบคุมได้เช่นกัน ครั้งที่สามจัดทำในปี 2544 ใช้กล้องเป็นตัววัดตำแหน่งของลูกบอล ซึ่งสามารถควบคุมได้ โดยมีความผิดพลาดประมาณ 7%

จะเห็นว่าในการจัดทำทั้งสามครั้ง ใช้ตัววัดตำแหน่งไม่เหมือนกัน จึงทำให้การควบคุมต่างกันไปด้วย โครงการนี้จึงเหมาะที่จะจัดทำขึ้น ประกอบกับอาจารย์ที่ปรึกษา(อ.ชนัดต์ สะออดเพชรพันธุ์) มีความรู้ในการควบคุมระบบทาง mechanics และเป็นผู้ที่เสนอให้จัดทำโครงการนี้ขึ้นมา

1.2 วัตถุประสงค์

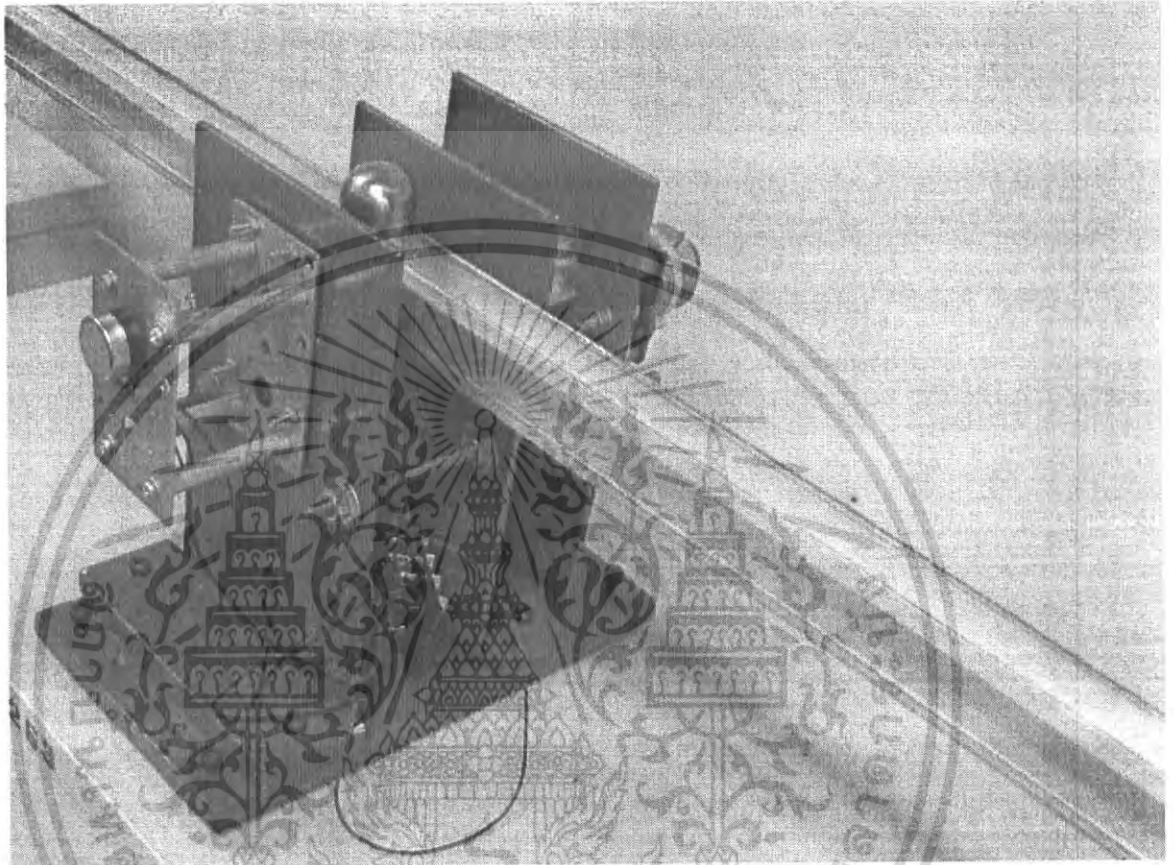
1. เพื่อศึกษาระบบการเคลื่อนที่ของลูกบอลบนคาน
2. เพื่อศึกษาระบบที่ใช้ในการควบคุม
3. สามารถจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB ได้
4. เพื่อให้เข้าใจถึงปัญหาและสามารถแก้ไขได้

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ลูกบอลที่ใช้เป็นโลหะซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 1 นิ้ว
2. ตัวคานยาวไม่เกิน 1 เมตร
3. ระบบทั้งหมดเป็นแบบอนาล็อก

1.4 เป้าหมายของโครงการ

สามารถควบคุมให้ลูกบอลไปอยู่ในจุดที่กำหนดได้ โดยให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดและใช้เวลาน้อยที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

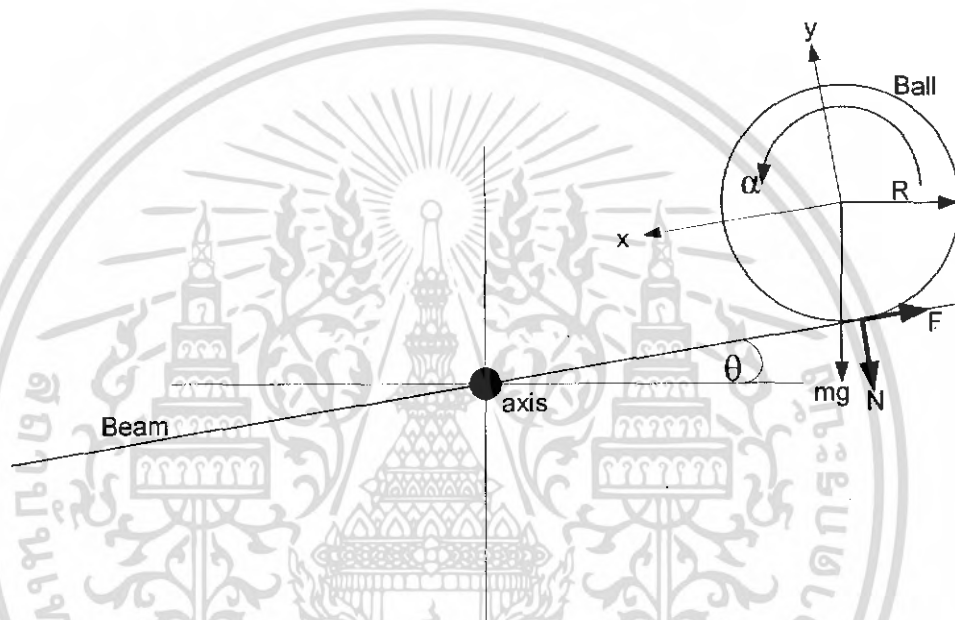
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน

2.1 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของบอลบนคาน (System Dynamics of Ball and Beam)

ในการวิเคราะห์ ให้ระบบมีลักษณะของ modelling ดังรูป



รูปที่ 2.1 แสดงการเคลื่อนที่ของลูกบอลบนคาน

โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับระบบคือ

M = มวลของลูกบอล	a = ความเร่งเชิงเส้นของลูกบอล
R = รัศมีของลูกบอล	α = ความเร่งเชิงมุมของลูกบอล
θ = มุมของคาน	ω = ความเร็วเชิงมุมของลูกบอล
J = แรงเฉื่อยที่มีในลูกบอล	v = ความเร็วเชิงเส้นของลูกบอล
x = ตำแหน่งของลูกบอลบนคาน	g = แรงโน้มถ่วงของโลก
τ = แรงบิดที่เกิดจากการหมุนของคาน	F = แรงเกิดจากความฝืด จุดที่บอลสัมผัสกับคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ สมมติให้ลูกบอลกลิ้งลงมาโดยปราศจากการลื่นหรือไถล ผลรวมของแรงที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อลูกบอลเคลื่อนที่คือ

$$\Sigma F = Mg \sin \theta - F \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของวัตถุ ขณะเริ่มต้นการเคลื่อนที่ จะมีความฝืดขณะเริ่มต้น (static friction) เกิดขึ้นก่อน ความฝืดนี้เป็นตัวที่ทำให้ลูกบอลเกิดการหมุน ซึ่งคือค่าของแรง F ต้องมีอยู่ในสมการ การเคลื่อนที่แบบหมุนด้วยทุกครั้ง เมื่อคูณแรง F ด้วยรัศมีของลูกบอล จะได้แรงบิดที่จุดศูนย์กลางคือ

$$\tau = FR \quad \dots\dots\dots(2-2)$$

แต่แรงบิดที่เกิดจากการหมุนคือ

$$\tau = J\alpha \quad \dots\dots\dots(2-3)$$

ดังนั้น ความฝืดที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบหมุนคือ

$$F = \frac{J\alpha}{R} \quad \dots\dots\dots(2-4)$$

แทนค่าความฝืดที่ได้จากสมการที่ (2-4) ลงในสมการที่ (2-1) จะได้

$$Ma = Mg \sin \theta - \frac{J\alpha}{R} \quad \dots\dots\dots(2-5)$$

การกลิ้งของลูกบอลจะเกิดความเร่งขึ้นสองแบบคือ ความเร่งเชิงเส้น (Linear Acceleration) และ ความเร่งเชิงมุม (Angular Acceleration) ถ้าหากลูกบอลกลิ้งโดยไม่มีการลื่นหรือไถล จะพบว่าความเร่งทั้งสองแบบนี้มีความสัมพันธ์คือ

$$a = \alpha R \quad \dots\dots\dots(2-6)$$

ดังนั้นสมการที่ (2-5) สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} MR\alpha &= Mg\sin\theta - \frac{J\alpha}{R} \\ MR\alpha &= \frac{MRg\sin\theta - J\alpha}{R} \\ MR^2\alpha &= MRg\sin\theta - J\alpha \\ \alpha(MR^2 + J) &= MRg\sin\theta \\ \alpha &= \frac{MRg\sin\theta}{MR^2 + J} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

สมการที่ (2-7) คือความเร่งเชิงมุมของลูกบอลเมื่อลูกบอลเคลื่อนที่

จากระบบเมื่อลูกบอลกลิ้งลงมาจะเกิดระยะทางขึ้น นั่นหมายความว่ามีความเร่งเชิงเส้นเกิดขึ้นด้วย จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2-6) จะได้ความเร่งเชิงเส้นของลูกบอลคือ

$$\begin{aligned} \frac{a}{R} &= \frac{MRg\sin\theta}{MR^2 + J} \\ a &= \frac{MR^2g\sin\theta}{MR^2 + J} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

พิกจน์ J คือ แรงเฉื่อยที่มีในลูกบอลเมื่อเกิดการหมุน จุดหมุนของลูกบอลเมื่อกำลังลงมา จะอยู่ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นค่า J ของลูกบอลจะมีค่า $\frac{2}{5}MR^2$ แทนลงไปในสมการที่ (2-8) จะได้

$$\begin{aligned} a &= \frac{MR^2g\sin\theta}{MR^2 + \frac{2}{5}MR^2} \\ a &= \frac{MR^2g\sin\theta}{MR^2\left(1 + \frac{2}{5}\right)} \\ a &= \frac{5}{7}g\sin\theta \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

สมการที่ (2-9) คือความเร่งเชิงเส้นที่เกิดขึ้นเมื่อลูกบอลกลิ้งลงมาและสังเกตได้ว่า มุม θ ของคานเป็นตัวกำหนดความเร่งเชิงเส้นให้กับลูกบอล

พิจารณาความเร่ง เกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเทียบกับเวลา ซึ่งมีสมการคือ

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} \quad : v(t) \text{ คือ ความเร็วที่เวลา}(t) \text{ใดๆ}$$

แต่ความเร็วเกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของการกระจัดเทียบกับเวลา ซึ่งมีสมการคือ

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad : x(t) \text{ คือ ตำแหน่งที่เวลา}(t) \text{ใดๆ}$$

ดังนั้น จะได้สมการความเร่งคือ

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{dx^2(t)}{dt^2} \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

พิจารณา $\sin\theta$ เมื่อทำการกระจายอนุกรมเทเลอร์คือ $\sin\theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots$ ถ้าให้มุม θ ของคานมีค่าน้อยๆ จะประมาณได้ว่า

$$\sin\theta = \theta \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

แทนสมการที่ (2-10) และสมการที่ (2-11) ลงในสมการที่ (2-9) จะได้

$$\frac{dx^2(t)}{dt^2} = \frac{5}{7}g\theta \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (2-12) จะได้

$$s^2X(S) = \frac{5}{7}g\theta(S)$$

ให้ $X(S)$ คือเอาต์พุทของระบบ

$\theta(S)$ คืออินพุทของระบบ

ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือ

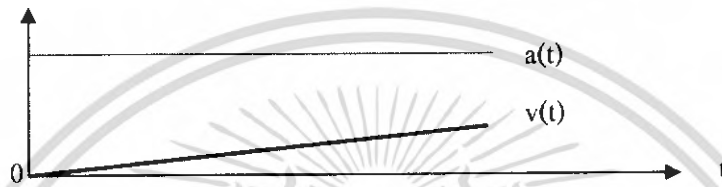
$$G(S) = \frac{X(S)}{\theta(S)} = \frac{5g/7}{s^2} \quad \dots\dots\dots (2-13)$$

นั่นคือ ตำแหน่งของลูกบอลบนคาน ขึ้นอยู่กับมุมของคาน

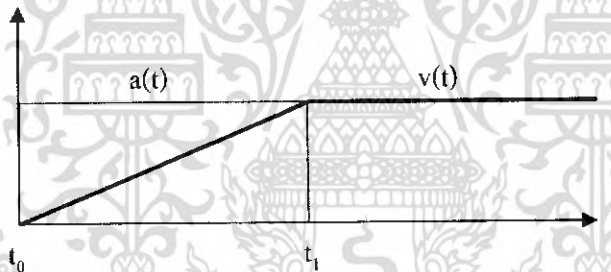
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับความเร็ว

จากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ ถ้าให้อินพุตคือมุม θ มีค่าที่คงที่ตลอดเวลา ระยะทาง X จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่กรณีที่ให้มีมุมที่จำกัด ดังนั้น มุม θ จะคงที่ที่ค่าใดค่าหนึ่งไม่ได้ จากสมการที่ (2-9) จะเห็นว่าค่าความเร่งเชิงเส้นของระบบ ถูกกำหนดโดยมุม θ ของคาน ถ้ามุม θ คงที่ ค่าความเร่งจะคงที่ด้วย เมื่อความเร่งคงที่หมายความว่าความเร็วเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่คงที่ ถ้าพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับความเร็ว จะได้ความสัมพันธ์คือ

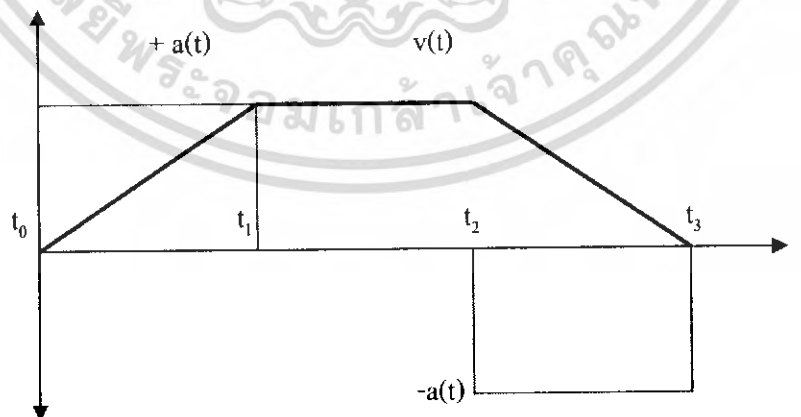
1. ถ้าให้ค่าความเร่งมีค่าคงที่บวกตลอดเวลา นั่นหมายความว่าความเร็วเพิ่มขึ้นตลอดเวลาเช่นกัน ดังแสดงได้ดังรูป



2. ถ้าให้ความเร่งมีขอบเขตจำกัดเช่น ให้ความเร่งมีค่าที่เวลา $t=0$ ถึง $t=t_1$ ให้ความเร็วเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่คงที่จนถึงที่เวลา $t=t_1$ จะได้ค่าความเร็วสูงสุด และจะคงค่านี้ไว้ตลอดเวลาเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ดังรูป



3. ถ้ามีความเร็วที่คงที่ หากต้องการให้ลดลง ทำได้โดยให้ค่าความเร่งคงที่ลบดังรูป



จากความสัมพันธ์ทั้ง 3 แบบสรุปได้ว่า

- ความเร่งเป็นค่าบวก ทำให้ ความเร็วเพิ่มขึ้น
- ความเร่งเป็นศูนย์ ทำให้ความเร็วคงที่
- ความเร่งเป็นค่าลบ ทำให้ความเร็วลดลง

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วกับการกระจัดคือ

- ถ้ามีความเร็วเกิดขึ้นนั้นหมายความว่า มีการเคลื่อนที่และได้ระยะทาง
- ถ้าไม่มีความเร็วเกิดขึ้นนั้นหมายความว่า ไม่มีการเคลื่อนที่(วัตถุหยุดนิ่งอยู่กับที่)และไม่มีระยะทางเกิดขึ้น

จากความสัมพันธ์ของ ความเร่ง ความเร็วและการกระจัด(ซึ่งคือตัวแปรที่ใช้อธิบายในการเคลื่อนที่แนวเส้นตรง) ถ้าหากเราทราบค่าความเร่งที่คงที่นั้นว่ามีค่าเท่าไร จะสามารถหาค่าความเร็วและระยะการกระจัด ได้โดย

$$v(t) = \int a(t)dt \quad \dots\dots\dots (2-14)$$

$$x(t) = \int v(t)dt \quad \dots\dots\dots (2-15)$$

ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (2-14) และสมการที่ (2-15) จะได้

$$V(S) = \frac{1}{s} a(S) \quad \dots\dots\dots (2-16)$$

$$X(S) = \frac{1}{s} V(S) \quad \dots\dots\dots (2-17)$$

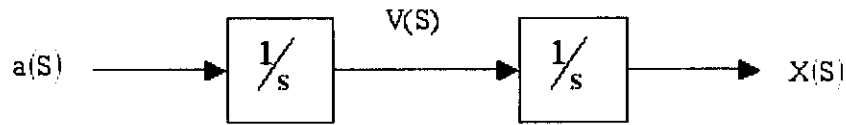
จะได้ ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างอินพุต a(S)และเอาต์พุต X(S) คือ

$$G(s) = \frac{X(S)}{a(S)} = \frac{1}{s^2} \quad \dots\dots\dots (2-18)$$

ถ้าทำการเปรียบเทียบระหว่าง สมการที่ (2-13) กับสมการที่ (2-18) พบว่าระบบจะคล้ายคลึงกัน ทั้งสองระบบนี้มีระยะการกระจัด (X(S)) เป็นเอาต์พุตเหมือนกัน แต่เราทราบว่า ค่าความเร่งเชิงเส้นของลูกบอลถูกกำหนดโดยมุม θ ของคาน ดังนั้นเราสามารถวิเคราะห์ระบบควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน ได้เช่นเดียวกับระบบการเคลื่อนที่แนวเส้นตรง โดยค่าของ $\frac{5g}{7}$ จะเป็นเกนของระบบ

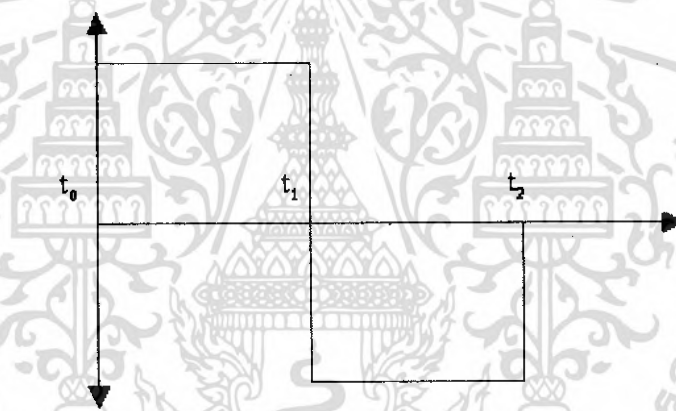
2.3 การควบคุมที่ใช้เวลาน้อยที่สุด(Time Optimal Control)

จากระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้น สมการที่(2-16)และ(2-17) สามารถจัดระบบให้อยู่ในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้คือ



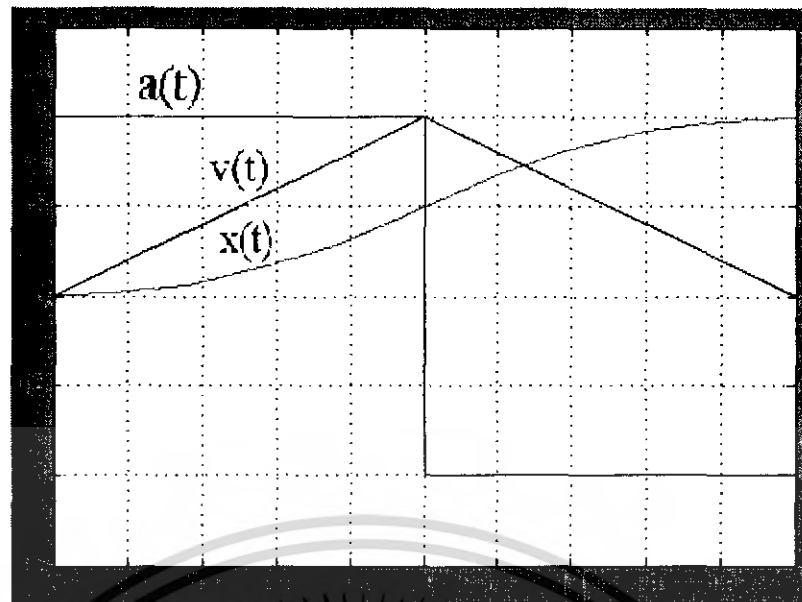
รูปที่2.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้น

ระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้นนั้น เป็นระบบที่มีลักษณะเป็น Double Integrator ทฤษฎีการควบคุมที่ใช้เวลาน้อยที่สุด(Time Optimal Control) บอกว่า ถ้าต้องการให้การเดินทางใช้เวลาน้อยที่สุด ความเร่งที่เป็นอินพุทของระบบ จะต้องมีลักษณะเป็น squar wave ที่มีชื่อว่า Bang-Bang ดังรูป



รูปที่2.3 สัญญาณอินพุท Bang-Bang

โดยคาบเวลา $t_0 - t_1$ เท่ากับคาบเวลา $t_1 - t_2$ และมีขนาดเท่ากับ 1 หน่วย ให้สัญญาณอินพุท $a(s)$ มีลักษณะดังรูป ใส่ให้กับระบบจะได้ความสัมพันธ์ของ $a(s)$, $v(s)$ และ $x(s)$ คือ



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของ $a(t)$, $v(t)$ และ $x(t)$

จะพบว่า ถ้าให้ระยะทางที่ต้องการคือ 1 ที่เวลา t_1 คือเวลาที่ความเร่งเปลี่ยนจากบวกเป็นลบ จะได้ความเร็วสูงสุดและระยะทางจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของระยะทางที่ต้องการพอดี ที่เวลา t_2 ความเร่งเป็นศูนย์ได้ความเร็วเป็นศูนย์ เมื่อไม่มีความเร็วจึงไม่มีการเคลื่อนที่ ทำให้ระยะทางที่ต้องการหยุดที่ 1 พอดี

จากความสัมพันธ์นี้ ถ้าเปลี่ยนอินพุต $a(t)$ เป็น $0(t)$ (เพราะมุม θ เป็นตัวกำหนดความเร่งอยู่แล้ว) เราสามารถบังคับให้บอลเคลื่อนที่ไปหยุดยังตำแหน่งที่ต้องการได้โดย ที่เวลา $t < 0$ ให้มุมของคานทำมุมศูนย์องศา ที่เวลา $t = t_1$ ให้มุมของคานเป็น $+\theta$ ค่าใดค่าหนึ่ง (น้อยๆ) แล้วเปลี่ยนเป็น $-\theta$ ที่เวลา $t = t_2$ สุดท้ายให้กลับเป็นศูนย์องศา ที่เวลา $t = t_3$

การประมาณระบบ

การประมาณค่าของ $\sin\theta$ ถ้าให้มุมของคานมีค่า 5 องศา หากคิดในหน่วยเรเดียนจะพบว่า

$$5 \text{ องศา} = \frac{5(3.1416)}{180} = 0.0872 \text{ เรเดียน}$$

$$\sin(0.0872 \text{ เรเดียน}) = 0.087155$$

ดังนั้น จะประมาณได้ว่า $\sin\theta \approx \theta$

จากสมการที่ (2-9) $a = \frac{5}{7}g\sin\theta$ ซึ่งมุม θ เป็นตัวกำหนดค่าความเร่งของลูกบอล ถ้าให้คานทำ

มุม 5 องศา จะได้ค่าความเร่งของลูกบอลคือ ($g = 9.8\text{m/s}^2$)

$$a = \frac{5}{7} \left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \sin(0.0872 \text{ rad}) = 0.61 \text{ m/s}^2$$

ซึ่งเป็นค่าคงที่แล้ว จะสามารถหาค่าความเร็วของลูกบอลได้จากสมการที่ (2-14) จะได้ความเร็วของลูกบอลคือ

$$v(t) = v_0 + \left(0.61 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) t \quad \dots\dots\dots (2-19)$$

v_0 คือความเร็วเริ่มต้น สมมติให้ลูกบอลหยุดอยู่กับที่บนคาน ดังนั้นจึงไม่มีความเร็วเริ่มต้น จะได้

$v(t) = (0.61 \text{ m/s}^2)t$ และสามารถหาตำแหน่งที่เวลาใดๆได้จากสมการที่ (2-15) จะได้

$$x(t) = x_0 + \frac{1}{2} \left(0.61 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) t^2 \quad \dots\dots\dots (2-20)$$

x_0 คือตำแหน่งที่เวลา $t=0$ สมมติให้ลูกบอลเคลื่อนที่จากจุดที่อยู่นิ่ง ($x_0 = 0$) จะได้ตำแหน่งที่เวลาใดๆ

$$\text{คือ } x(t) = \frac{1}{2} \left(0.61 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) t^2$$

จากขอบเขตของโครงการ ที่กำหนดความยาวของคานไม่เกิน 1 เมตร ถ้าให้จุดเริ่มต้นของลูกบอลอยู่ที่จุดศูนย์ ดังนั้นจะทำให้ทราบว่าเวลาที่มากที่สุดที่ลูกบอลใช้เวลาในการเคลื่อนที่มีค่าเท่าไร โดยหาได้จากสมการที่ (2-20) ถ้าให้ $x(t) = 1$ เมตร เวลาที่ได้จะมีค่า

$$1\text{m} = \frac{1}{2} \left(0.61 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) t^2$$

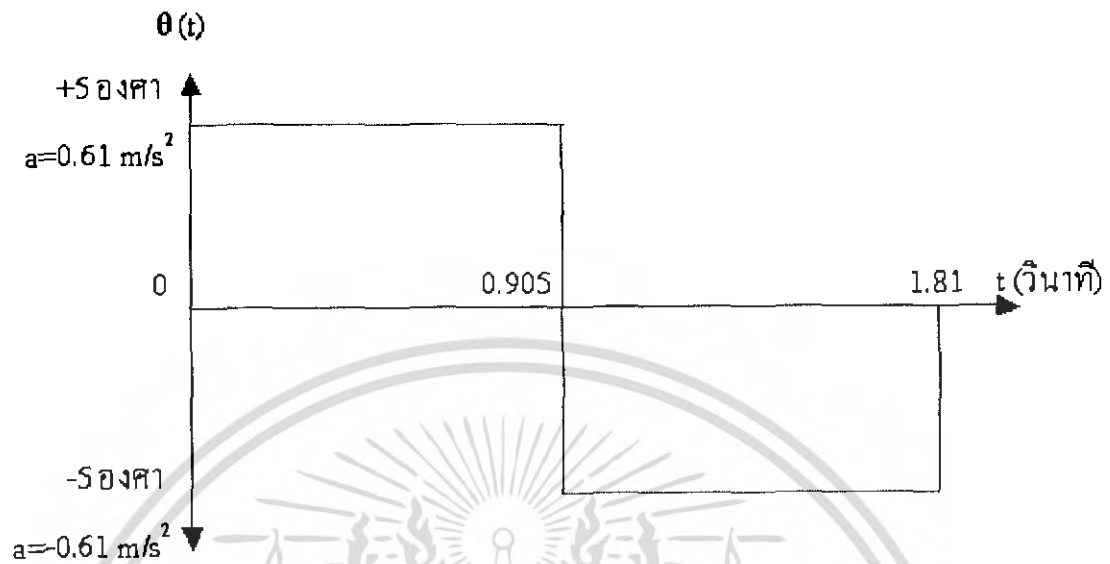
$$t^2 = \frac{(2)(1\text{m})}{0.61 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$t = \left[\frac{(2)(1\text{m})}{0.61 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right]^{1/2}$$

$$t = 1.81 \text{ วินาที}$$

คือเวลาน้อยที่สุดที่ลูกบอลใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น ไปอยู่ ณ.จุดที่ห่างออกไป 1 เมตร

ดังนั้น เวลาที่คานจะต้องเปลี่ยนจาก +5 องศา ไปเป็น -5 องศา คือที่เวลา $t=0.905$ วินาที จากเวลาเริ่มต้นที่ $t=0$ วินาที และกลับไปเป็นมุม 0 องศาที่เวลา $t=1.81$ วินาที ตามรูป



รูปที่ 2.5 ลักษณะของสัญญาณ Bang-Bang ที่ใช้กับระยะทาง 1 เมตรและทำมุม 5 องศา

ดังนั้นจะมีการควบคุมระบบ ได้ 2 วิธีคือ

- ใช้ตัววัดตำแหน่งเป็นตัวส่งสัญญาณให้คานเปลี่ยนมุม โดยมี 3 ขั้นตอนคือ
 1. วัดจุดเริ่มต้นที่เวลา $t=0$ ส่งสัญญาณให้คานทำมุม 5 องศา
 2. เมื่อลูกบอลเดินทางไปถึง 1/2 ของระยะทาง ส่งสัญญาณให้คานทำมุม -5 องศา
 3. เมื่อลูกบอลเดินทางไปถึงจุดที่ต้องการส่งสัญญาณให้คานทำมุม 0 องศา
- สร้างสัญญาณสำเร็จรูปไปควบคุม

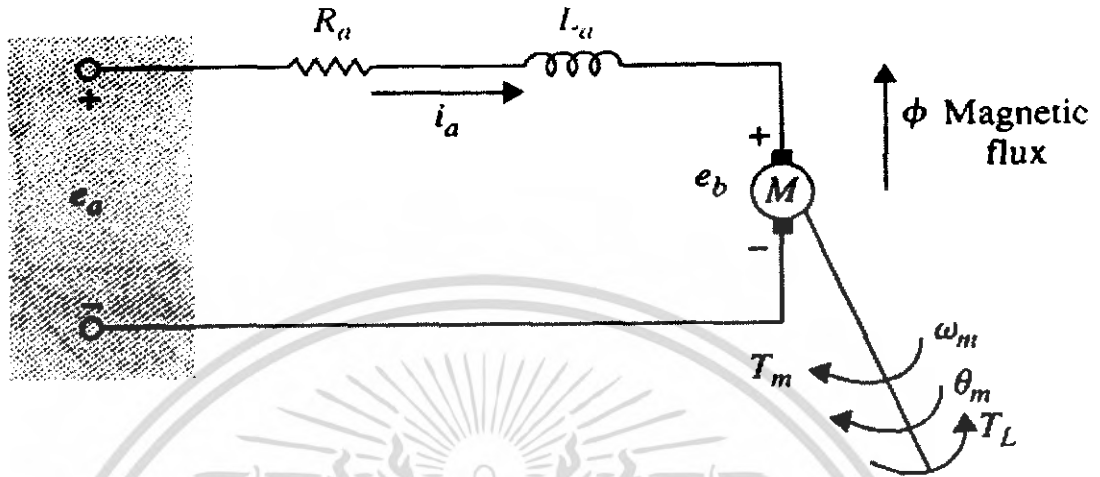
โดยการสร้างสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมหนึ่งลูกคลื่น ที่มี Duty Cycle 50% และมี Amplitude ที่สัมพันธ์กับมุม 5 องศา ส่วนคาบเวลาจะถูกกำหนดโดยระยะเวลาการกระจัดจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดที่ต้องการ

2.4 DC MOTOR IN CONTROL SYSTEM

เนื่องจาก ฟังก์ชันถ่ายโอนการเคลื่อนที่ของลูกบอลบนคานคือ $\frac{X(s)}{\theta(s)} = \frac{(5/7)g}{s^2}$ ซึ่งมีมุม 0 ของคานเป็นอินพุตของระบบ สิ่งที่กำหนดมุมของคานได้มีหลายชนิด แต่ที่เหมาะสมที่สุดคือดีซีมอเตอร์ เพราะสามารถควบคุมให้มีมุม 0 ได้ทุกค่า

2.4.1 Mathematical Modeling of PM DC Motor

ในการจำลองระบบของดีซีมอเตอร์ จะใช้ equivalent circuit diagram ดังรูป เพื่อหาสมการมาอธิบายระบบ



รูปที่ 2.6 equivalent circuit diagram ของดีซีมอเตอร์

ซึ่งมีตัวแปรที่ใช้ในการอธิบายระบบดังนี้

- R_a = armature resistance
- L_a = armature inductance
- $e_a(t)$ = applied voltage
- $e_b(t)$ = back emf
- K_b = back-emf constant
- K_t = torque constant
- Φ = magnetic flux in the air gap
- $T_L(t)$ = load torque
- $T_m(t)$ = motor torque
- $\omega_m(t)$ = rotor angular velocity
- $\theta_m(t)$ = rotor displacement
- J_m = rotor inertia
- B_m = viscous-friction coefficient
- $i_a(t)$ = armature current

การวิเคราะห์ สำหรับการวิเคราะห์เชิงเส้นจะสมมติว่า แรงบิดที่เกิดขึ้นในตัวมอเตอร์ จะแปรผันตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Φ) และกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ จะได้ว่า

$$T_m(t) = K_m \Phi i_a(t) \dots\dots\dots(2-21)$$

แต่ความเข้มของสนามแม่เหล็กคงที่เพราะเกิดจากแม่เหล็กถาวร ดังนั้นสมการที่ (2-21) เขียนได้ใหม่เป็น

$$T_m(t) = K_i i_a(t) \quad \dots\dots\dots (2-22)$$

เมื่อ K_i คือ torque contance

จากวงจร ให้ $e_a(t)$ เป็นแรงดันที่ป้อนให้กับวงจร สามารถเขียนสมการในส่วนของไฟฟ้าได้ดังนี้

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad \dots\dots\dots (2-23)$$

back- emf ($e_b(t)$) แปรผันตามความเร็วรอบของโรเตอร์ จะได้ว่า

$$e_b(t) = K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt} = K_b \omega_m(t) \quad \dots\dots\dots (2-24)$$

และสมการที่เกิดขึ้นในส่วนของเมคานิกส์คือ

$$T_m(t) = J_m \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + T_L(t) + B_m \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad \dots\dots\dots (2-25)$$

เมื่อ $T_L(t)$ คือ load friction torque ซึ่งอยู่ในรูปของ coulomb friction

จากสมการข้างต้นเป็นสมการสถานะ ถ้าให้ตัวแปรสถานะของระบบคือ $i_a(t)$, $\omega_m(t)$ และ $\theta_m(t)$

จะสามารถจัดสมการได้คือ

$$\frac{di_a(t)}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{K_b}{L_a} \omega_m(t) + \frac{1}{L_a} e_a(t) \quad \dots\dots\dots (2-26)$$

$$\frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{K_i}{J_m} i_a(t) - \frac{B_m}{J_m} \omega_m(t) - \frac{1}{J_m} T_L(t) \quad \dots\dots\dots (2-27)$$

$$\frac{d\theta_m(t)}{dt} = \omega_m(t) \quad \dots\dots\dots (2-28)$$

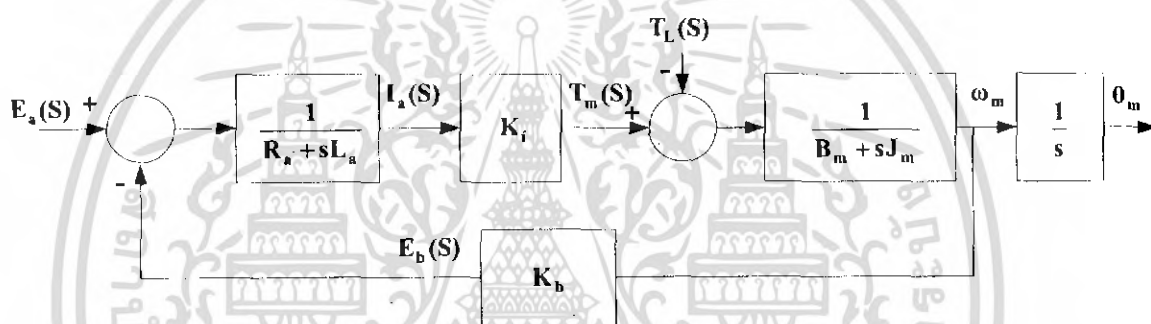
กำหนดให้อินพุทของระบบคือ $e_a(t)$ และ $T_L(t)$ ส่วนเอาต์พุทของระบบคือ $\omega_m(t)$ และ $\theta_m(t)$

จะสามารถจัดระบบให้อยู่ในรูปของปริภูมิสแตต(state-space description) ได้คือ

$$\begin{bmatrix} di_a(t)/dt \\ d\omega_m(t)/dt \\ d\theta_m(t)/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a/L_a & -K_b/L_a & 0 \\ K_i/J_m & -B_m/J_m & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ \omega_m(t) \\ \theta_m(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1/J_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a(t) \\ T_L(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \omega_m(t) \\ \theta_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ \omega_m(t) \\ \theta_m(t) \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (2-22) ถึงสมการที่ (2-25) แปลงลาปลาซแล้ว จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ คือ



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์

ให้ $\omega_m(S)$ เป็นเอาต์พุตจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือ ($T_L(t) = 0$)

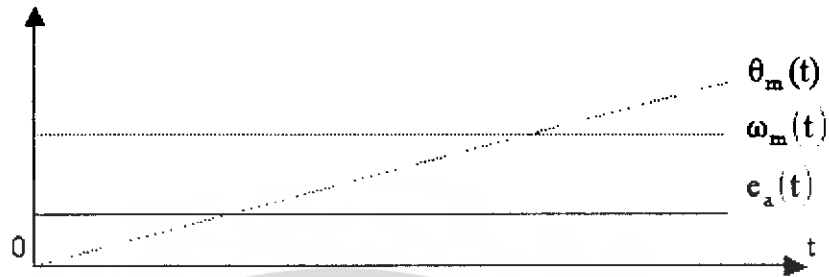
$$\frac{\omega_m(S)}{E_a(S)} = \frac{K_i}{L_a J_m s^2 + (R_a J_m + L_a B_m) s + (R_a B_m + K_b K_i)} \dots\dots\dots (2-29)$$

ถ้าให้ $\theta_m(S)$ เป็นเอาต์พุตจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือ

$$\frac{\theta_m(S)}{E_a(S)} = \frac{K_i}{L_a J_m s^3 + (R_a J_m + L_a B_m) s^2 + (R_a B_m + K_b K_i) s} \dots\dots\dots (2-30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากบล็อกไดอะแกรมจะเห็นว่า ดีไซน์มอเตอร์ มีการป้อนกลับภายในตัวของมันเอง แต่ในความเป็นจริงดีไซน์มอเตอร์เป็นระบบวงเปิด ถ้าให้ $e_a(t)$ เป็นอินพุตที่คงที่ จะทำให้ $\omega_m(t)$ คงที่ และ $\theta_m(t)$ เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น ดังแสดงได้ดังรูป

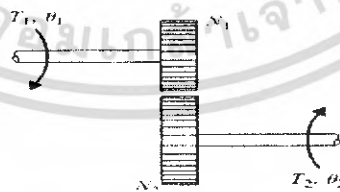


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์การกระจัดเชิงมุม, ความเร็วเชิงมุมและสัญญาณอินพุต

การควบคุมดีไซน์มอเตอร์แบบควบคุมมุม 0 ถ้าต่อแกนโรเตอร์ของมอเตอร์กับโหลดที่ต้องการหมุนโดยตรง แต่โหลดต้องการมุนน้อยๆ(เช่น 5 องศา) ซึ่งการบังคับให้ได้มุมที่ต้องการนั้น ทำได้ยากมาก เพราะตัวมอเตอร์ให้แรงบิดที่น้อยมาก ดังนั้นการนำดีไซน์มอเตอร์ไปใช้งานส่วนมากจะไม่ต่อกับโหลดโดยตรง จะมีตัวเกียร์บล็อกเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างโหลดกับดีไซน์มอเตอร์เพื่อเพิ่มแรงบิดให้มากขึ้น โดยให้ตัวดีไซน์มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบที่สูง แล้วใช้เกียร์บล็อกลดรอบลงมาให้เหมาะสมกับโหลดที่ต้องการหมุน เทำนี้ก็จะควบคุมให้โหลดทำมุมตามที่ต้องการได้

2.4.2 ระบบเกียร์

เกียร์เป็นระบบเมคานิกส์ที่ส่งผ่านพลังงานจากด้านหนึ่งของเกียร์ ไปยังอีกด้านหนึ่งของเกียร์ โดยมีแรง,แรงบิด,ความเร็วรอบและการการกระจัดที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างของระบบเกียร์ดังรูป



รูปที่ 2.9 ระบบเกียร์

จากรูปเป็นเกียร์ในอุดมคติ ซึ่งมีตัวแปรที่ใช้ในการอธิบายระบบคือ

- T_1 คือ แรงบิดที่เกิดขึ้นในเกียร์ตัวที่หนึ่ง N_1 คือ จำนวนฟันของเกียร์ตัวที่หนึ่ง
- T_2 คือ แรงบิดที่เกิดขึ้นในเกียร์ตัวที่สอง N_2 คือ จำนวนฟันของเกียร์ตัวที่สอง
- θ_1 คือ การกระจัดเชิงมุมของเกียร์ตัวที่หนึ่ง r_1 คือ รัศมีของเกียร์ตัวที่หนึ่ง
- θ_2 คือ การกระจัดเชิงมุมของเกียร์ตัวที่สอง r_2 คือ รัศมีของเกียร์ตัวที่สอง

เมื่อไม่คิดค่าแรงเฉื่อยและความฝืดที่เกิดขึ้นในระบบ จะได้ความสัมพันธ์คือ

1. จำนวนฟันของเกียร์จะแปรผันตามรัศมี และอัตราส่วนของจำนวนฟันกับรัศมีจะเท่ากันทุกเกียร์ นั่นคือ

$$\frac{N_1}{r_1} = \frac{N_2}{r_2} \quad \dots\dots\dots (2-31)$$

2. การกระจัดที่เกิดขึ้นที่ผิวของเกียร์แต่ละตัว ณ.จุดที่สัมผัสกันจะเท่ากัน นั่นคือ

$$\theta_1 r_1 = \theta_2 r_2 \quad \dots\dots\dots (2-32)$$

3. งานที่เกิดขึ้น โดยแรงบิดซึ่งจะแปรผันตามการกระจัดที่เกิดขึ้นที่ผิวของเกียร์แต่ละตัว ณ.จุดที่สัมผัสกัน จะเท่ากัน นั่นคือ

$$T_1 \theta_1 = T_2 \theta_2 \quad \dots\dots\dots (2-33)$$

ถ้ามีความเร็วและความเร่งเกิดขึ้นในระบบด้วย จะได้ความสัมพันธ์ของระบบทั้งหมดคือ

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad \dots\dots\dots (2-34)$$

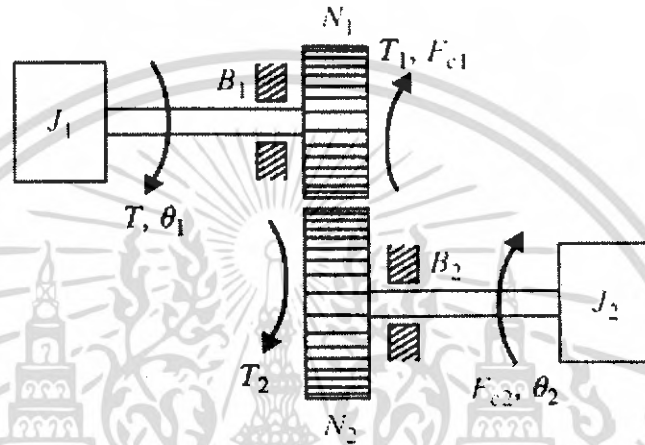
ในการนำเกียร์ไปใช้งาน ส่วนมากเป็นการนำไปเพิ่มแรงบิดและลดความเร็วรอบลง เช่น ถ้ามีแรงบิด(ซึ่งมีความเร็วเชิงมุมด้วย)และทราบว่ามีความเท่าไร แต่ต้องการให้มีค่าเพิ่มมากขึ้น จากสมการที่ (2-34)จะได้ว่า

62788

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

$$T_2 = \frac{N_1}{N_2} T_1 \text{ และ } \omega_2 = \frac{N_1}{N_2} \omega_1$$

ถ้ากำหนดให้ N_2 มากกว่า N_1 จะได้แรงบิดเพิ่มมากขึ้นตามต้องการแต่ความเร็วเชิงมุมลดลง ในความเป็นจริงแล้ว เกียร์แต่ละตัวจะมีค่าความเฉื่อยและความฝืดที่เกิดขึ้น ณ จุดที่สัมผัส แต่มักไม่นำมาคิด แต่ถ้าหากมีการคิดดังแสดงดังรูป



รูปที่ 2.10 ระบบเกียร์ที่รวมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

จากรูป ระบบเกียร์มีทั้ง viscous friction , coulomb friction และ ความเฉื่อย ถ้าให้ T คือแรงบิดที่จ่ายให้กับระบบ T_1 และ T_2 คือแรงบิดที่ถูกส่งผ่านโดยเกียร์ F_{c1} และ F_{c2} คือ coulomb friction coefficients B_1 และ B_2 คือ viscous friction coefficients สมการแรงบิดที่เกียร์ที่ 2 คือ

$$T_2(t) = J_2 \frac{d^2\theta_2(t)}{dt^2} + B_2 \frac{d\theta_2(t)}{dt} + F_{C2} \left(\frac{\omega_2}{|\omega_2|} \right) \tag{2-35}$$

สมการแรงบิดที่เกียร์ที่ 1 คือ

$$T(t) = J_1 \frac{d^2\theta_1(t)}{dt^2} + B_1 \frac{d\theta_1(t)}{dt} + F_{C1} \left(\frac{\omega_1}{|\omega_1|} \right) + T_1(t) \tag{2-36}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2-35) และสมการที่ (2-36) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_1(t)$ กับ $T_2(t)$ คือ

$$T_1(t) = \frac{N_1}{N_2} T_2(t) = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 J_2 \frac{d^2\theta_2(t)}{dt^2} + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 B_2 \frac{d\theta_2(t)}{dt} + \left(\frac{N_1}{N_2}\right) F_{C2} \left(\frac{\omega_2}{|\omega_2|}\right)$$

จะเห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่แรงเฉื่อย, แรงบิด, ความฝืด จะส่งผลกระทบต่อจากด้านหนึ่งของเกียร์ ไปยังอีกด้านหนึ่งของเกียร์ ถ้ามองที่ฝั่งเกียร์ 1 ค่าต่างๆที่อยู่ฝั่งเกียร์ 2 ที่เกียร์ 1 มองเห็นคือ

$$\text{แรงเฉื่อย : } \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 J_2$$

$$\text{Viscous friction coefficients : } \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 B_2$$

$$\text{coulomb friction coefficients : } \left(\frac{N_1}{N_2}\right) F_{C2} \left(\frac{\omega_2}{|\omega_2|}\right)$$

$$\text{แรงบิด : } \left(\frac{N_1}{N_2}\right) T_2$$

$$\text{การกระจัดเชิงมุม(Angular displacement) : } \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \theta_2$$

$$\text{ความเร็วเชิงมุม(Angular velocity) : } \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \omega_2$$

ถ้าอัตราส่วนของ $\frac{N_1}{N_2}$ น้อยกว่า 1 ทำให้ค่าที่เกียร์ 1 มองเห็นลดลง แต่ถ้ามากกว่า 1 ค่าที่เห็นจะมีค่ามากขึ้นเช่น โหลดที่ต้องการหมุน มีความเฉื่อย 0.05 oz-in.-sec² และ coulomb friction coefficients คือ 2 oz-in. ต้องการหาค่าความเฉื่อยและความฝืดเมื่อมองที่เกียร์ 1 (โหลดต่ออยู่กับเกียร์ 2) โดย

อัตราส่วนของ $\frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{5}$ จะได้

$$\text{แรงเฉื่อยคือ } \left(\frac{1}{5}\right)^2 * 0.05 = 0.002 \text{ oz - in. - sec}^2$$

$$\text{ความฝืดคือ } \left(\frac{1}{5}\right) * 2 = 0.4 \text{ oz - in.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติแล้ว ดีไซน์มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วรอบที่สูง จึงจำเป็นต้องลดรอบลงมาให้เหมาะสมในการนำไปใช้หมุนคนให้ได้มุมที่ต้องการ จากการคำนวณเวลามากสุดที่ลูกบอลใช้ในการเคลื่อนที่คือ 1.81 วินาที โดยคนต้องทำมุม 5 องศาที่เวลา $t=0$ แต่ในความเป็นจริง เป็นไปไม่ได้ที่จะให้เกิดมุม 5 องศาที่ $t=0$ แต่สามารถทำให้ไปถึง 5 องศาโดยใช้เวลาน้อยที่สุดได้ โดยการเลือกใช้ดีไซเนอร์ให้มีพิกัดต่างๆสูง และใช้อัตราการทดเกียร์ที่สูงเช่นกัน

2.5 ตัวควบคุม (Controller)

ตัวควบคุม เป็นส่วนประกอบหนึ่งในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งมีสัญญาณความผิดพลาดเป็นอินพุตและมีเอาต์พุตเป็นอินพุตให้กับระบบที่ต้องการควบคุม ส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการเลือกใช้ตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบควบคุมแบบป้อนกลับและวิธีการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม โดยที่ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม นิยมเรียกกฎการควบคุม (control Law) โดยจะมี 3 รูปแบบ คือ

1. Proportional Control (P)
2. Integral Control (I)
3. Derivative Control (D)

ในระบบบางประเภท มีความจำเป็นที่ต้องปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ส่วนประกอบอื่นเพิ่มเติมเข้ากับระบบควบคุม การที่ปรับเปลี่ยนสมรรถนะของระบบควบคุมป้อนกลับแบบนี้เรียกว่า การชดเชย (compensation)

2.5.1 ระบบควบคุมแบบ P (Proportional Control)

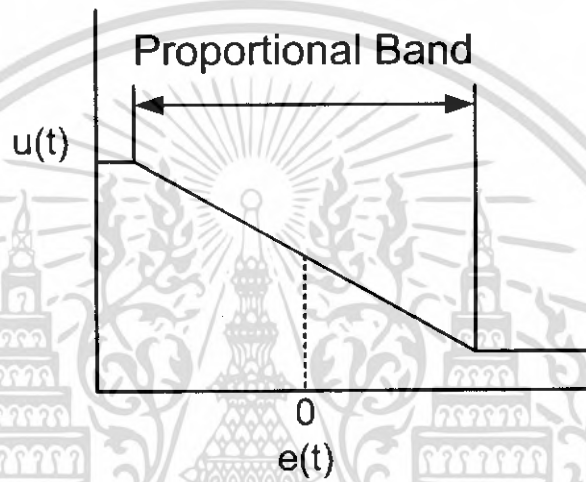
ในระบบควบคุมแบบ P เอาต์พุตของตัวควบคุม $u(t)$ จะเป็นสัดส่วนกับอินพุตของตัวควบคุม และถ้ากำหนดสัญญาณอินพุตให้กับตัวควบคุมเป็น ค่าความผิดพลาด $e(t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา จะได้ว่า

$$u(t) = K_p e(t) \quad \dots\dots\dots(2-37)$$

เมื่อ K_p เป็นค่าคงที่เรียกว่า อัตราขยายแบบสัดส่วน (proportional gain) จะพบว่าเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมแบบ P เป็นสัดส่วน โดยตรงกับขนาดของความผิดพลาดที่กำลังพิจารณา ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม $G_c(s)$ มีค่าเป็น

$$G_c(s) = K_p \dots\dots\dots(2-38)$$

ดังนั้นการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบนี้ จะเป็นเพียงการขยายสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น การที่ได้สัญญาณความผิดพลาดขนาดใหญ่ที่เวลาหนึ่ง ทำให้เกิดเอาต์พุตที่มีขนาดใหญ่จากตัวควบคุม ในเวลานั้น อย่างไรก็ตาม การที่ให้อัตราขยายคงที่นั้นในทางปฏิบัติอาจกำหนดไว้ในบางช่วงของ สัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น หรืออาจกำหนดให้ตัวควบคุมมีค่าเอาต์พุตไม่น้อยกว่าค่าหนึ่งและไม่ มากเกินกว่าค่าหนึ่งก็ได้ ซึ่งการกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุตจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.11 และการ กำหนดเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ P ช่วงที่มีการกำหนดสัดส่วนนี้ จะเรียกว่า proportional band.

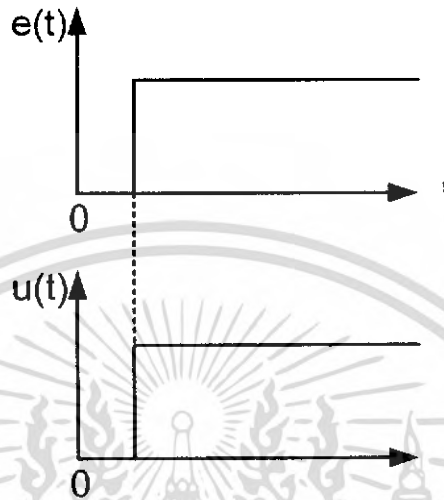


รูปที่ 2.11 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต

การกำหนด proportional band นี้ จะช่วยให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าจำกัดไม่ไปสู่ค่าอนันต์ ทั้ง ทางด้านบวกและทางด้านลบ และเมื่อตัวควบคุมมีเอาต์พุตสูงที่สุดที่เป็นไปได้ค่าหนึ่ง ก็นิยมที่จะ กำหนดเอาต์พุตค่าใด ๆ เป็นร้อยละของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตของตัว ควบคุม 100% ก็หมายถึงว่าเอาต์พุตจะเปลี่ยนจากค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ ไปเป็นค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ซึ่ง จะได้ว่า

$$K_p = \frac{100}{\text{proportional band}} \dots\dots\dots(2-39)$$

เนื่องจากเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอินพุต ดังนั้นถ้าหากอินพุตมีลักษณะเป็น unit step เอาต์พุตที่ได้ก็จะมีลักษณะเป็น step เช่นกัน โดยลักษณะของกราฟแสดงอินพุตและเอาต์พุตจะมีสัดส่วนที่แน่นอนค่าหนึ่ง ตามรูปที่ 2.12 โดยรูปนี้แสดงถึงการตอบสนองของตัวควบคุม เมื่ออินพุตอยู่ในช่วง proportional band

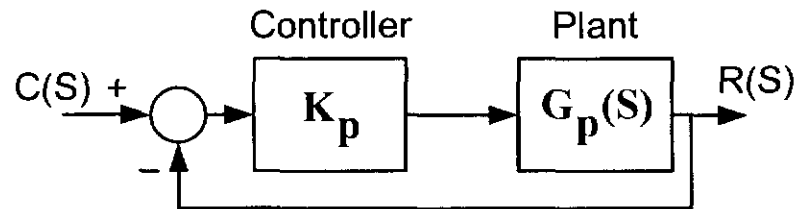


รูปที่ 2.12 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ P

ในทางปฏิบัติตัวควบคุมแบบ P นี้มีลักษณะเหมือนกับเครื่องขยายสัญญาณรูปแบบหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นในลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออาจจะเป็นเครื่องขยายสัญญาณเชิงกลเช่นคานาก็ได้ ลักษณะของระบบที่มีตัวควบคุมแบบ P มีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 2.13 และได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบวงเปิดเป็น

$$G_o(s) = K_p G_p(s) \quad \dots\dots\dots(2-40)$$

เมื่อ $G_p(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่ต้องการควบคุม



รูปที่ 2.13 ระบบควบคุมแบบ P

ข้อเสียของระบบที่มีตัวควบคุมแบบ P คือไม่มีการเพิ่มเทอม $\frac{1}{s}$ ในส่วน forward path ซึ่งหมายความว่า ถ้าระบบเป็นชนิด (type) 0 ตัวควบคุมจะไม่เปลี่ยนแปลงชนิด ทำให้ระบบเป็นชนิด 0 เหมือนเดิม และทำให้เกิดความผิดพลาดที่สภาพคงตัว เนื่องจากตัวควบคุมไม่ได้ทำการเพิ่มโพล (pole) หรือซีโร (zero) ใหม่ให้กับระบบ เพียงแต่เปลี่ยนตำแหน่งของโพลหรือซีโรเท่านั้น เนื่องจากระบบควบคุมแบบป้อนกลับหนึ่งหน่วย มีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเป็น

$$G(s) = \frac{K_p G_p(s)}{1 + K_p G_p(s)} \quad \dots\dots\dots(2-41)$$

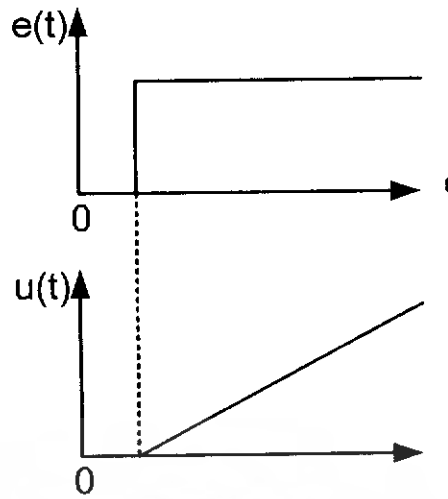
สมการคุณลักษณะเป็น $(1 + K_p G_p(s))$ และมีรากเปลี่ยนไปตามค่าของ K_p

2.5.2 ระบบควบคุมแบบ I (Integral Control)

ในระบบควบคุมแบบ I เอาท์พุทของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับสัญญาณของผิดพลาดที่เทียบกับเวลา หรือ

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad \dots\dots\dots(2.42)$$

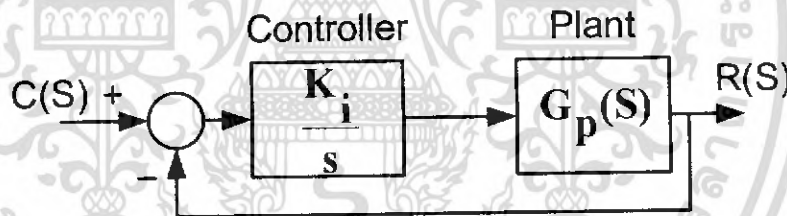
เมื่อ K_i เป็นค่าคงที่เรียกว่า integral gain ซึ่งจะมีหน่วยเป็น $1/\text{sec}$ รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการตอบสนองของระบบควบคุมแบบ I เมื่อได้รับสัญญาณอินพุทแบบ unit step ค่าระหว่างเวลา t และ 0 หมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณอินพุทจากเวลา 0 ถึง t ดังนั้นเนื่องจากระบบเริ่มการมีสัญญาณอินพุทแบบ unit step เอาท์พุทที่ออกจากตัวควบคุมมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆด้วยอัตราที่คงที่ ทำให้เอาท์พุทที่เวลาใดๆจะเป็นสัดส่วนกับอินพุทที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.14 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ I

ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ I เป็น

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \tag{2-43}$$



รูปที่ 2.15 ระบบควบคุมแบบ I

ดังนั้นสำหรับระบบที่แสดงในรูปที่ 2-15 การควบคุมแบบ I จะให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของ forward-path เป็น $\frac{K_i}{s} G_p(s)$ และทำให้มีฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็นดังนั้นสามารถพิจารณาถึงข้อได้เปรียบของการควบคุมแบบ I ได้จากสมการ 2-43 ซึ่งจะเห็นว่าระบบควบคุมแบบ I จะเพิ่มจำนวนโพลให้กับระบบควบคุมและเพิ่มชนิดของระบบ จากชนิด 0 เป็น ชนิด 1 ซึ่งทำให้ระบบมีความผิดพลาดที่สถานะคงตัวเป็นศูนย์เทียบต่อ step input อย่างไรก็ตามการเพิ่มโพลที่ $s=0$ และไม่มีการเพิ่มซีโรให้กับระบบควบคุม ทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล (n) และจำนวนซีโร(m) เพิ่มขึ้นอีก 1 ซึ่งมีผลให้

asymptote angles ของทางเดินรากสลดลงและจุดตัดเคลื่อนไปทางครึ่งขวาของ s-plane มากขึ้น มีผลทำให้ความเสถียรสัมพัทธ์ของระบบลดลง

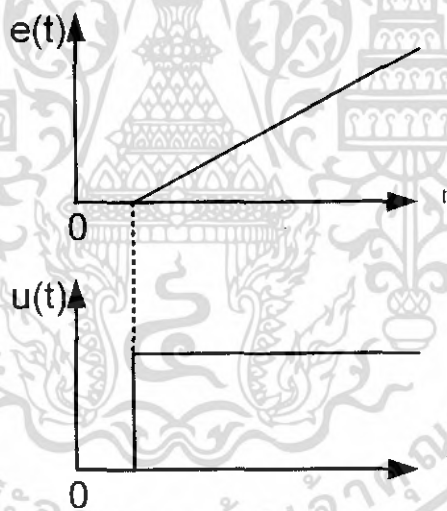
$$\text{Asymptote angle} = \pm \frac{\pi}{n - m}, \frac{3\pi}{n - m}, \dots \dots \dots (2-44)$$

2.5.3 ระบบควบคุมแบบ D (Derivative Control)

ระบบควบคุมแบบ D นี้เอาที่พู่จะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาดเทียบกับ
 ต่อเวลา นั่นคือ

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \dots \dots \dots (2-45)$$

เมื่อ K_d คือ Derivative gain และมีหน่วยเป็นวินาที



รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองของระบบ ควบคุมแบบ D

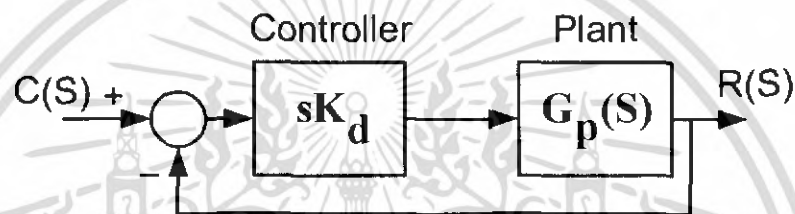
รูปที่ 2.16 แสดงสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณแบบ ramp เมื่อได้รับสัญญาณอินพุตและไม่ใช่ค่าของความผิดพลาดซึ่งทำให้ได้สัญญาณส่งออกจกตัวควบคุมมีค่ามาก่อนที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นมากจริงๆ อย่างไรก็ตามหากความผิดพลาดมีค่าคงที่ก็จะไม่มีการสะสมค่าความ

ผิดพลาดแม้ว่าค่าความผิดพลาดจะมีมากก็ตาม ทำให้การควบคุมแบบ D นี้ไม่เปลี่ยนแปลงต่อค่าความผิดพลาดที่คงที่หรือเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ซึ่งผลที่ตามมาของการควบคุมแบบนี้จะไม่ใช้เพียงตัวเดียว แต่มักจะใช้ควบรวมกับการควบคุมแบบอื่น ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ D จะเป็น

$$G_c(s) = sK_d \quad \text{.....(2-46)}$$

ดังนั้นสำหรับระบบควบคุม D จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G_o(s) = \frac{sK_d G_p(s)}{1 + sK_d G_p(s)} \quad \text{.....(2-47)}$$



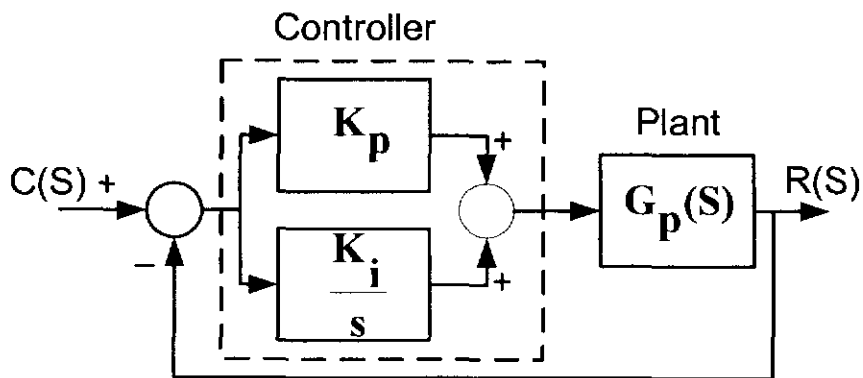
รูปที่ 2.17 ระบบควบคุมแบบ D

ถ้าหากว่าระบบเป็นแบบชนิด 1 หรือสูงกว่า การควบคุมแบบ D จะลด S ในเทอมส่วนลงและลดชนิดของระบบลง 1 อย่างไรก็ตามได้กล่าวก่อนหน้านี้แล้วว่า การควบคุมแบบ D นี้จะไม่ใช้เพียงลำพังแต่จะใช้ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น เพราะเมื่อใช้การควบคุมแบบ D ทำให้เพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

2.5.4 ระบบควบคุมแบบ PI (Proportional plus Integral Control)

การที่ระบบควบคุมมีความเสถียรสัมพัทธ์ลดลง เมื่อใช้การควบคุมแบบ I สามารถที่จะแก้ไขได้ในระดับหนึ่ง โดยการใช้การควบคุมแบบ P ร่วมกับแบบ I ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมเป็นตามรูปที่

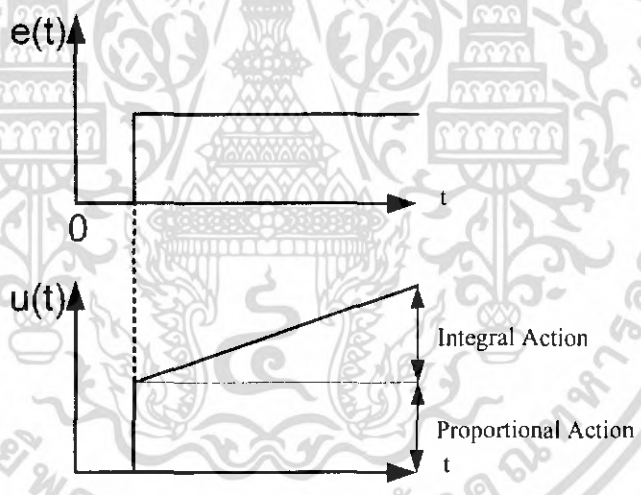
2.18



รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ PI

สำหรับระบบดังกล่าวจะมีเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็น

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad \dots\dots\dots(2-48)$$



รูปที่ 2.19 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PI

รูปที่ 2.19 แสดงเอาต์พุตของตัวควบคุมที่ได้รับเมื่อมีอินพุตเป็นแบบ unit step ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ PI เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 G_o(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} \\
 &\approx \frac{sK_p + K_i}{s} \quad \dots\dots\dots(2-49) \\
 &\approx K_p \frac{(s + K_i/K_p)}{s}
 \end{aligned}$$

ให้ Integral time constant เป็น

$$\tau_i = \frac{K_p}{K_i} \quad \dots\dots\dots(2-50)$$

ดังนั้นจะได้

$$G_c(s) = \frac{K_p [s + (1/\tau_i)]}{s} \quad \dots\dots\dots(2-51)$$

และจะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น

$$\begin{aligned}
 G_o(s) &= G_c(s)G_p(s) \quad \dots\dots\dots(2-52) \\
 &= \frac{K_p [s + (1/\tau_i)]G_p(s)}{s}
 \end{aligned}$$

จะเห็นว่า มีขั้วที่ $s = -1/\tau_i$ และ โพลที่ $s = 0$ เพิ่มให้กับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อใช้การควบคุมแบบ PI การที่เพิ่มตัวประกอบ s เข้ากับเทอมส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอน จะเสมือนกับเพิ่มชนิดของระบบขึ้นไปอีก 1 จึงทำให้ระบบนี้ไม่มีความผิดพลาดที่สภาพคงตัวสำหรับอินพุทแบบ unit step นอกจากนั้น การที่เพิ่มขั้วให้กับระบบไปพร้อม ๆ กัน ก็ทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล n และจำนวนขั้ว m มีค่าคงที่ ดังนั้นมุมของ asymptote สำหรับทางเดินของรากมีค่าคงเดิม เพราะอย่างไรก็ตาม จุดตัดของเส้น asymptotes บนแกนจริง จะเคลื่อนที่เข้าหาจุดกำเนิดมากขึ้น ส่งผลให้ความเสถียรภาพของระบบลดลง

การเพิ่มโพลที่ $s=0$ และซีโรที่ $s=-1/\tau_i$ ทำให้จุดเปลี่ยนไปเท่ากับ $\pm(1/\tau_i)/(n-m)$ ซึ่งทำให้มีค่าเป็นบวกมากขึ้น และจุดตัดจะเคลื่อนที่มาทางขวามือเข้าใกล้จุดกำเนิดมากขึ้น อย่างไรก็ตามการลดลงของความเสถียรสัมพันธ์นี้จะน้อยกว่าการที่ใช้การควบคุมแบบ I เพียงอย่างเดียว ค่าของ K_p และ K_i จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดตำแหน่งของซีโรและโพลของระบบ โดยตำแหน่งของซีโรกำหนดด้วยค่า K_p ในขณะที่ K_i จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดโพลของระบบวงปิด

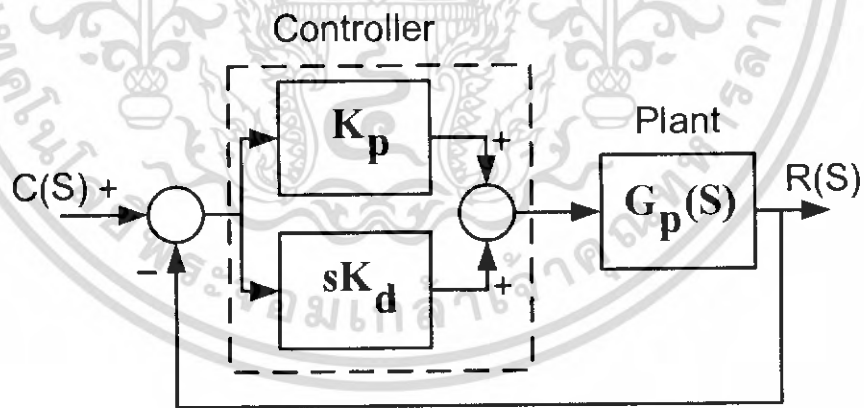
2.5.5 ระบบควบคุมแบบ PD (Proportional plus Derivative Control)

ถ้าการควบคุมแบบ D ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบ P ดังที่แสดงในรูปที่ 2-20 ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบวงเปิดเป็น

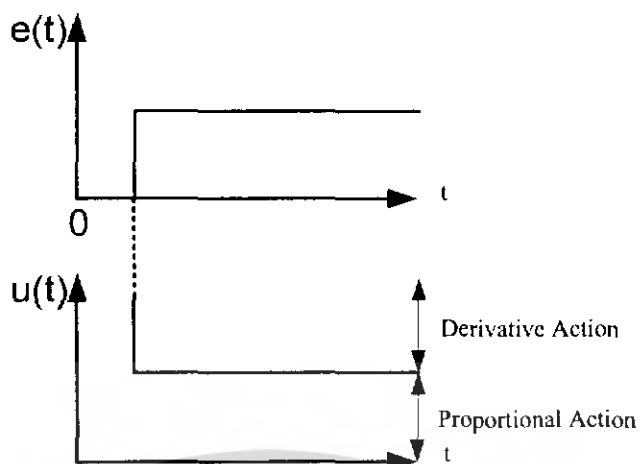
$$G_o(s) = (K_p + sK_d)G_p(s) \tag{2-53}$$

$$G_o(s) = K_p(1 + \tau_d s)G_p(s)$$

เมื่อ $\tau_d = \frac{K_p}{K_d}$ คือ derivative time constant ซึ่งในการควบคุมแบบนี้ จะมีซีโรเพิ่มขึ้นที่ $s = -\frac{1}{\tau_d}$ และจะเห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของระบบ ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว

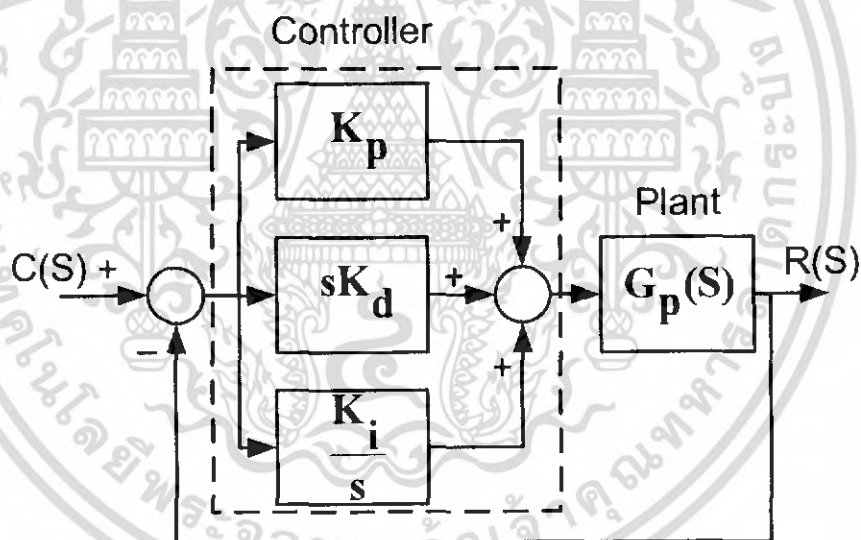


รูปที่ 2.20 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ PD



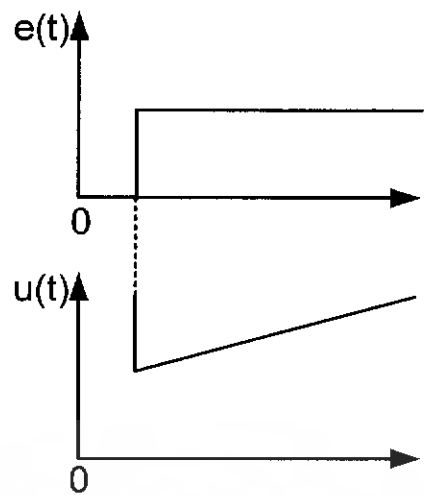
รูปที่ 2.21 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PD

2.5.6 ระบบควบคุมแบบ PID (Proportional plus Derivative plus Integral Control)



รูปที่ 2.22 บล็อก ไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบ PID

การควบคุมโดยใช้แบบ P ร่วมกับแบบ I และร่วมกับแบบ D หรือ ที่เรียก การควบคุมแบบ 3 เทอม (three-term control) ระบบจะมีลักษณะตามรูปที่ 2-22 ทำให้เอาที่พหุของตัวควบคุมเมื่อรับอินพุต เป็นความผิดพลาด $e(t)$ ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad \dots\dots\dots(2-54)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม จะเป็น

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d \quad \dots\dots\dots(2-55)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปได้เป็น

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad \dots\dots\dots(2-56)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบแบบเปิดของระบบควบคุมแบบ PID ที่แสดงในรูปที่ 2.22 จะเป็น

$$G_o(s) = \frac{K_p (\tau_i s + 1 + \tau_i \tau_d s^2) G_p(s)}{\tau_i s} \quad \dots\dots\dots(2-57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ระบบควบคุมวงเปิดของการควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน

จากสมการที่ (2-29) และ (2-30) จะเห็นว่า มีตัวแปรที่กำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวขับเคลื่อนอยู่ที่ 6 ตัวแปรคือ

L_a มีหน่วยเป็น H

R_a มีหน่วยเป็น Ω

J_m มีหน่วยเป็น Kg-m^2 (SI) oz-in.-sec² (British)

B_m มีหน่วยเป็น $\text{Kg-m}^2\text{-sec}$ (SI) lb-ft-sec (British)

K_b มีหน่วยเป็น V / rad / sec (SI) V / rad / sec (British)

K_i มีหน่วยเป็น N.m / A (SI) oz-in. / A (British)

สมมติให้ ตัวแปรแต่ละตัวมีค่าดังนี้ (อ้างอิงจากหนังสือ Automatic Control Systems ของ Bebjamin C. Kuo and Farid Golnaraghi ,Edition 8)

$$L_a = 560 \mu\text{H}$$

$$R_a = 1.35 \Omega$$

$$J_m = 0.0019 \text{ Kg-m}^2$$

$$B_m = 0.00079 \text{ Kg-m}^2\text{-sec}$$

$$K_b = 0.1 \text{ V / rad / sec}$$

$$K_i = 0.1 \text{ N.m / A}$$

จากสมการที่ (2-29) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$\frac{\omega_m(s)}{E_a(s)} = \frac{0.1}{1.064 * 10^{-6} s^2 + 756.44 * 10^{-6} s + 11.07 * 10^{-3}}$$

$$\frac{\omega_m(s)}{E_a(s)} = \frac{94 * 10^3}{s^2 + 711s + 10.4 * 10^3} \dots\dots\dots(2-58)$$

ซึ่งมี pole ที่

$$s_1 = - 14.941 \text{ rad / s}$$

$$s_2 = - 696.058 \text{ rad / s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

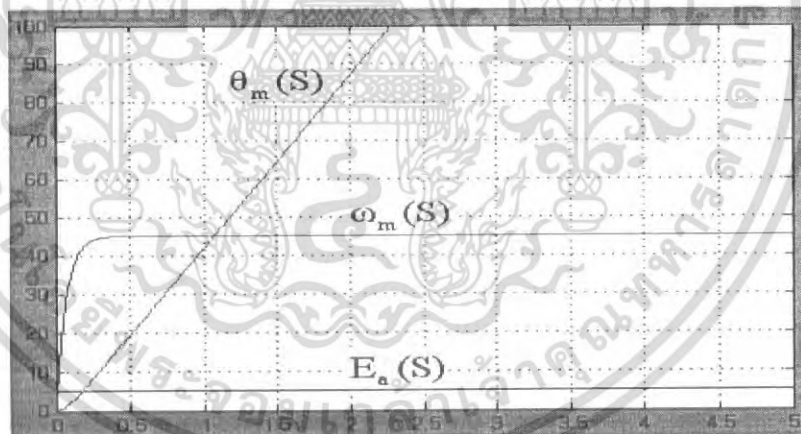
จะเห็นว่าโพลทั้งสองเป็นค่าจริงลบ(โพลอยู่บนแกนจริง) และจากสมการที่ (2-29)จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

$$\frac{\theta_m(S)}{E_a(S)} = \frac{94 \cdot 10^3}{s^3 + 711s^2 + 10.4 \cdot 10^3 s} \quad \dots\dots\dots (2-59)$$

เนื่องจากดีซีมอเตอร์โดยตัวมันเองจะเป็นระบบวงเปิด จากสมการที่ (2-30) ถ้าจัดให้อยู่ในรูปของบล็อกไดอะแกรมและให้ $E_a(S)$ เป็น unit step (สมมติว่าเป็นมุม 5 องศาที่ต้องให้มอเตอร์ทำมุม) แล้วทำการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB จะได้ความสัมพันธ์ ระหว่าง $E_a(S)$, $\omega_m(S)$ และ $\theta_m(S)$ คือ



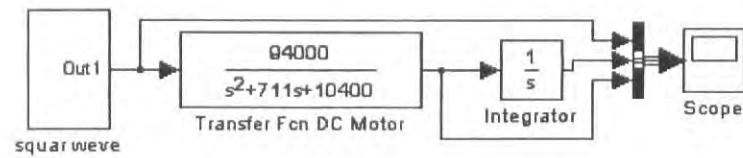
รูปที่ 2.24 บล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์ที่ได้จากสมการที่(2-30)



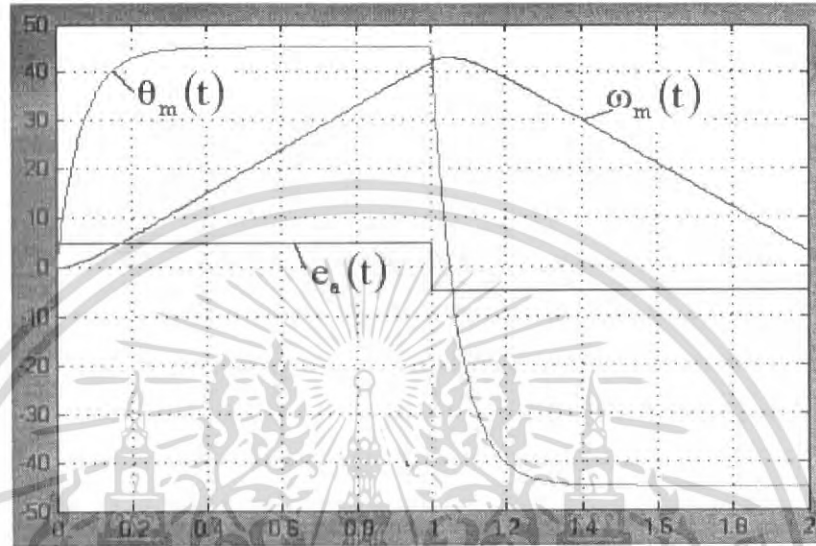
รูปที่ 2.25 ผลตอบสนองของดีซีมอเตอร์แบบวงเปิด

แต่ในการควบคุมมุมของคาน $e_a(t)$ จะต้องเป็น square wave จะได้ผลตอบสนองคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

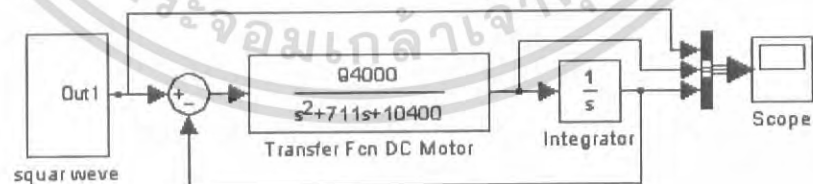


รูปที่ 2.26 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของมอเตอร์ที่มีอินพุทเป็น square wave



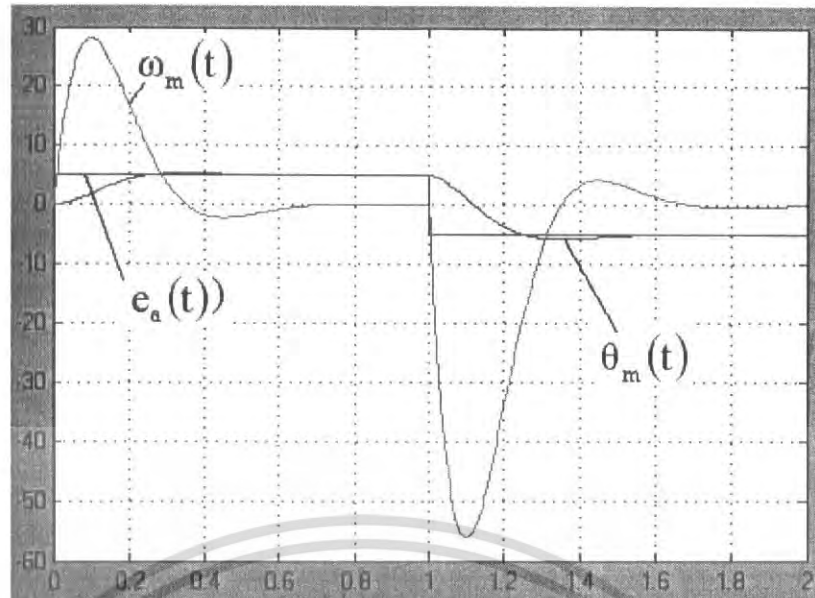
รูปที่ 2.27 ผลตอบสนองของมอเตอร์ที่มีอินพุทเป็น square wave

ผลตอบสนองของมอเตอร์ในระบบวงเปิด ไม่สามารถควบคุมค่าได้ ดูจาก $\theta_m(t)$ จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น แต่ข้างต้นกำหนดว่ามุมของคานต้องขึ้นไปทีค่าใดค่าหนึ่งโดยทันทีทันใด ถ้าทำให้ระบบมีการป้อนกลับ โดยให้ $\theta_m(t)$ เป็นตัวป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับอินพุท จะได้ผลตอบสนองคือ



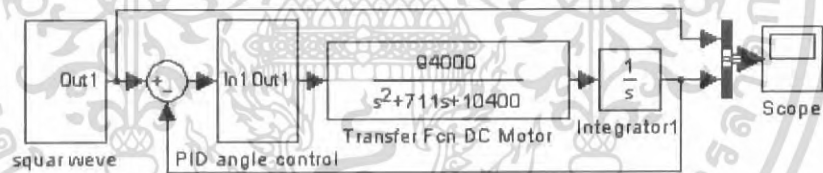
รูปที่ 2.28 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของมอเตอร์ที่มีอินพุทเป็น square wave(2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



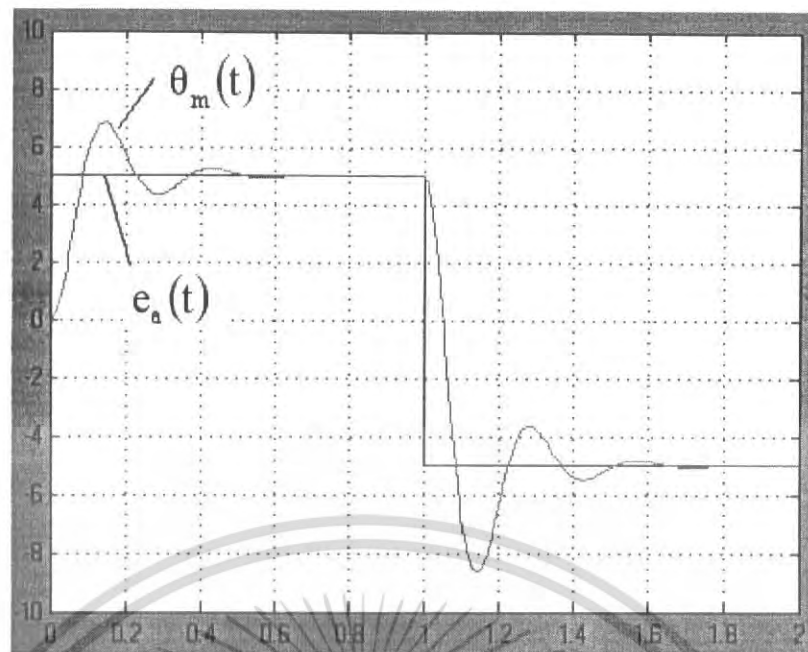
รูปที่ 2.29 ผลตอบสนองของดีซีมอเตอร์ที่มีอินพุตเป็น square wave(2)

จะเห็นว่าเกิดการไต่ ขึ้นของมุม $\theta_m(t)$ และไม่หยุดอยู่ที่ตำแหน่งที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องมีตัวควบคุมมาควบคุมให้ผลตอบสนองดีที่สุด โดยเลือกตัวควบคุมแบบ PID มาใช้และทำการปรับค่าต่างๆ ได้ผลการตอบสนองคือ (เปรียบเทียบเฉพาะอินพุต $e_a(t)$ และเอาท์พุท $\theta_m(t)$)

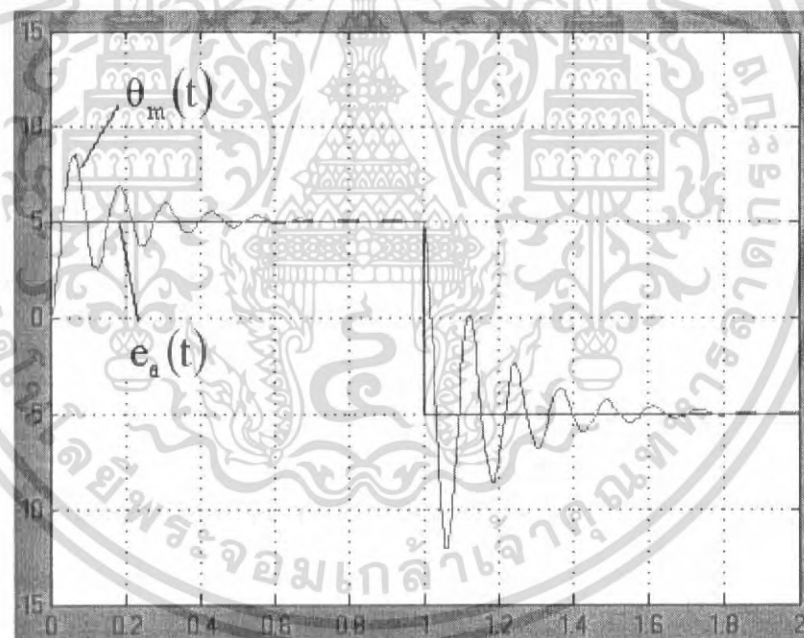


รูปที่ 2.30 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของดีซีมอเตอร์ที่มีตัวควบคุม PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

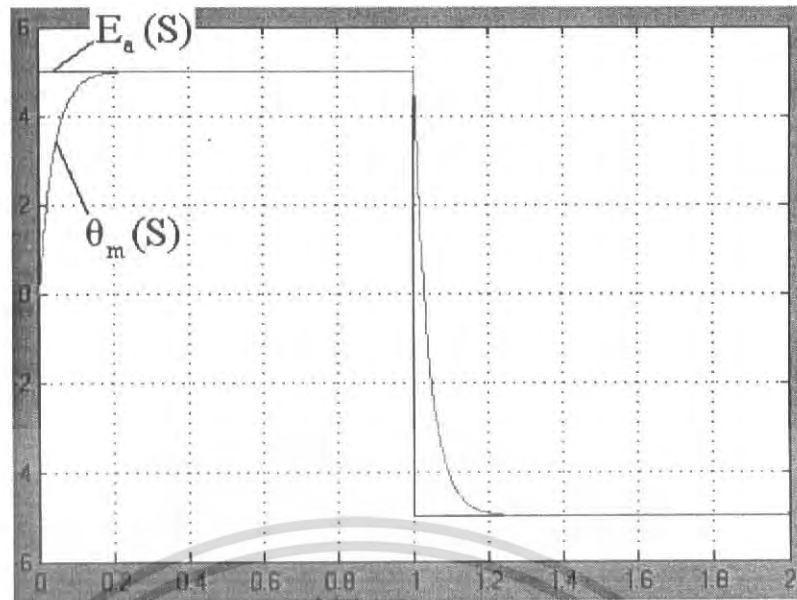


รูปที่ 2.31 ผลตอบสนองของคิซิมอเตอร์ที่มีตัวควบคุม $P=4, I=0, D=0$

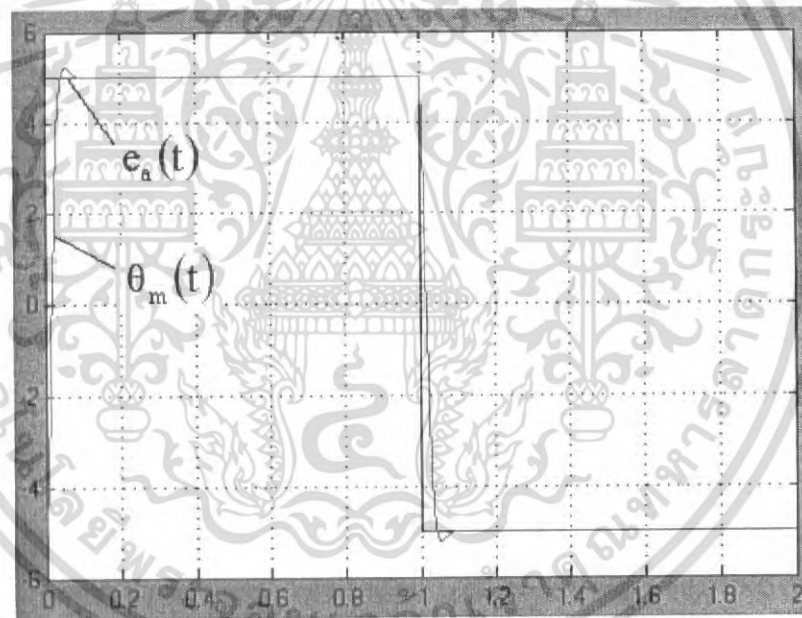


รูปที่ 2.32 ผลตอบสนองของคิซิมอเตอร์ที่มีตัวควบคุม $P=20, I=0, D=0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 ผลตอบสนองของดีซีมอเตอร์ที่มีตัวควบคุม $P=20, I=0, D=2$

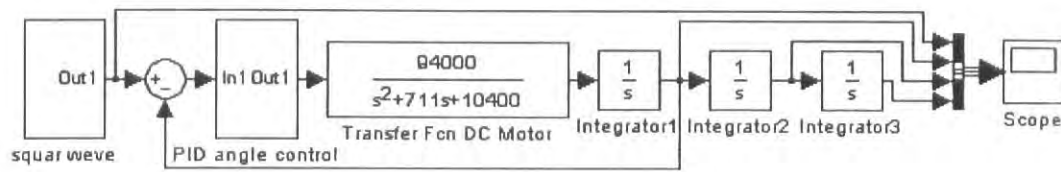


รูปที่ 2.34 ผลตอบสนองของดีซีมอเตอร์ที่มีตัวควบคุม $P=50, I=0, D=1$

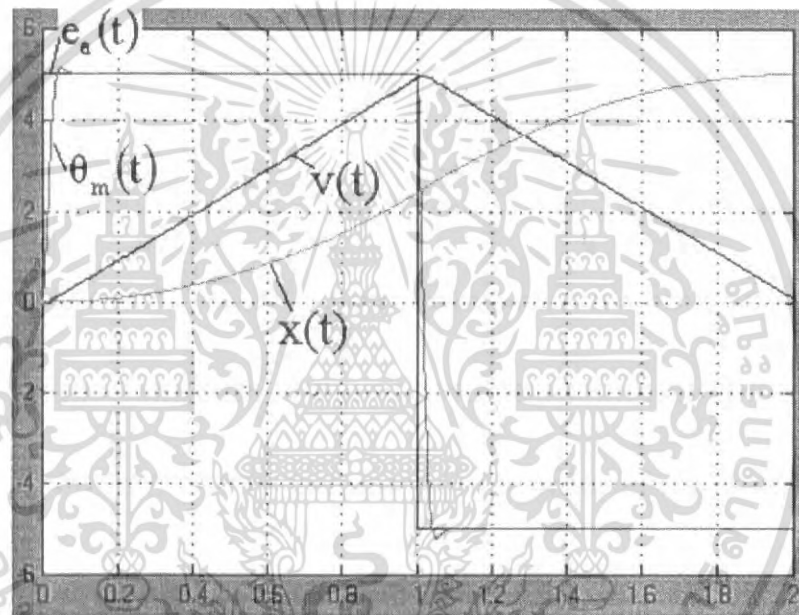
จะเห็นว่าสามารถควบคุมให้ $\theta_m(t)$ ของดีซีมอเตอร์ ไปหยุดที่ตำแหน่งที่ต้องการได้และสัญญาณ $\theta_m(t)$ นี้ จะไปเป็นตัวกำหนดความแรงเชิงเส้นให้กับลูกบอล ดังนั้นเมื่อนำ $\theta_m(t)$ นี้ ไปเป็นอินพุตให้กับ บล็อกไดอะแกรมที่ได้จากสมการที่ (2-16) และสมการที่(2-17) แล้วทำการเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุท $e_a(t)$, มุมของมอเตอร์ $\theta_m(t)$, ความเร็ว $v(t)$, และการกระจัด $x(t)$ จะได้ผลตอบสนองคือ (เลือกค่า PID เท่ากับ 50-0-0.8 ตามลำดับ)



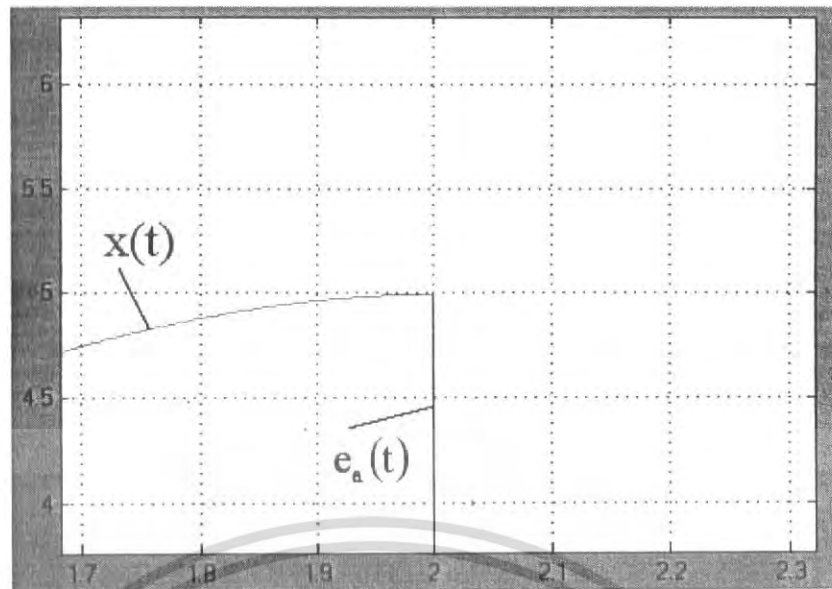
รูปที่ 2.35 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้นซึ่งมีอินพุทเป็นมุมของดีซีมอเตอร์



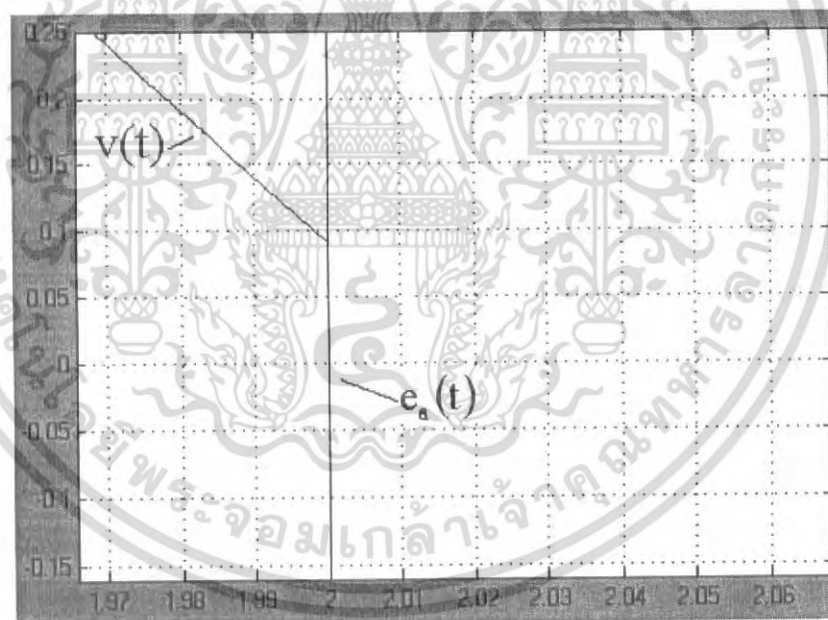
รูปที่ 2.36 ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้นซึ่งมีอินพุทเป็นมุมของดีซีมอเตอร์

เมื่อขยายดูใกล้ๆ พบว่า ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีน้อยมาก จนประมาณได้ว่าไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.37 รูปขยายระยะการเคลื่อนที่ของระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้น ซึ่งมีอินพุตเป็นมุมของดีซีมอเตอร์ และเมื่อขยายดูที่ความเร็วพบว่า มีค่าไม่เท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.38 รูปขยายความเร็วของระบบการเคลื่อนที่เชิงเส้น ซึ่งมีอินพุตเป็นมุมของดีซีมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมให้ลูกบอลไปหยุดที่จุดใดบนคานก็ได้ แต่จะเกิดความผิดพลาดขึ้น เพราะขณะที่สัญญาณอินพุทหมดไปแล้ว แต่ลูกบอลยังมีความเร็วอยู่ จึงทำให้ลูกบอลยังสามารถเคลื่อนที่ไปได้และจะหยุดเมื่อความเร็วหมดไป

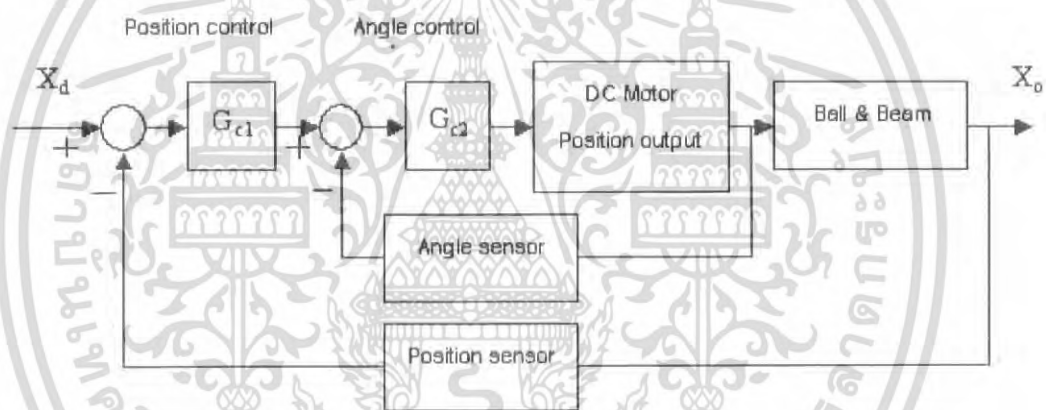
2.7 ระบบควบคุมวงปิดของการควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน

จากการควบคุมข้างต้นพบว่า การควบคุมแบบนี้มีความยุ่งยากมากคือ

1. ต้องรู้ตำแหน่งปัจจุบันและตำแหน่งที่ต้องการให้ไปหยุด เพื่อไปเป็นตัวกำหนดลักษณะของสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม ที่ไปเป็นอินพุทให้กับระบบ

2. วงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณให้ได้ขนาดและคาบเวลาตามที่กำหนด มีความซับซ้อนมาก อีกทั้งต้องให้สัญญาณออกมาเพียง 1 ลูกคลื่นเท่านั้น การสร้างวงจรจะทำได้ยากมาก

ดังนั้น หากเรามีเซนเซอร์ที่สามารถบอกตำแหน่งของลูกบอลบนคาน และตำแหน่งมุมของคานได้แม่นยำแล้ว ทำการต่อระบบให้เป็นระบบวงปิดที่สมบูรณ์ คือ



รูปที่ 2.39 บล็อกไดอะแกรมของระบบวงปิดที่สมบูรณ์

จากฟังก์ชันถ่ายโอนและบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์ สมมติว่า ค่า L_a และ B_m มีค่าน้อยมาก จึงไม่น่ามาคิด กำหนดค่าต่างๆที่เหลือดังนี้ (โดยมีเกียร์บล็อกต่อร่วมด้วย)

$$R_a = 1.62 \Omega$$

$$J_T = J_m + J_L = 0.0067 \text{ oz-in.} \cdot \text{s}^2$$

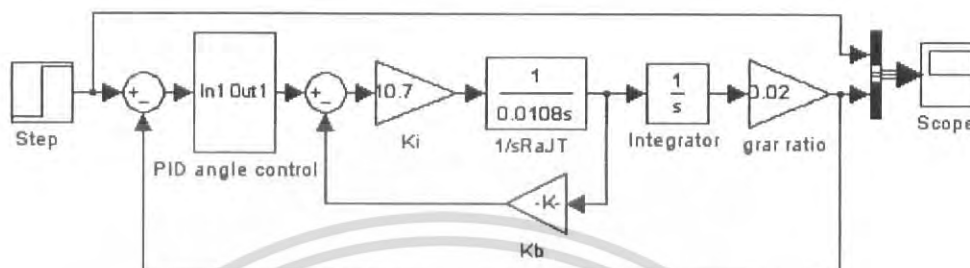
$$K_t = 10.7 \text{ oz-in./A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_b = 0.0754 \text{ V/rad/s}$$

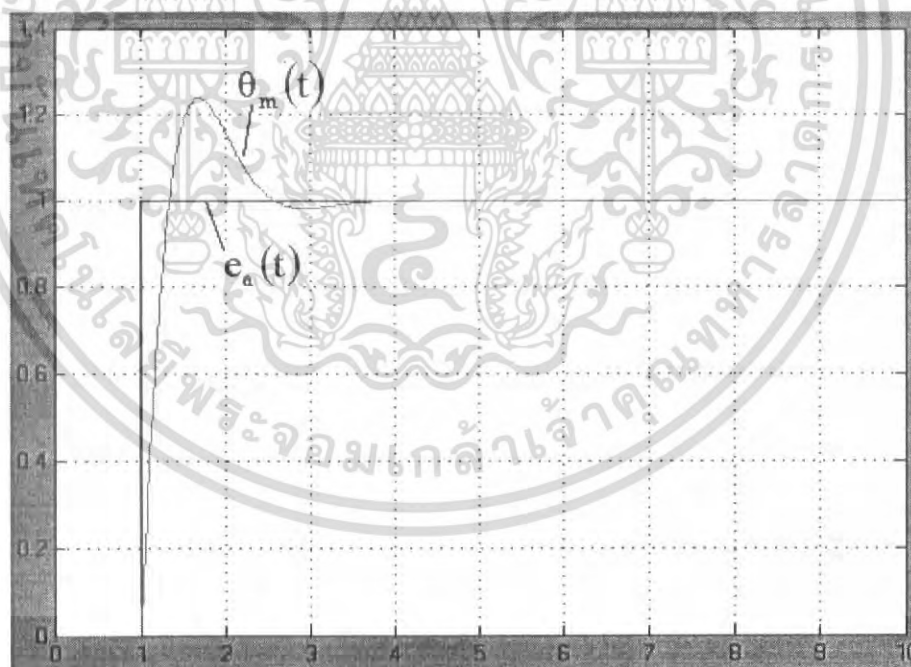
$$N = 50$$

แทนค่าลงในบล็อกโคแอมของดีซีมอเตอร์ ทำการป้อนกลับแบบ unity feedback ใส่ตัวควบคุมแบบ PID จะสามารถเขียนเป็น simulink model ได้คือ



รูปที่ 2.40 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของดีซีมอเตอร์ที่มีอินพุทเป็น unit step

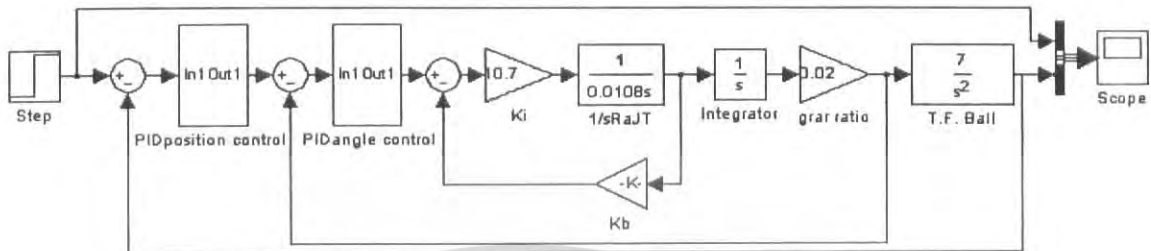
เอาที่พุทของระบบนี้คือมุม θ โดยมีอินพุทเป็นมุม θ ที่เป็น unit step สมมติต้องการให้ดีซีมอเตอร์ทำมุม 5 องศา ทำการปรับค่า PID จนผลเป็นที่น่าพอใจคือ



รูปที่ 2.41 ผลตอบสนองของดีซีมอเตอร์ที่มีอินพุทเป็น unitstep

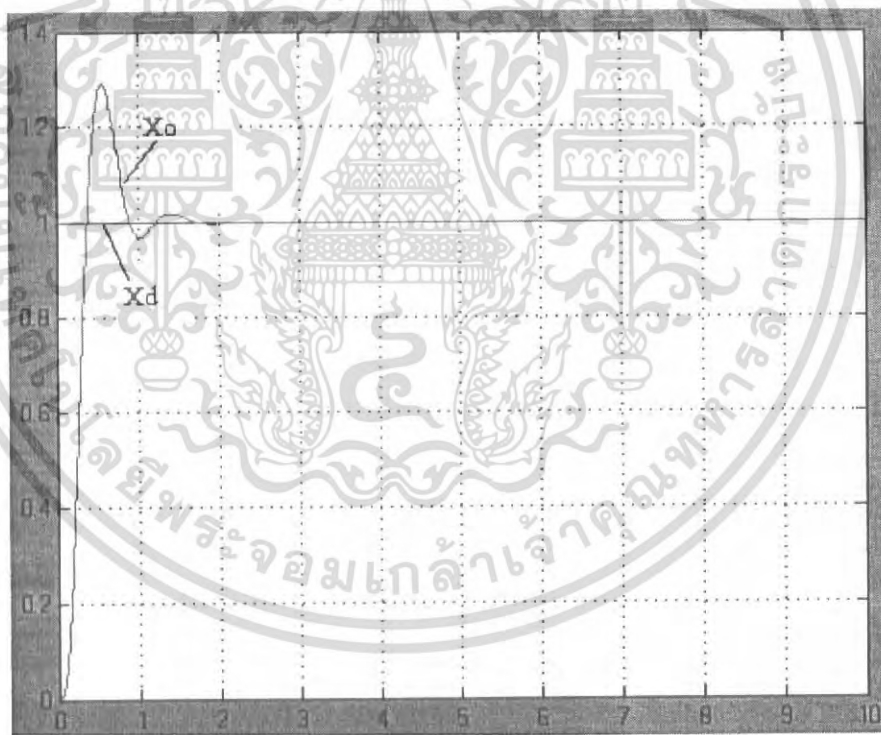
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบลูกบอลบนคาน แทนค่า $g = 9.8$ จะได้ $G(S) = \frac{7}{s^2}$ นำไปต่อร่วมกับระบบของดีซีมอเตอร์ทำการป้อนกลับแบบ unity feedback ใส่ตัวควบคุมแบบ PID จะสามารถเขียนเป็น simulink model ได้คือ



รูปที่ 2.42 simulink model ของระบบวงปิดที่สมบูรณ์

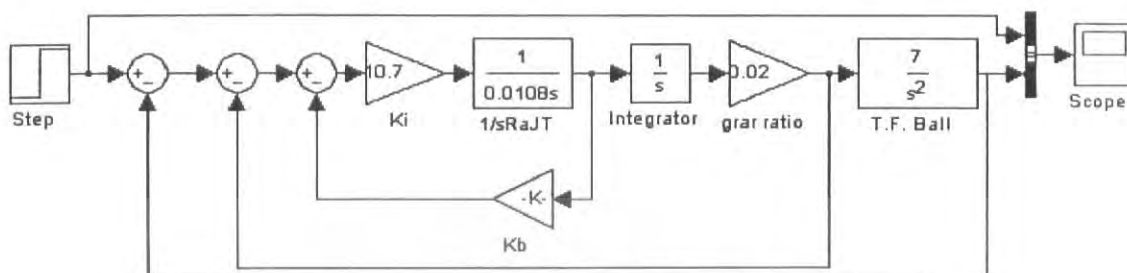
ทำการปรับค่า PID ทั้งสอง จนผลเป็นที่น่าพอใจคือ



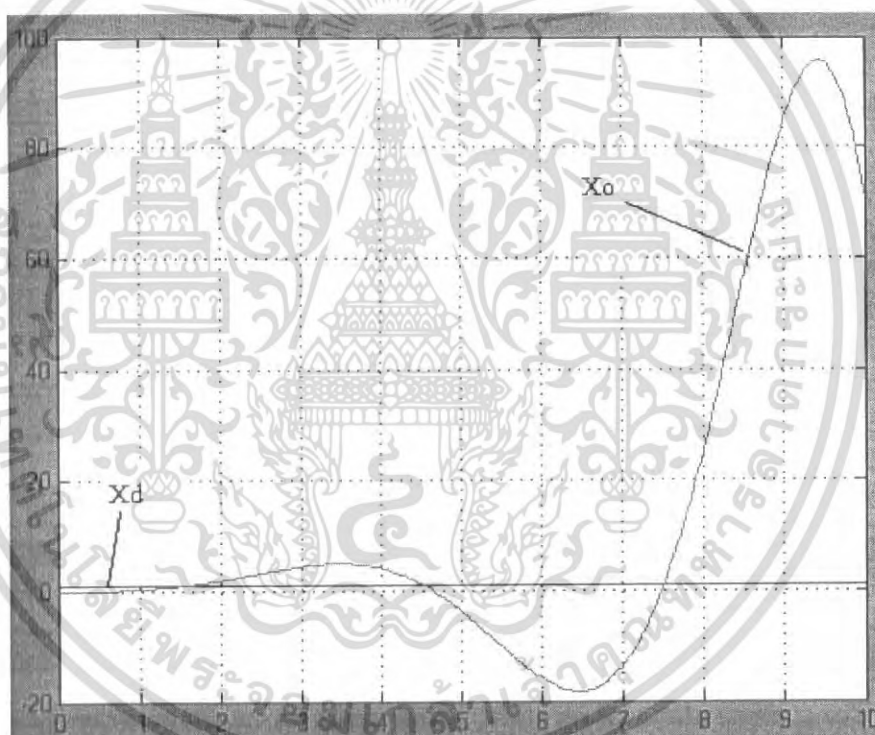
รูปที่ 2.43 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า ผลตอบสนองของระบบเกิด ค่าเกินสูงสุด(Mp)เล็กน้อยและคู่เข้ายังเป้าหมายที่ต้องการ หากเราสามารถสร้างระบบให้ได้ตามรูปแบบข้างต้น เราจะควบคุมระบบนี้ได้ และถ้าระบบไม่มีตัวควบคุมจะได้ผลตอบสนองคือ



รูปที่ 2.44 simulink model ของระบบวงปิดที่สมบูรณ์เมื่อไม่มีตัวควบคุม



รูปที่ 2.45 ผลตอบสนองของระบบวงปิดที่สมบูรณ์เมื่อไม่มีตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ผลตอบสนองเกิดการแกว่งและลู่ออก ดังนั้นหากต้องการที่จะควบคุมระบบการเคลื่อนที่ของลูกบอลบนคาน จะต้องมีการควบคุมมุมของคานและตัวควบคุมตำแหน่งของลูกบอล

จะเห็นว่า มีความเป็นไปได้ที่จะควบคุมให้ลูกบอลไปอยู่ที่ตำแหน่งใดๆบนคาน โดยในการเลือกค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมที่ผ่านมานั้น เป็นการสุ่มขึ้นมาแล้วหาผลการตอบสนองของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB ต่อไปจะเป็นการหาเกณฑ์โดยการออกแบบ ให้ระบบมีผลตอบสนองตามที่เราร้องต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการงานและการออกแบบ

3.1 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพล

จากบทที่ 2 เราได้ทราบแล้วว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของดีซีมอเตอร์และฟังก์ชันถ่ายโอนของลูกบอลบนคานเป็นอย่างไร ในการควบคุมมุมของคานจะใช้ดีซีมอเตอร์เป็นตัวทำให้มุมของคานเปลี่ยนแปลง

ในระบบควบคุมวงปิดของการควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน การเลือกค่าเกณฑ์ต่างๆของตัวควบคุมทั้งสอง เป็นการสุ่มเลือกค่าขึ้นมาแล้วใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการหาผลตอบสนองของระบบ แต่ในระบบจริงเราไม่สามารถบันทึกผลการตอบสนองได้ เพราะทุกส่วนของระบบเป็นระบบอนาล็อก ทำได้เพียงการสังเกตด้วยตาเท่านั้น ซึ่งค่าที่สังเกตได้จะมีด้วยตาจะมีเพียง การเกิดค่าเกินสูงสุด (Maximum overshoot : M_p) และ เวลาเข้าสู่จุดสมดุล (Settling Time : t_s)

ดังนั้นเราจะใช้ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ เป็นตัวกำหนดค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมทั้งสองโดยใช้วิธีการออกแบบที่เรียกว่า “การกำหนดตำแหน่งโพล” (ความสัมพันธ์ของโพลคู่ได้ที่ภาคผนวก ก) ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบคือ

1. เลือกชนิดของตัวควบคุม แทนค่าลงไปในระบบ แล้วทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งจะได้สมการคุณลักษณะที่ติดค่าตัวแปรที่ต้องการหา(สมการของตัวควบคุมแบบต่างๆ)
2. เลือกโพลเด่นเพียงสองตัว แล้วให้ที่เหลือเป็นโพลคู่โดยมีเงื่อนไขดังนี้
 - ผลรวมของโพลมีค่าเท่ากับ สัมประสิทธิ์ของ S ที่มีกำลังมากเป็นอันดับสอง
 - โพลคู่อยู่ห่างจากโพลเด่นมากๆ
 - กำหนดโพลเด่นสองตัวให้มีความสัมพันธ์กับค่า M_p และ t_s ของผลตอบสนองต่อสัญญาณ unit step ในระบบอันดับสอง
3. ทำการกระจายโพลที่เลือก แล้วเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการคุณลักษณะของระบบกับสมการคุณลักษณะของโพลที่เลือก จะได้ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมต่างๆ

จากฟังก์ชันถ่ายโอนและบล็อกไดอะแกรมของดีซีมอเตอร์ สมมติว่า ค่า L_a และ B_m มีค่าน้อยมาก จึงไม่นำมาคิด กำหนดค่าต่างๆที่เหลือดังนี้ (โดยมีเกียร์บล็อกต่อร่วมด้วย)

$$R_a = 1.62 \Omega$$

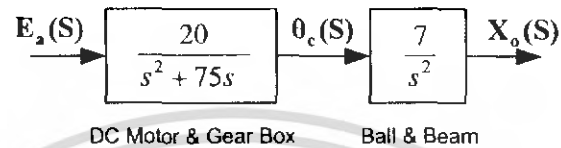
$$J_T = J_m + J_L = 0.0067 \text{ oz-in.-s}^2$$

$$K_t = 10.7 \text{ on-in/A}$$

$$K_b = 0.0754 \text{ V/rad/s}$$

$$\frac{N_2}{N_1} = 50$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบลูกบอลบนคาน แทนค่า $g=9.8$ จะได้ $G(S) = \frac{7}{s^2}$ นำไปต่อร่วมกับระบบของดีซีมอเตอร์ที่แทนค่าต่างๆแล้ว จะได้ระบบวงเปิดของระบบควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคานคือ

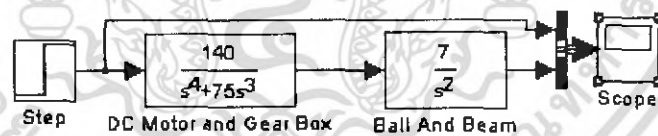


รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไคอะแกรมระบบวงเปิดของระบบควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน

ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

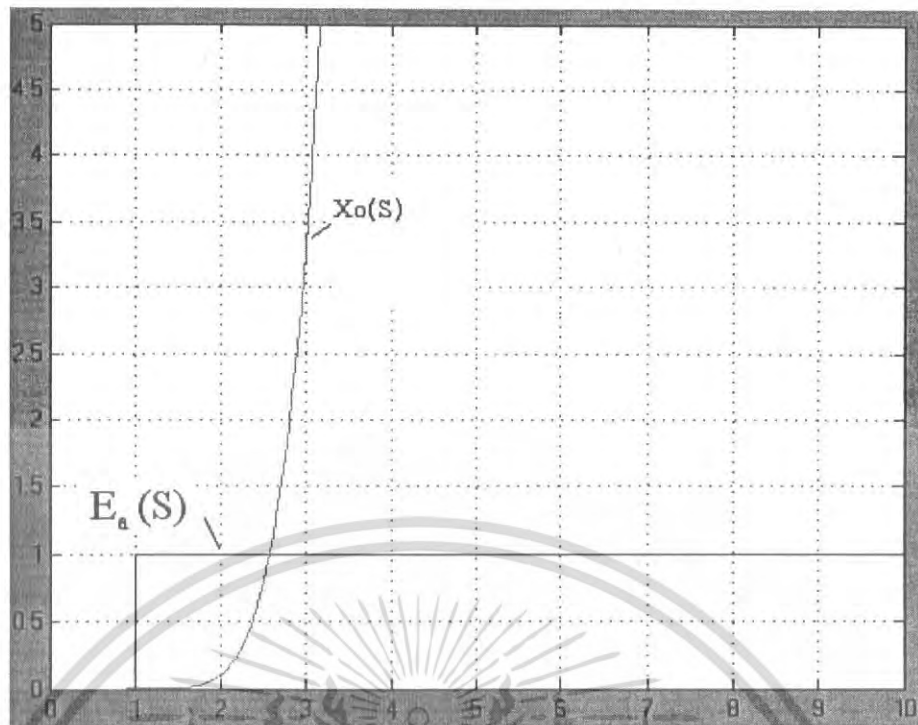
$$\frac{X_o(S)}{E_a(S)} = \frac{140}{s^4 + 75s^3}$$

ซึ่งมีโพลที่ $s = (0, 0, 0, -75)$ เมื่อนำระบบนี้ไปหาผลตอบสนองด้วยโปรแกรม MATLAB โดยให้สัญญาณอินพุตเป็น unit step ผลที่ได้คือ



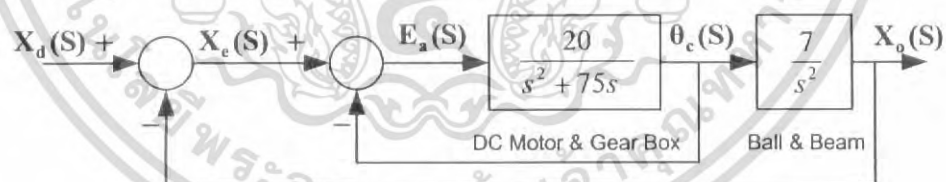
รูปที่ 3.2 simulink model ระบบวงเปิดของระบบควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน

จะเห็นว่า ผลตอบสนอง ไม่เข้าสู่ตำแหน่งที่กำหนด ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยมีการออกแบบดังนี้
ทำระบบให้เป็นระบบวงปิดโดยการป้อนกลับตำแหน่งมุมของคานและตำแหน่งของลูกบอลบนคาน สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้คือ



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบวงปิด

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของคิซิมอเตอร์ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\theta_c(S)}{X_c(S)} = \frac{20}{s^2 + 75s + 20}$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบคือ

$$\frac{X_o(S)}{X_d(S)} = \frac{140}{s^4 + 75s^3 + 20s^2 + 140}$$

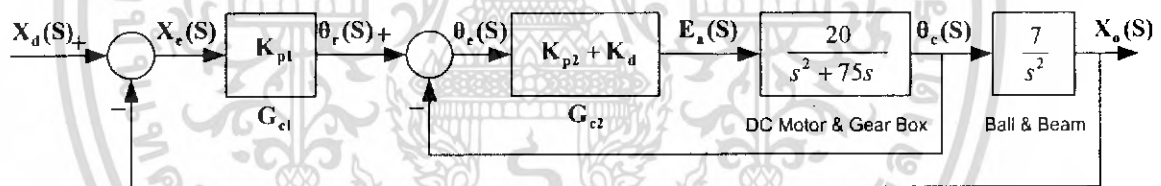
ซึ่งมีโพลที่

$$s = (-74.732, -1.3361, 0.5341 + 1.0568j, 0.5341 - 1.0568j)$$

จะเห็นว่า มีโพลบางตัวอยู่ทางด้านขวาของระนาบ s ระบบนี้จึงยังไม่มีเสถียรภาพ (เกิดการแกว่งและลู่ออก) ดังนั้นจึงต้องใส่ตัวควบคุมเข้าไป เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและมีผลตอบสนองตามที่เรารต้องการ

3.1.1 ตัวควบคุมตำแหน่งลูกบอล (G_{c1}) เป็นตัวควบคุมแบบ P และตัวควบคุมตำแหน่งมุม (G_{c2}) เป็นตัวควบคุมแบบ PD

จะได้บล็อกไดอะแกรมของระบบคือ



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมตำแหน่งของลูกบอลและตำแหน่งมุม(1)

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของดีซีมอเตอร์คือ

$$\frac{\theta_c(S)}{\theta_r(S)} = \frac{20(K_{p2} + sK_d)}{s^2 + 75s + 20(K_{p2} + sK_d)}$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบคือ

$$\frac{X_o(S)}{X_d(S)} = \frac{140(K_{p1}K_d s + K_{p1}K_{p2})}{s^4 + (75 + 20K_d)s^3 + 20K_{p2}s^2 + 140K_{p1}K_d s + 140K_{p1}K_{p2}}$$

เลือกโพลเด่นโดยให้ระบบอันดับสองมีผลตอบสนองดังนี้

ค่าเกินสูงสุด (M_p) = 0

เวลาเข้าสู่จุดสมดุล (t_s) 2% = 1.6 วินาที

จากข้อกำหนดข้างต้นสามารถหาค่า Damping ratio ได้จาก

$$M_p = e^{-\pi \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right)}$$

$$0 = e^{-\pi \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right)}$$

$$\zeta = 1$$

และสามารถหาค่า ω_n ได้จาก

$$t_s(2\%) = \frac{4}{\zeta\omega_n}$$

$$1.6 \text{ sec} = \frac{4}{(1)\omega_n}$$

$$\omega_n = 2.5$$

ดังนั้นจะได้โพลเด่นจาก

$$-\sigma = \zeta\omega_n$$

$$-\sigma = 2.5$$

ได้โพลเด่นสองตัวคือ $s = (-2.5, -2.5)$

จากสัมประสิทธิ์ของ s กำลังสูงสุดอันดับสองมีค่า $75 + 20K_d$ เพื่อให้ง่ายในการออกแบบจะกำหนดให้ K_d มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นจะสามารถกำหนดโพลคู่ยที่เหลือได้คือ $s = (-40, -50)$ ทำการคูณกระจายจะได้

$$s^4 + 95s^3 + 2456s^2 + 10562s + 12500$$

เปรียบเทียบกับสมการคุณลักษณะของระบบคือ

$$s^4 + (75 + 20K_d)s^3 + 20K_{p2}s^2 + 140K_{p1}K_d s + 140K_{p1}K_{p2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบสัมประสิทธิ์ มี 3 กรณีคือ

$$\begin{aligned}
 1. \quad s^3 \quad 75 + 20K_d &= 95 \\
 &K_d = 1 \\
 s^2 \quad 20 K_{p2} &= 2456 \\
 &K_{p2} = 122.8 \\
 s^0 \quad 140K_{p2}K_{p1} &= 12500 \\
 &K_{p1} = 0.727
 \end{aligned}$$

แทนค่า K_d , K_{p2} และ K_{p1} ที่ได้ลงในฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ จะได้

$$G_1(S) = \frac{140(0.727s + 89.27)}{s^4 + 95s^3 + 2456s^2 + 101.78s + 12500}$$

ซึ่งมีโพลของระบบคือ $s = (-47.5 + 14.2j, -47.5 - 14.2j, 0.0727 + 2.25j, 0.0727 - 2.25j)$

$$\begin{aligned}
 2. \quad s^3 \quad 75 + 20K_d &= 95 \\
 &K_d = 1 \\
 s^2 \quad 20 K_{p2} &= 2456 \\
 &K_{p2} = 122.8 \\
 s^1 \quad 140K_{p2}K_d &= 10562 \\
 &K_{p1} = 75.44
 \end{aligned}$$

แทนค่า K_{p2} , K_{p1} และ K_d ที่ได้ ลงในฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ จะได้

$$G_2(S) = \frac{140(75.44s + 9264)}{s^4 + 95s^3 + 2456s^2 + 10562s + 1296964}$$

ซึ่งมีโพลของระบบคือ $s = (-52.7 + 13.92j, 52.7 - 13.92j, 5.23 + 19.6j, 5.23 - 19.6j)$

$$\begin{aligned}
 3. \quad s^3 \quad 75 + 20K_d &= 95 \\
 &K_d = 1 \\
 s^1 \quad 140K_{p2}K_d &= 10562 \\
 &K_{p1} = 75.44
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$s^0 \quad 140K_{p2}K_{p1} = 12500$$

$$K_{p2} = 1.183$$

แทนค่า K_{p2} , K_{p1} และ K_d ที่ได้ ลงในฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบจะได้

$$G_3(S) = \frac{140(75.44s + 89.27)}{s^4 + 95s^3 + 23.66s^2 + 10562s + 12500}$$

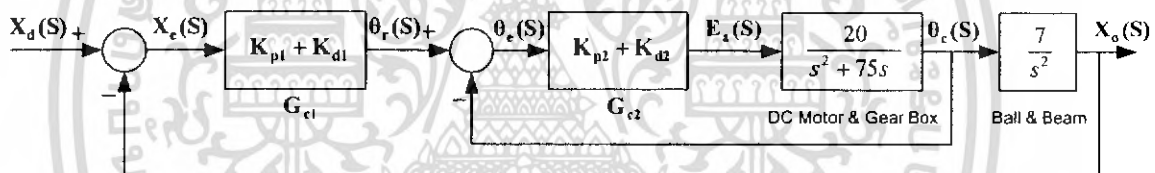
ซึ่งมีโพลของระบบคือ $s = (-95.88, -1.173, 1.03 + 10.495j, 1.03 - 10.495j)$

จะเห็นว่า ทั้ง 3 กรณีไม่สามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพ สังเกตได้จากทุกกรณียังมีโพลอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบ s ดังนั้นการให้ตัวควบคุมตำแหน่งมุมเป็นตัวควบคุมแบบ PD และให้ตัวควบคุมตำแหน่งของลูกบอลเป็นตัวควบคุมแบบ P ไม่ทำให้ระบบเป็นไปตามที่เราต้องการ

3.1.2 ตัวควบคุมตำแหน่งลูกบอล (G_{c1}) เป็นตัวควบคุมแบบ PD และตัวควบคุมตำแหน่งมุม

(G_{c2}) เป็นตัวควบคุมแบบ PD

จะได้บล็อกไดอะแกรมของระบบคือ



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมตำแหน่งของลูกบอลและตำแหน่งมุม(2)

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของคิซิมอเตอร์คือ

$$\frac{\theta_c(S)}{\theta_r(S)} = \frac{20(K_{p2} + sK_{d2})}{s^2 + 75s + 20(K_{p2} + sK_{d2})}$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบคือ

$$\frac{X_o(S)}{X_d(S)} = \frac{140(K_{p1} + sK_{d1})(K_{p2} + sK_{d2})}{s^4 + (75 + 20K_{d2})s^3 + (20K_{p2} + 140K_{d1}K_{d2})s^2 + 140(K_{p1}K_{d2} + K_{p2}K_{d1})s + 140K_{p1}K_{p2}}$$

เลือกโพลเด่นและโพลคู่โดยให้ระบบอันดับสองมีผลตอบสนองเช่นเดียวกับการเลือกตัวควบคุมแบบแรก จะได้โพลคือ $s = (-2.5, -2.5, -40, -50)$ ทำการคูณกระจายจะได้

$$s^4 + 95s^3 + 2456s^2 + 10562s + 12500$$

เปรียบเทียบกับสมการคุณลักษณะของระบบคือ

$$s^4 + (75 + 20K_{d2})s^3 + (20K_{p2} + 140K_{d1}K_{d2})s^2 + 140(K_{p1}K_{d2} + K_{p2}K_{d1})s + 140K_{p1}K_{p2}$$

จากสมการคุณลักษณะ จำเป็นต้องกำหนดค่า K_{p1} หรือ K_{p2} ขึ้นมา เพื่อให้สามารถหาค่าเกณฑ์อื่นๆได้ ในที่นี้จะพิจารณาการกำหนดเกณฑ์ K_{p1} และ K_{p2}

- กำหนดค่าเกณฑ์ $K_{p1} = 10$ เทียบสัมประสิทธิ์ มี 2 กรณีคือ

1. กำหนด $K_{p1} = 10$

$$s^0 \quad 140K_{p2}K_{p1} = 12500$$

$$K_{p2} = 8.928$$

$$s^3 \quad 75 + 20K_{d2} = 95$$

$$K_{d2} = 1$$

$$s^2 \quad 20K_{p2} + 140K_{d1}K_{d2} = 2456$$

$$K_{d1} = 16.26$$

แทนค่า $K_{p1}, K_{p2}, K_{d1}, K_{d2}$ ที่ได้ลงในฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ จะได้

$$G_1(S) = \frac{140(16.26s + 10)(s + 8.928)}{s^4 + 95s^3 + 2456s^2 + 32823s + 12500}$$

ซึ่งมีโพลของระบบคือ $s = (-64.9063, -0.3922, -14.8507 + 16.4480j, -14.8507 - 16.4480j)$

2. กำหนด $K_{p1} = 10$

$$s^0 \quad 140K_{p2}K_{p1} = 12500$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 & K_{p2} = 8.928 \\
 s^3 & \quad 75 + 20K_{d2} = 95 \\
 & K_{d2} = 1 \\
 s^1 & \quad 140(K_{p1}K_{d2} + K_{p2}K_{d1}) = 10562 \\
 & K_{d1} = 7.33
 \end{aligned}$$

แทนค่า K_{p1} , K_{p2} , K_{d1} , K_{d2} ที่ได้ลงในฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ จะได้

$$G_2(S) = \frac{140(7.33s + 10)(s + 8.928)}{s^4 + 95s^3 + 1205s^2 + 10562s + 12500}$$

ซึ่งมีโพลของระบบคือ $s = (-81.8287, -1.3766, -5.8974 + 8.7288j, -5.8974 - 8.7288j)$

จะเห็นว่า ทั้ง 2 กรณีทำให้ระบบมีเสถียรภาพ สังเกตได้จากทุกกรณีมีโพลอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบ s ดังนั้นการให้ตัวควบคุมตำแหน่งมุมเป็นตัวควบคุมแบบ PD และให้ตัวควบคุมตำแหน่งของลูกบอลเป็นตัวควบคุมแบบ PD ทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้เท่านั้น แต่ผลตอบสนองของระบบที่ถูกควบคุมแล้วนี้ จะไม่ตรงกับผลตอบสนองที่เรากำหนด สังเกตได้จากสัมประสิทธิ์หน้า s ของสมการคุณลักษณะไม่เหมือนกันกับสมการคุณลักษณะของโพลที่กำหนด

ข้อสังเกตค่าเกน K_{p1} ที่กำหนดขึ้นมาในกรณีที่สองค่าเกน K_{p1} ต้องมีค่าไม่เกิน 75.5 เพราะถ้าเกินแล้วจะทำให้เกน K_{d1} เป็นลบ ดังนั้นค่าเกน K_{p1} ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 75.5 และควรเลือกค่าน้อยๆเพื่อไม่ให้ผลตอบสนองของระบบ เกิดการแกว่งมากเกินไป

-กำหนดค่าเกน $K_{p2} = 5$ เทียบสัมประสิทธิ์จะได้

กำหนด $K_{p2} = 5$

$$s^0 \quad 140K_{p2}K_{p1} = 12500$$

$$K_{p1} = 17.86$$

$$s^3 \quad 75 + 20K_{d2} = 95$$

$$K_{d2} = 1$$

$$s^2 \quad 20K_{p2} + 140K_{d1}K_{d2} = 2456$$

$$K_{d1} = 16.82$$

แทนค่า K_{p1} , K_{p2} , K_{d1} , K_{d2} ที่ได้ลงในฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ จะได้

$$G_3(S) = \frac{140(16.82s + 17.86)(s + 5)}{s^4 + 95s^3 + 2456s^2 + 14275s + 12500}$$

ซึ่งมีโพลของระบบคือ $s = (-54.9700, -32.3471, -6.6212, -1.0617)$

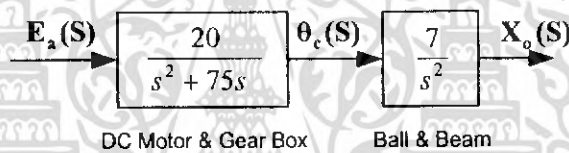
ทำให้ระบบมีเสถียรภาพและตำแหน่งโพลของระบบที่ถูกควบคุมแล้วนี้ มีโพลอยู่บนแกนจริง และมีค่าใกล้เคียงกับโพลที่กำหนดขึ้นมา ซึ่งดีกว่าการกำหนดเกน K_{p1} ก่อนแล้วจึงหาเกนอื่นที่เหลือ

3.2 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Symmetrical Optimum ร่วมกับตารางเร้าท์

จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบ

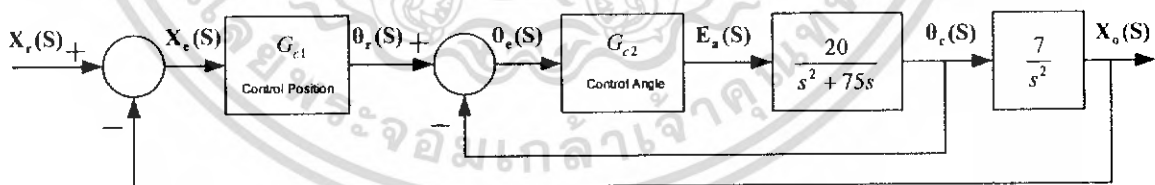
$$\frac{X_o(S)}{E_a(S)} = \frac{20}{s^2 + 75s} * \frac{7}{s^2}$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้คือ



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของระบบวงเปิดควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน

เมื่อทำการป้อนกลับตำแหน่งมุมของคานและตำแหน่งของลูกบอลจะได้ระบบวงปิดคือ



รูปที่ 3.8 ระบบควบคุมวงปิดของระบบ

โดยที่ G_{c1} คือตัวควบคุมตำแหน่งของลูกบอล

G_{c2} คือตัวควบคุมมุมของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า มี 2 Loop ทำงานแบบ cascade กัน จะต้องหาตัวควบคุมของ loop ในก่อนซึ่งสามารถหาได้โดยวิธี Symmetrical Optimum

3.2.1 การหาตัวควบคุมตำแหน่งมุม

พิจารณา $\frac{20}{s^2 + 75s}$ สามารถแยกออกเป็น 2 Element คือ

$$\frac{20}{s+75} * \frac{1}{s}$$

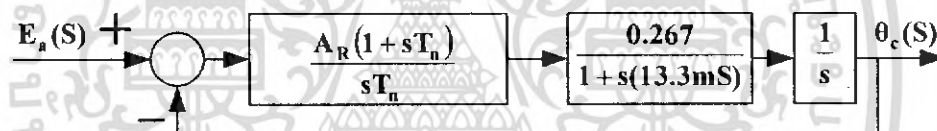
หรือ

$$\frac{0.267}{1+s(13*10^{-3})} * \frac{1}{s}$$

จะเห็นว่าเป็นระบบที่มี Integrating และ first order delays อย่างละ 1 Element

ในกรณีนี้ จะใช้ตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น $\frac{A_R(1+sT_n)}{sT_n}$ ดังนั้นลักษณะของ

Control loop จะเป็น



รูปที่ 3.9 Control loop ซึ่งมี Integrator , first order delays

ในการออกแบบตัวควบคุมจะกำหนดให้ $T_e = 13.3mS, T_0 = 1S$

$T_n = 4T_e$; T_e คือสัมประสิทธิ์ของ s ของ first order delays

$T_0 = 1$; T_0 คือสัมประสิทธิ์ของ Integrator

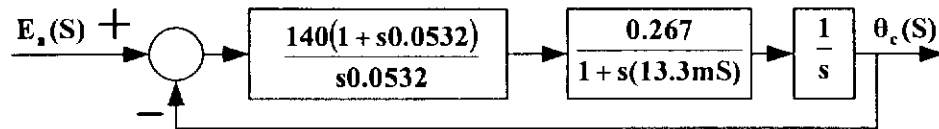
$A_R = \frac{T_i}{2T_e}$; $T_i = \frac{T_0}{A_s}$; A_s คือ Open-loop gain

ดังนั้นจะได้ว่า

$$T_n = 4(13.3 * 10^{-3}) = 53.2 * 10^{-3}$$

$$A_R = \frac{1}{2(0.267)(13.3 \cdot 10^{-3})} = 140$$

จะได้ระบบที่มีตัวควบคุมตำแหน่งมุมคือ



รูปที่ 3.10 ระบบของ Loop ในเมื่อใส่ตัวควบคุมแบบ PI

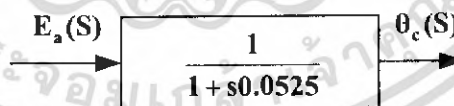
เมื่อได้ตัวควบคุมของ Loop ในแล้ว ในการหาตัวควบคุมของ Loop นอก เราจะต้องประมาณระบบ loop ในให้เป็น first order delays ก่อน โดยค่า T_s จะมีค่า

$$T_s = \frac{4T_c}{1 + \frac{T_c}{T_0}} = 52.5\text{mS}$$

ดังนั้นจะได้ระบบเป็น

$$\frac{\theta_c(s)}{E_r(s)} = \frac{1}{1 + s(52.5\text{mS})}$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้คือ

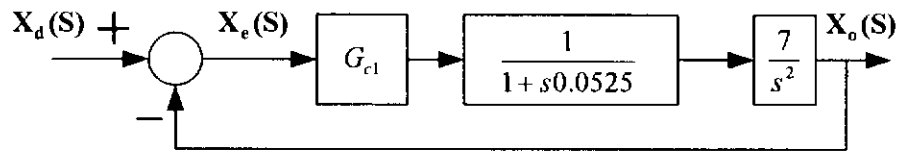


รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมของ loop ใน ที่ประมาณเป็น first order delay

3.2.2 การหาตัวควบคุมตำแหน่งของลูกบอล

จากระบบประมาณของ Loop ใน เมื่อต่อร่วมกับ Loop นอก จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ระบบที่ใช้ในการหาตัวควบคุมตำแหน่งของลูกบอล

ในการหาตัวควบคุมของ Loop นอก ใช้ตารางเรย์ท์พิจารณาหา โดย

3.2.2.1 กำหนดตัวควบคุม G_{c1} เป็นตัวควบคุมแบบ P

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบคือ

$$\frac{X_o(s)}{X_d(s)} = \frac{7K_p}{0.0525s^3 + s^2 + 7K_p}$$

นำสมการคุณลักษณะมาเขียนตารางเรย์ท์ได้คือ

s^3	0.0525	0
s^2	1	$7K_p$
s^1	$-0.0525 * 7K_p$	
s^0	$7K_p$	

จะเห็นว่าที่แถว s^1 K_p ต้องเป็นค่าลบจึงจะทำให้เครื่องหมายไม่เปลี่ยน แต่จะทำให้แถว s^0 ติดลบ ดังนั้น ตัวควบคุมแบบ P จึงใช้ไม่ได้

3.2.2.2 กำหนดตัวควบคุม G_{c1} เป็นตัวควบคุมแบบ PD

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบคือ

$$\frac{X_o(s)}{X_d(s)} = \frac{7(K_p + sK_d)}{0.0525s^3 + s^2 + s7K_d + 7K_p}$$

หรือ

$$\frac{X_o(S)}{X_d(S)} = \frac{133(K_p + sK_d)}{s^3 + 19s^2 + 133K_d s + 133K_p}$$

นำสมการคุณลักษณะมาเขียนตารางเร้าที่ได้คือ

s^3	0.0525	$7K_d$
s^2	1	$7K_p$
s^1	$\frac{7K_d - (0.0525)7K_p}{1}$	0
s^0	$7K_p$	

ที่แถว s^0 K_p ต้องมากกว่า 0 และ แถว s^1 พบว่า ถ้า K_p มากกว่า 0 แล้ว จะได้ช่วงของ K_p คือ

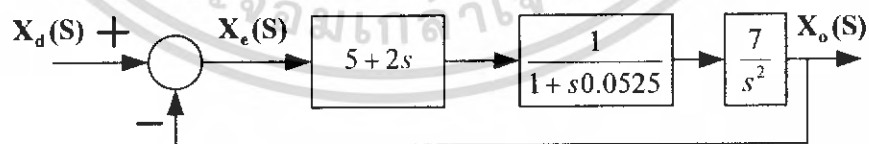
$$7K_d - (0.0525)7K_p > 0$$

$$7K_d > (0.0525)7K_p$$

$$K_p < \left(\frac{1}{0.0525}\right)K_d$$

ดังนั้น ค่าเกณฑ์ K_p จะมีค่าอยู่ระหว่าง $0 < K_p < (20)K_d$ จึงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ
ถ้ากำหนดให้ $K_d = 2$ จะได้ว่า $0 < K_p < 40$ ถ้าให้ $K_p = 5$ จะได้ระบบที่มีตัวควบคุมคือ

$$\frac{X_o(S)}{X_d(S)} = \frac{266sK_d + 665}{s^3 + 19s^2 + 266s + 665}$$



รูปที่ 3.13 ระบบเมื่อใส่ตัวควบคุมตำแหน่งแบบ PD (1)

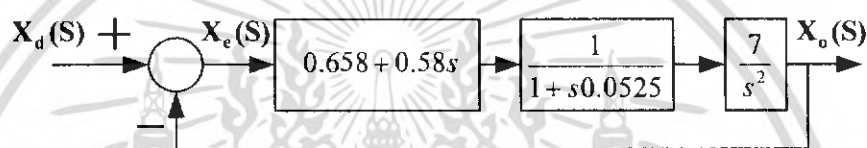
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าทำการหาแกนของตัวควบคุมโดยวิธีกำหนดตำแหน่งโพล ให้ผลตอบสนองของระบบมีค่าเกินสูงสุด (M_p) = 0 และ เวลาเข้าสู่จุดสมดุล (t_s) 2% = 1.6 วินาที เช่นเดียวกับการออกแบบในวิธีที่ 1 จะได้โพลเด่นคือ $s = (-2.5, -2.5)$ และโพลด้อยคือ $s = -14$ ทำการคูณกระจายจะได้

$$s^3 + 19s^2 + 76.25s + 87.5$$

เทียบสัมประสิทธิ์จะได้ $K_p = 0.658$ และ $K_d = 0.58$ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและระบบที่มีตัวควบคุมคือ

$$\frac{X_o(S)}{X_d(S)} = \frac{76.25s + 87.5}{s^3 + 19s^2 + 76.25s + 87.5}$$



รูปที่ 3.14 ระบบเมื่อใส่ตัวควบคุมตำแหน่งแบบ PD (2)

จะเห็นว่าสมการคุณลักษณะของระบบ สัมประสิทธิ์หน้า s ทุกตัวจะเท่ากับสัมประสิทธิ์หน้า s ของการคูณกระจายโพลที่เลือก ระบบนี้จะมีผลตอบสนองตามที่เรากำหนด

3.3 ส่วนประกอบของระบบจริง

จากระบบควบคุมวงปิดที่สมบูรณ์พบว่ามีส่วนประกอบของระบบคือ

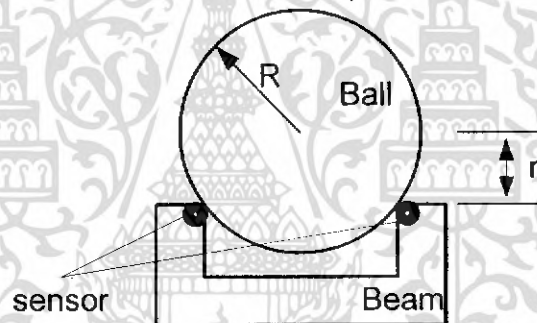
1. โครงสร้างของบอลและคาน
2. มอเตอร์และเกียร์บล็อก
3. วงจรขับดีซีมอเตอร์
4. ตัวควบคุมตำแหน่งมุมและตำแหน่งของลูกบอลบนคาน
5. วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ
6. เซนเซอร์วัดตำแหน่งของลูกบอลบนคาน
7. เซนเซอร์มุมของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบระบบ จะกำหนดให้สัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างส่วนต่างๆของระบบ เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

3.3.1 โครงสร้างของบอลและคาน

ในการทดสอบทางคณิตศาสตร์มาอธิบายระบบการเคลื่อนที่ของลูกบอลบนคานในบทที่ 2 นั้น ระบบการเคลื่อนที่ของลูกบอล จะแปรผันตามรัศมีของลูกบอลซึ่งระบบมีฟังก์ชันถ่ายโอน คือ $G(S) = \frac{(5/7)g}{s^2}$ เมื่อแทนค่า $g = 9.8\text{m/s}^2$ จะได้ $G(S) = \frac{7}{s^2}$ แต่ในการควบคุมแบบวงปิด จำเป็นต้องมีการวัดค่าตำแหน่งของลูกบอลบนคาน ป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง ผู้จัดทำได้เลือกหลอดความร้อนเป็นตัวเซนเซอร์ ในการหาตำแหน่งของลูกบอลบนคาน ซึ่งลูกบอล(โลหะ) จะต้องกลิ้งโดยสัมผัสกับลวดนี้ วิธีที่ทำให้ลวดกับลูกบอลสัมผัสกันได้ดี ควรให้ลูกบอลกลิ้งบนลวด เพราะน้ำหนักของลูกบอลจะเป็นตัวช่วยในการทำให้จุดที่สัมผัส สัมผัสกันได้ดี จึงจำเป็นต้องให้ลวดสองเส้นวางขนานกันแล้วให้ลูกบอลกลิ้งไปบนลวดทั้งสองดังรูป



รูปที่ 3.15 รูปหน้าตัดของลูกบอลบนคาน

ทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกบอล ไม่แปรผันตามรัศมี(R)ของลูกบอลอีกแล้ว แต่จะแปรผันตามรัศมีภายใน(r)ของลูกบอลแทน ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอน ไม่ใช่ $G(S) = \frac{(5/7)g}{s^2}$ อีกต่อไป แต่ยังสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน ของระบบได้โดยวิธีของ Lagrangian Methode ซึ่งได้ฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$G(S) = \left[\frac{g}{1 + \frac{2R^2}{5r^2}} \right] \frac{1}{s^2} \text{ ซึ่งเมื่อแทนค่าแล้วพบว่า ได้ค่าเกนของระบบน้อยกว่าเดิม แต่ในการควบคุม}$$

แบบวงปิดไม่มีผลมากนัก(แต่ในการควบคุมแบบ Time Optimal Control ค่านี้จะมีผลคือ เวลาที่ใช้จะมีค่ามากขึ้น) โครงสร้างของบอลและคาน ดูได้ที่ภาคผนวก ข

3.3.2 ดีซีมอเตอร์พร้อมเกียร์บล็อก

ในการเลือกใช้ดีซีมอเตอร์พร้อมเกียร์บล็อก มาใช้ในการหมุนคาน สิ่งแรกที่ต้องรู้คือค่าความเฉื่อยของคานที่หมุน จากสูตรการหาความเฉื่อย (J) ของวัตถุที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวและมีจุดหมุนอยู่ตรงกลางระหว่างปลายทั้ง 2 ข้าง คือ

$$J = \frac{1}{12} ML^2$$

เมื่อ M มวลของคาน (มีค่า = น้ำหนัก/แรงโน้มถ่วงของโลก)

L ความยาวของวัตถุ

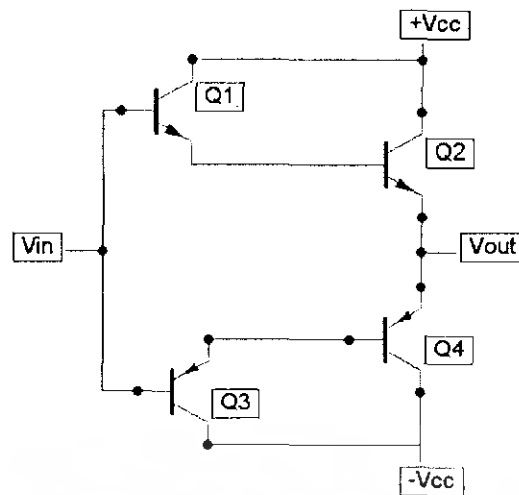
จากวัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นคานยาว 1 เมตร และมีน้ำหนักประมาณ 500 กรัม ดังนั้นจะได้ค่าความเฉื่อยของคานคือ

$$\begin{aligned} J_{\text{cาน}} &= \frac{1}{12} (0.5\text{Kg})(1\text{m})^2 \\ &= 0.0417\text{Kg.m}^2 \end{aligned}$$

ซึ่งต้องเลือกมอเตอร์และอัตราทดเกียร์ให้มีแรงบิดมากเกินพอที่จะนำไปหมุนคาน แต่ในความเป็นจริงเป็นไปได้ยากที่จะหาได้พอดีกับที่คำนวณ ดังนั้นจึงเลือกใช้ดีซีมอเตอร์ขนาด 24 V และอัตราทดเกียร์ (N=100) มาใช้ในการทำโครงงาน (ยังเลือกมอเตอร์พิกัดสูงสุดวงจรที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์จะยุ่งยากมากตามไปด้วย)

3.3.3 วงจรขับดีซีมอเตอร์

ทิศทางการหมุนของดีซีมอเตอร์นั้นขึ้นอยู่กับแรงดันที่จ่ายให้ตัวมอเตอร์และการควบคุมแบบวงปิด มุมของคานนั้นต้องเป็นได้ทั้ง +θ และ -θ วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ต้องจ่ายได้ทั้งไฟบวกเทียบกราวด์และไฟลบเทียบกราวด์ ดังนั้นจึงเลือกใช้วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ T เพราะสัญญาณเอาต์พุต จะเหมือนกับสัญญาณอินพุต ซึ่งมีลักษณะวงจร คือ



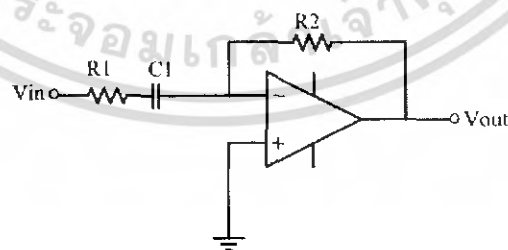
รูปที่3.16 วงจรขับมอเตอร์

วงจรขับคีมอเตอร์จะรับสัญญาณจากชุดควบคุมเพื่อนำมาขยายให้เหมาะสมในการขับคีมอเตอร์ โดยใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวคนละชนิดกันแต่มีคุณสมบัติเหมือนกันซึ่งทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้จะผลัดกันทำงานตามสัญญาณอินพุตที่ป้อน โดย Q1,Q2 ขยายสัญญาณบวกและ Q3,Q4 ขยายสัญญาณลบ

การออกแบบ Q2 และ Q4 ต้องเป็นเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ โดยเลือกใช้ Q2 เบอร์ 2N3055 และ Q4 เบอร์ MJ 2599 ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกันแต่คนละชนิดกัน ส่วน Q1 เลือก BD 137 และ Q3 เลือก BD 138 ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกันคนละชนิดกัน แต่มีพิกัดกำลังน้อยกว่า Q2 และ Q4

3.3.4 ตัวควบคุมตำแหน่งมุมและตำแหน่งของลูกบอลบนคาน

จากการออกแบบตัวควบคุม ระบบควบคุมวงปิดที่สมบูรณ์ จะใช้ตัวควบคุมแบบ PD วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานเป็นตัวควบคุมแบบ PD คือ



รูปที่3.17 วงจรควบคุมแบบ PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

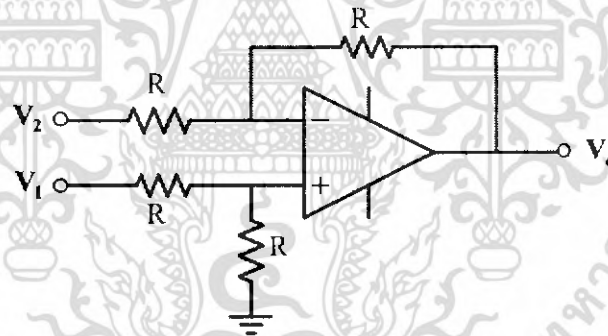
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = - \left[\frac{R_2}{R_1} + sC_1R_2 \right]$$

ในการปรับเกน P และ D ทำได้ดังนี้คือ กำหนดค่า R_2 ให้คงที่ ดังนั้นเกน P จะปรับที่ R_1 และ เกน D จะปรับที่ C_1

การออกแบบเลือกค่า $R_2 = 500K\Omega$ R_1 เป็นค่าความต้านทานปรับค่าได้ มีค่า 0Ω ถึง $1M\Omega$ และ C_1 เป็นค่าคงที่มีค่า $10\mu F$ ดังนั้นจะให้ค่าเกน P มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึงประมาณ 50 (R_1 ควรปรับ ให้น้อยสุดมีค่า $10K\Omega$) และ ได้เกน $D = 500K\Omega * 10\mu F = 5$ จะใช้วงจรนี้เป็นตัวควบคุมตำแหน่งของ ลูกบอลและความคมของภาพ

3.3.5 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

จากระบบควบคุมวงปิดจะมีจุดที่ต้องทำการเปรียบเทียบสัญญาณ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เปรียบเทียบสัญญาณคือวงจร Comparator Amplifier



รูปที่ 3.18 วงจร Comparator Amplifier

ถ้าค่าความต้านทานทั้ง 4 ตัวเท่ากันแล้ว ค่าแรงดัน V_0 จะมีค่าเท่ากับ

$$V_0 = V_1 - V_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 วงจรเซนเซอร์วัดตำแหน่งของลูกบอลบนกาน

จากที่เลือกใช้ลวดความร้อนเป็นเซนเซอร์วัดตำแหน่งของลูกบอลบนกาน เส้นลวดนี้เมื่อทำการติดตั้งบนกาน และให้ลูกบอลโลหะเป็นตัวเชื่อมระหว่างเส้นลวดทั้งสอง แล้วทำการวัดค่าความต้านทานพบว่า ค่าความต้านทานตรงจุดที่ใกล้จุดที่วัด(จุดเริ่มต้น) มีค่า 1.5Ω และเมื่อเลื่อนลูกบอลให้ไกลออกไปปรากฏว่าความต้านทานเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น จุดที่ไกลที่สุดวัดค่าความต้านทานได้ 9Ω (ที่ความยาว 97.5 ซม.)

ดังนั้นเส้นลวดนี้เปรียบเสมือนความต้านทานปรับค่าได้ มีค่าระหว่าง 1.5Ω ถึง 9Ω ทำการเปลี่ยนเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า โดยประกอบเป็นวงจรแบ่งแรงดันดังรูป



รูปที่ 3.19 วงจรแบ่งแรงดัน

เพื่อให้แรงดัน V_o มีช่วงแรงดันที่กว้าง ดังนั้น R_L ควรมีค่าน้อยๆ และมีกำลังวัตต์ที่สูง กำหนดให้ V_{cc} มีค่า +5 Volt และ R_L มีค่า 5Ω ดังนั้น R_L ต้องมีกำลังวัตต์คือ

$$\begin{aligned} W &= I_{MAX}^2 * R_L \\ &= \left(\frac{5\text{Volt}}{1.5\Omega + 5\Omega} \right)^2 * 5\Omega \\ &= 2.96 \text{ W} \end{aligned}$$

ดังนั้นควรเลือกให้ R_L มีกำลังวัตต์มากกว่า 3 วัตต์ จากวงจรแบ่งแรงดันจะได้ $V_{o_{MAX}}$ กับ $V_{o_{MIN}}$ คือ

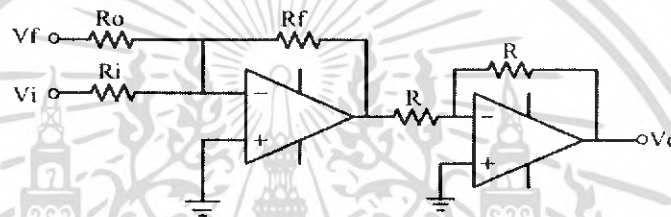
1. เมื่อ R_o เท่ากับ 1.5Ω จะได้ $V_{o_{MIN}}$ คือ

$$V_{o_{\text{MIN}}} = \left[\frac{5\text{V}}{1.5\Omega + 5\Omega} \right] * 1.5\Omega = 1.154\text{Volt}$$

2. เมื่อ R_o เท่ากับ 9Ω จะได้ $V_{o_{\text{MAX}}}$ คือ

$$V_{o_{\text{MAX}}} = \left[\frac{5\text{V}}{9\Omega + 5\Omega} \right] * 9\Omega = 3.21\text{Volt}$$

จะเห็นว่าช่วงของแรงดันที่ได้จะแคบมาก จึงต้อง Signal condition เพื่อกำหนดช่วงให้มีความสัมพันธ์กับความยาวของคาน โดยใช้วงจร zero-span เป็นตัวจัดการ โดยให้ V_o มีค่าระหว่าง 0-10 Volt แทนความยาวของคาน 0-1 เมตร ลักษณะของวงจรปรับ zero-span คือ



รูปที่ 3.20 วงจรปรับ zero-span

V_o ของวงจรคือ

$$V_o = \frac{R_f}{R_i} v_i + \frac{R_f}{R_o} v_f$$

โดย V_i คือช่วงของแรงดันที่ต้องการปรับช่วง

V_f คือแรงดันชดเชยมีค่าคงที่

ในการคำนวณ กำหนดให้ $\frac{R_f}{R_o} = \frac{R_f}{R_i} = K$ จะได้

$$V_o = K(v_i + v_f)$$

ที่ $V_i = 1.154\text{Volt}$ ให้ $V_o = 0\text{ Volt}$ จะได้

$$0\text{Volt} = K(1.154\text{Volt} + v_f) = 1.154K + v_f \quad \text{สมการที่(1)}$$

ที่ $V_i = 3.21\text{Volt}$ ให้ $V_o = 10\text{Volt}$ จะได้

$$10\text{Volt} = K(3.21\text{Volt} + v_f) = 3.21K + v_f \quad \text{สมการที่(2)}$$

แก้สมการเชิงเส้น โดย สมการที่(2) - สมการที่(1) จะได้

$$10\text{V} = 2.056K$$

$$K = \frac{10}{2.056}$$

แทนลงในสมการที่ (2) จะได้

$$10\text{Volt} = \frac{10}{2.056} [3.21\text{Volt} + v_f]$$

$$v_f = -1.154\text{Volt}$$

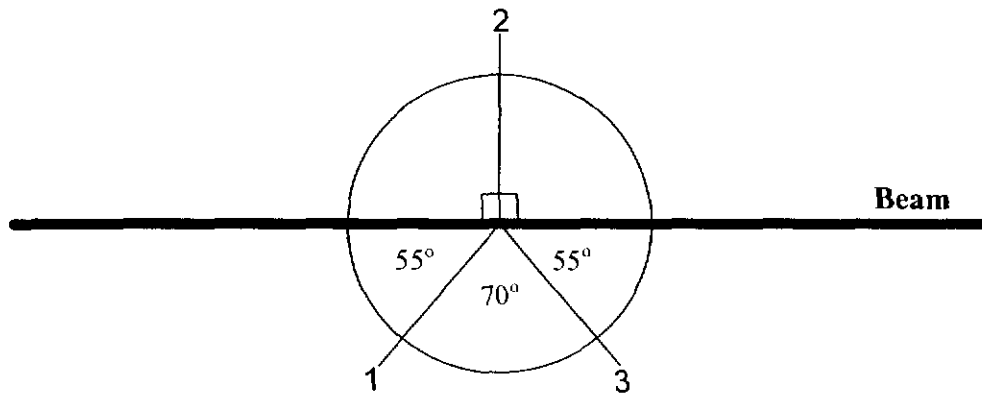
จาก $\frac{R_f}{R_o} = \frac{R_f}{R_i} = K = \frac{10}{2.056}$ เลือก $R_f = 10\text{K}\Omega$, $R_i = R_o = 2\text{K}\Omega$

จะได้แรงดันจากเซนเซอร์ตำแหน่งของลูกบอลบนคัน มีค่าอยู่ระหว่าง 0-10 Volt ตามต้องการ

3.3.7 เซนเซอร์มุมของคัน

อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดตำแหน่งมุมของคันเลือกใช้โพเทนชิโอมิเตอร์แบบเชิงมุม (Rotary Potentiometer) โดยค่าความต้านทานของโพเทนชิโอมิเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามมุมของการหมุน

โพเทนชิโอมิเตอร์ที่ใช้สามารถหมุนได้ถึง 290องศา และมีค่าความต้านทาน 52.2 K Ω เมื่อนำไปติดตั้งเพื่อวัดตำแหน่งมุมของคันสามารถติดตั้งได้ดังรูป



รูปที่3.21 การติดตั้งโพเทนชิโอมิเตอร์

ดังนั้นงานจะทำมุมอยู่ระหว่าง +55 องศา กับ -55 องศา และในการต่อใช้งานโพเทนชิโอมิเตอร์ จะใช้แหล่งจ่าย $\pm V$ ที่ขั้วทั้งสองและขั้วกลางเทียบกราวด์ดังรูป



รูปที่3.22 วงจรการต่อใช้งาน

กำหนดให้ $+V=12$ Volt และ $-V=12$ Volt โพเทนชิโอมิเตอร์ทำมุมได้มากที่สุด 290 องศา = 52.2 K Ω ดังนั้น 1 องศา = 181 Ω จากวงจรการต่อใช้งาน ถ้าสมดุลจะได้ $V_o = 0$ Volt มุมที่งานทำได้อยู่ในระหว่าง -55 องศา ถึง +55 องศา ดังนั้น $\pm V_o$ สูงสุดจะมีค่า $\left(\frac{12V}{145^\circ}\right) * 55^\circ = \pm 4.55$ Volt

ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ตำแหน่งมุมจะมีค่าอยู่ระหว่าง ± 4.55 Volt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

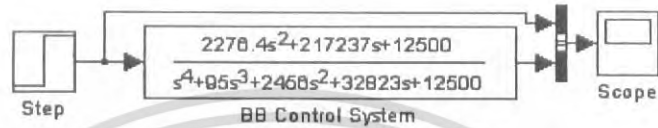
บทที่ 4

ผลการทดลอง

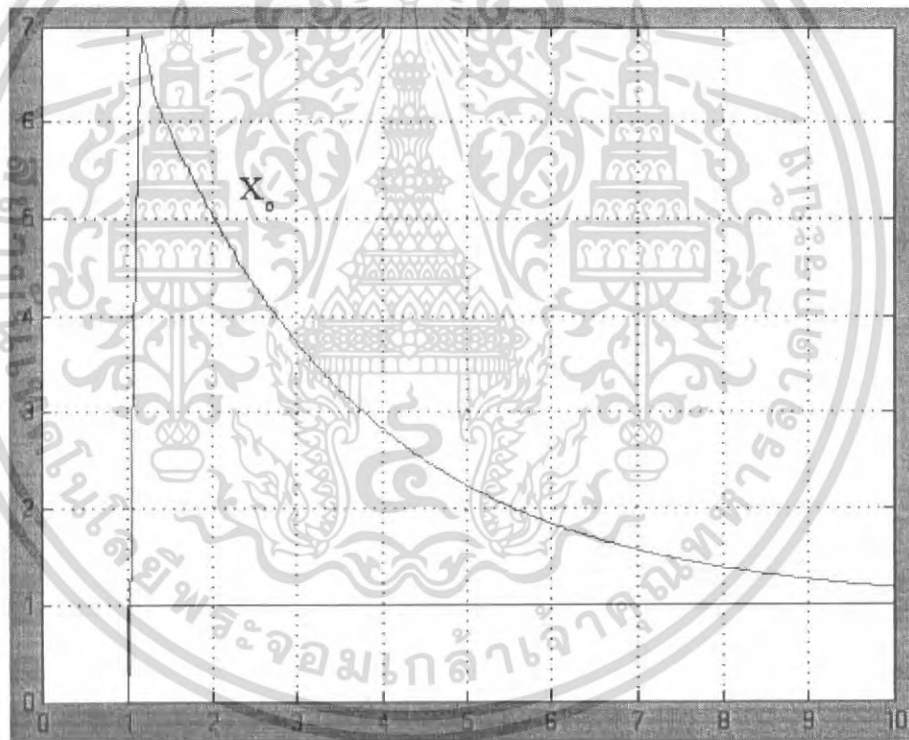
4.1 ผลตอบสนองของระบบเมื่อมีตัวควบคุม(จำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB)

4.1.1 ออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพล

4.1.1.1 ตัวควบคุม G_{c1} และ G_{c2} เป็นแบบ PD(กำหนดค่าเกน K_{p1} กรณีที่ 1)



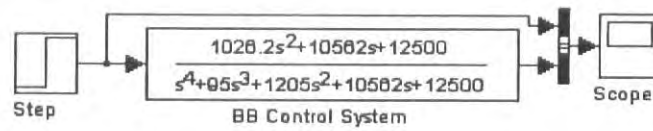
รูปที่ 4.1 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบ (1)



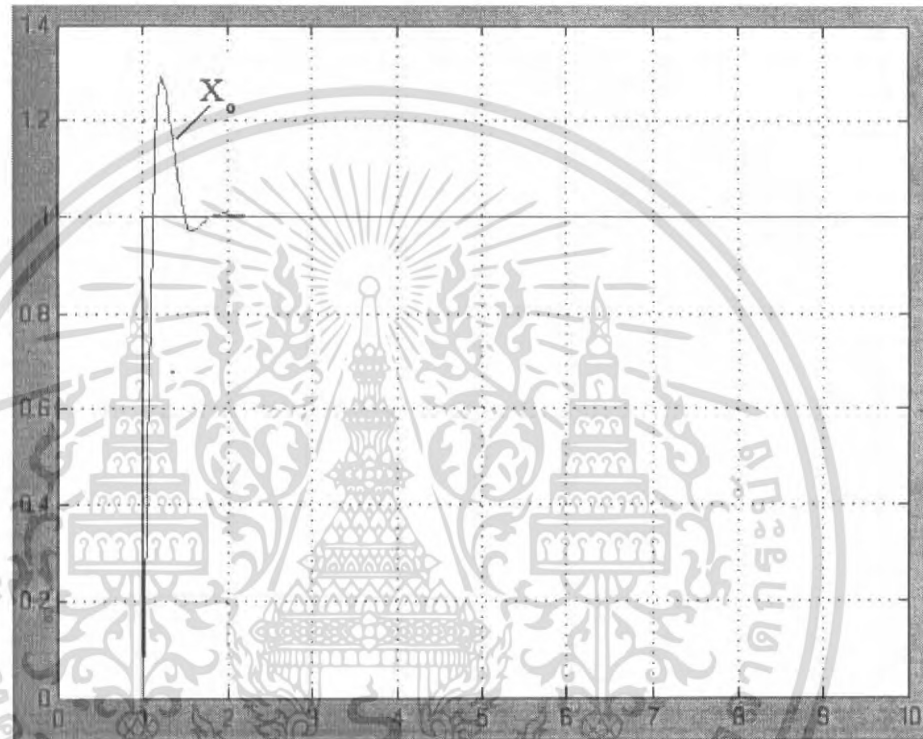
รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองของระบบ (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 ตัวควบคุม G_{c1} และ G_{c2} เป็นแบบ PD (กำหนดค่าเกน K_{p1} กรณีที่ 2)



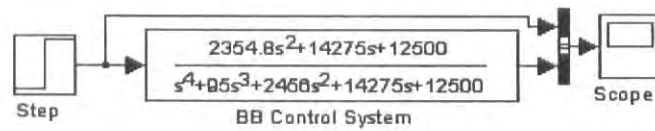
รูปที่ 4.3 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบ (2)



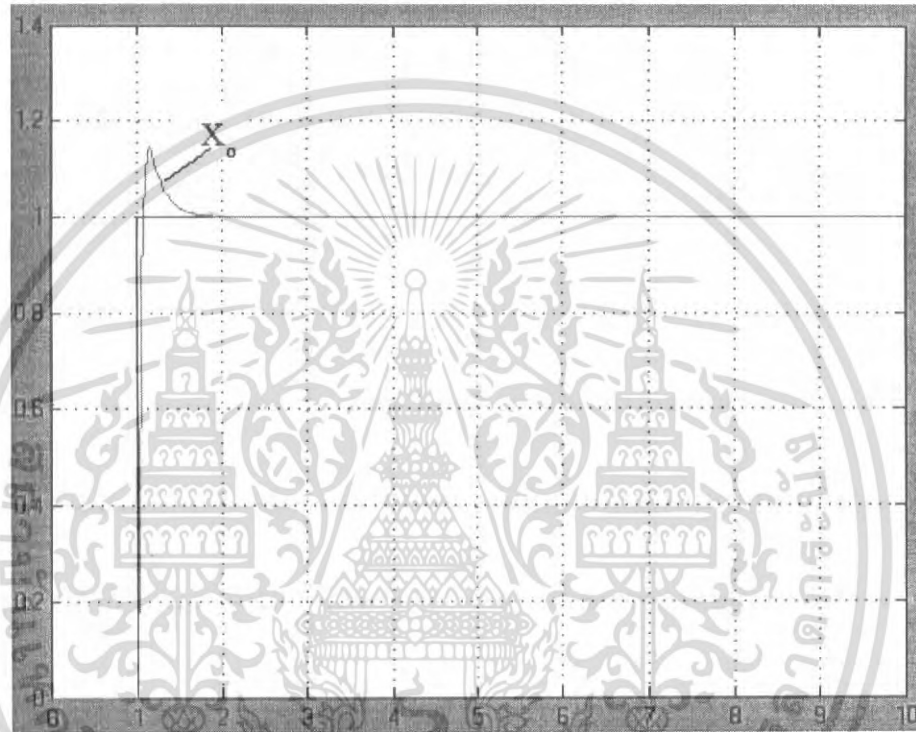
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของระบบ (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.3 ตัวควบคุม G_{c1} และ G_{c2} เป็นแบบ PD (กำหนดค่าเกน K_{p2})



รูปที่ 4.5 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบ (3)

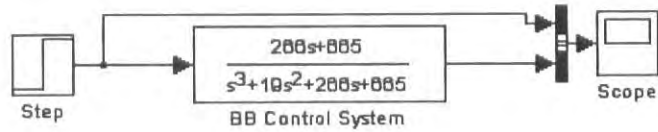


รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองของระบบ (3)

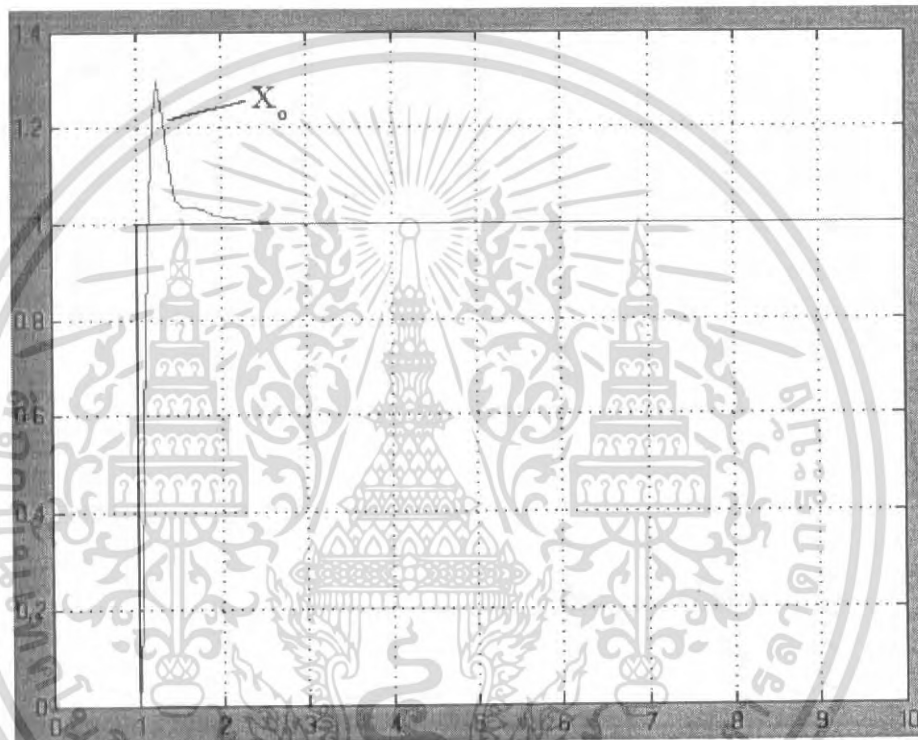
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Symmetrical Optimum ร่วมกับตารางเร้าท์

4.1.2.1 เกนของตัวควบคุมถูกกำหนดขึ้นมาก็คือ $K_p = 5$ และ เกน $K_d = 2$



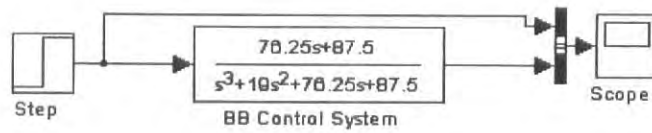
รูปที่ 4.7 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบ (4)



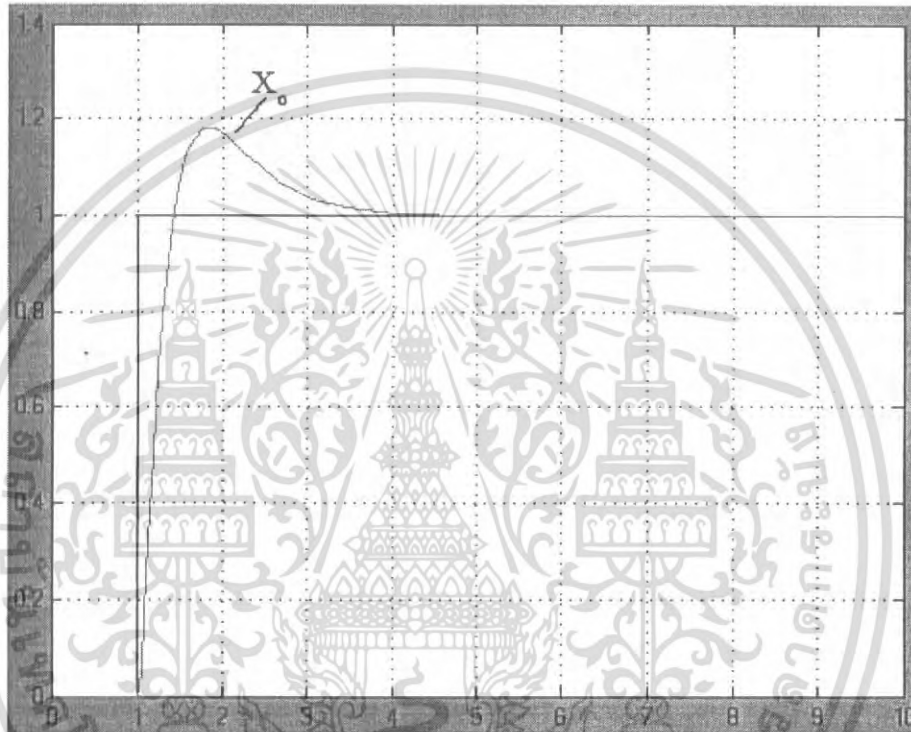
รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองของระบบ (4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 เกนของตัวควบคุมได้จากวิธีการกำหนดตำแหน่งโพล



รูปที่ 4.9 simulink model ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบ (5)



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองของระบบ (5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองที่ได้จากระบบจริง

4.2.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานของลวดความร้อน

จากการที่เลือกใช้ลวดความร้อนเป็นเซนเซอร์วัดตำแหน่งของลูกบอลบนคาน ซึ่งคุณสมบัติของลวดนี้จะมีค่าความต้านทาน(R)เปลี่ยนแปลงตามความยาว(L) พื้นที่หน้าตัด(A) และค่าคงที่ของค่าความต้านทานในลวดตัวนำ(K) ดังสมการ

$$R = \frac{K * L}{A}$$

เมื่อ R มีหน่วยเป็นโอห์ม(Ω)

L มีหน่วยเป็นเมตร (m)

A มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

โดยเส้นลวดที่ใช้มีคุณสมบัติคือ มีความยาวจากจุดเริ่มต้นของลูกบอลถึงจุดสุดท้าย 0.975 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มิลลิเมตร จากการที่ลูกบอลกลิ้งบนลวดสองเส้นที่วางขนานกัน เมื่อทำการติดตั้งบนคานแล้วให้ลูกบอลเป็นตัวเชื่อมลวดทั้งสองเข้าด้วยกัน ทำการวัดค่าความต้านทานแต่ละจุดที่ลูกบอลเชื่อมต่อ จากนั้นคำนวณหาค่าคงที่ (K) ของลวดโดยสมการการหาค่าคงที่คือ

$$K = \frac{RA}{2L + C}$$

เมื่อ C คือช่วงก่อนถึงจุดที่ลูกบอลเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานที่จุดต่างๆบนคานและค่าคงที่ ณ จุดที่ลูกบอลเชื่อมต่อ

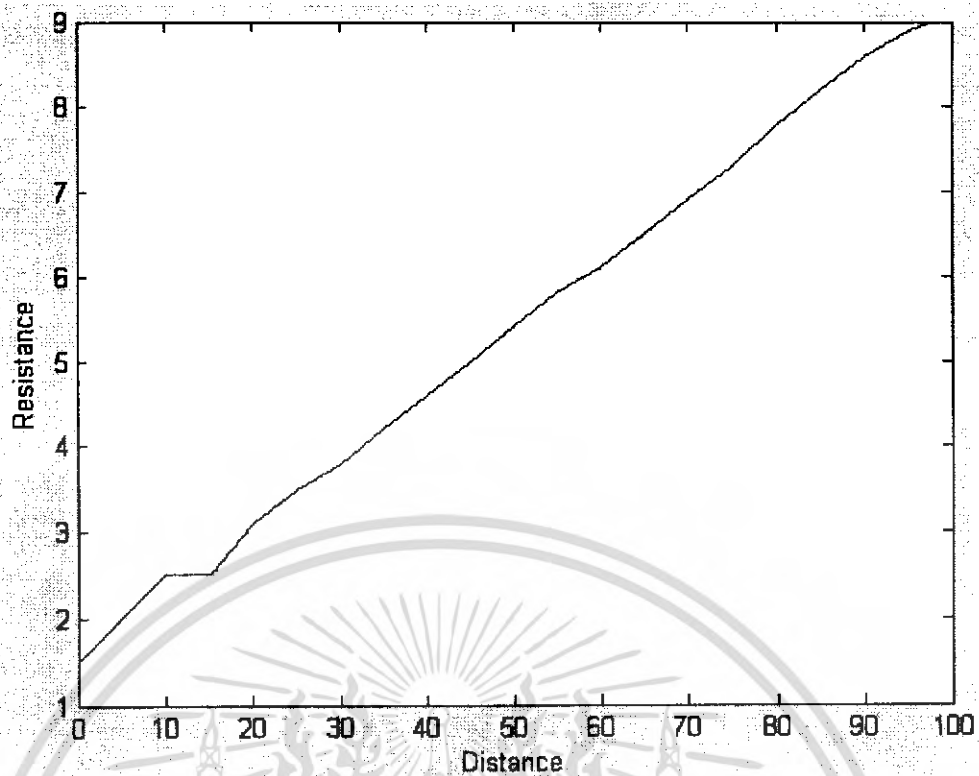
ความยาวของคาน(m)	ค่าความต้านทาน (Ω)	ค่าคงที่(K)
0	1.5	0.00000212
5	2.0	0.00000047
10	2.5	0.00000130
15	2.5	0.00000147
20	3.1	0.00000146

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ความยาวของคาน(m)	ค่าความต้านทาน (Ω)	ค่าคงที่(K)
25	3.5	0.00000143
30	3.8	0.00000134
35	4.2	0.00000131
40	4.6	0.00000130
45	5.0	0.00000128
50	5.4	0.00000127
55	5.8	0.00000126
60	6.1	0.00000123
65	6.5	0.00000122
70	6.9	0.00000122
75	7.3	0.00000124
80	7.8	0.00000122
85	8.2	0.00000121
90	8.6	0.00000120
95	9.0	0.00000120

ดังนั้น เส้นลวดนี้เปรียบเสมือนความต้านทานปรับค่าได้ มีค่าระหว่าง 1.5 Ω ถึง 9 Ω และมีค่าคงที่ (K) เฉลี่ย 0.00000128 และจากค่าความต้านทานที่ได้ เมื่อนำไปพล็อตเทียบกับความยาวจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางบนคานกับค่าความต้านทานของลวดความร้อน

4.2.2 ผลการทดสอบวงจรเซนเซอร์ตำแหน่งของลูกบอล

วงจรที่ประกอบขึ้นเป็นชุดเซนเซอร์ตำแหน่งของลูกบอลดูได้จากภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวงจรเซนเซอร์ตำแหน่งของลูกบอล

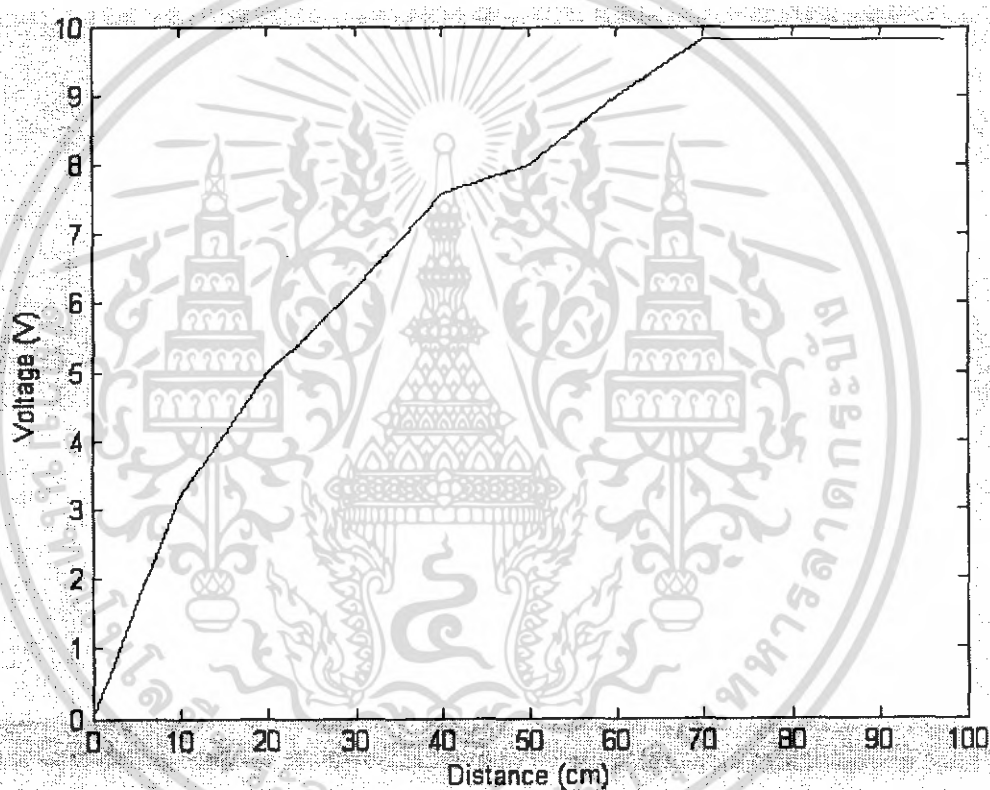
ตำแหน่ง(cm)	ค่าที่ได้จากคำนวณ (V)	ค่าที่วัดได้ (V)
0	0	0.05
10	1	3.2
20	2	5.0
30	3	6.2
40	4	7.6
50	5	8.0
60	6	9.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ตำแหน่ง(cm)	ค่าที่ได้จากคำนวณ (V)	ค่าที่วัดได้ (V)
70	7	9.8
80	8	9.8
90	9	9.8
97.5	9.75	9.8

จากผลการทดลองที่ได้ นำไปพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ จะได้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางบนคานกับแรงดันที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

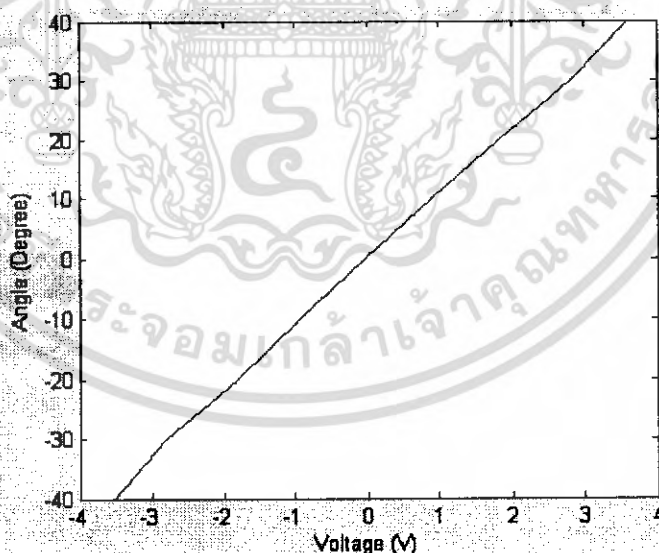
4.2.3 ผลการทดสอบวงจรเซนเซอร์มุมของกาน

วงจรที่ประกอบขึ้นเป็นชุดเซนเซอร์มุมของกาน คูได้จากภาคผนวก ก

ตารางที่4.3 ผลการทดสอบวงจรเซนเซอร์มุมของกาน

มุมของกาน(องศา)	ค่าที่ได้จากค่านวณ (V)	ค่าที่วัดได้ (V)
-40	-3.31	-3.537
-30	-2.428	-2.800
-20	-1.655	-1.841
-10	-0.827	-0.937
0	0	-0.026
10	0.827	0.903
20	1.655	1.830
30	2.428	2.827
40	3.31	3.586

จากผลการทดลองที่ได้ นำไปพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ จะได้



รูปที่4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของกานกับแรงดันที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

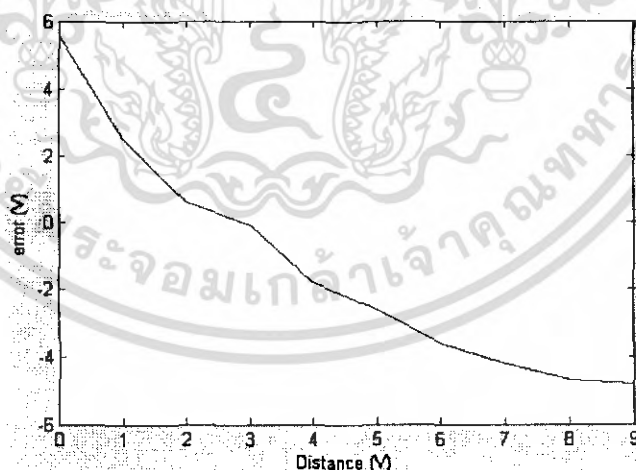
4.2.4 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบ(เปรียบเทียบตำแหน่ง)

วงจรที่ใช้ในการทดสอบดูได้จากภาคผนวก ค

ตารางที่4.4 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบ ผลต่างของตำแหน่งอ้างอิงกับตำแหน่งของลูกบอล

ตำแหน่งของลูกบอล(V)	ตำแหน่งอิง (V)	ผลต่าง(คำนวณ)(V)	ค่าที่วัดได้ (V)
0	5	5	5.6
1	5	4	2.5
2	5	3	0.6
3	5	2	0.1
4	5	1	-1.8
5	5	0	-2.6
6	5	-1	-3.6
7	5	-2	-4.2
8	5	-3	-4.7
9	5	-4	-4.8

จากผลการทดลองที่ได้ นำไปพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ จะได้



รูปที่4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง ผลต่างของตำแหน่งอ้างอิงกับตำแหน่งของลูกบอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

5.1 การจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB

จากการหาผลตอบสนองของระบบที่มีตัวควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB พบว่าผลตอบสนองที่ได้ไม่ตรงกับผลตอบสนองที่เราต้องการ แม้ว่าสมการคุณลักษณะของระบบที่พิจารณาจะเหมือนกับสมการคุณลักษณะของโพลที่เรากำหนดขึ้นมา แต่การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพลนี้ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพและให้ผลตอบสนองของระบบ ใกล้เคียงกับผลตอบสนองที่เราต้องการ

5.2 การทดสอบส่วนต่างๆของระบบ

จากการศึกษาส่วนต่างๆของระบบพบว่า ส่วนที่สำคัญของระบบคือส่วนของวงจรถนเซอร์ตำแหน่งของลูกบอล เพราะถ้าหากไม่สามารถวัดตำแหน่งของลูกบอลได้ จะทำให้ระบบไม่สามารถทำงานได้ และจากการทดสอบวงจรถนเซอร์ตำแหน่งของลูกบอล ให้ผลการทดสอบคือ ค่าที่ได้จากวงจรถนเซอร์ให้ค่าไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วงของความยาวตัวเซนเซอร์

เนื่องจากการติดตั้งหลอดความร้อนให้เป็นวงจรถนเซอร์แรงดัน แรงดันที่จุดเริ่มต้นและจุดปลายเป็นไปตามที่คำนวณไว้ แต่เมื่อนำไปปรับช่วงโดยเข้าวงจรถนเซอร์ zero-span และบันทึกผลที่ตำแหน่งต่างๆ ผลที่เกิดขึ้นไม่เป็นไปตามที่คำนวณไว้คือ ที่จุดเริ่มต้นต้องการให้มีแรงดันออกมา 0 volt แต่วงจรถนเซอร์ให้ผลออกมา 0.05 volt และเมื่อเพิ่มระยะทางจนถึงช่วง 70 cm ได้แรงดันเป็น 9.8 volt และเมื่อเพิ่มระยะทางต่อไป แรงดันจะคงที่อยู่ที่ 9.8 volt จนถึงจุดสุดท้าย ผลที่เกิดขึ้นอาจเกิดได้หลายสาเหตุคือ

1. แรงดันที่ออกมาจากส่วนของวงจรถนเซอร์แรงดัน ให้ค่าแรงดันออกมาไม่ตรงกับความเป็นจริง ซึ่งเกิดจากค่าความต้านทานของหลอดความร้อนเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เพราะความร้อนที่เกิดในหลอดทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปด้วย

2. อัตราส่วนของ $\frac{R_f}{R_i} = \frac{R_f}{R_o} \neq \frac{10}{2.056}$ ดังที่ได้คำนวณไว้ ทำให้อัตราขยายผิดเพี้ยน ผลที่ได้

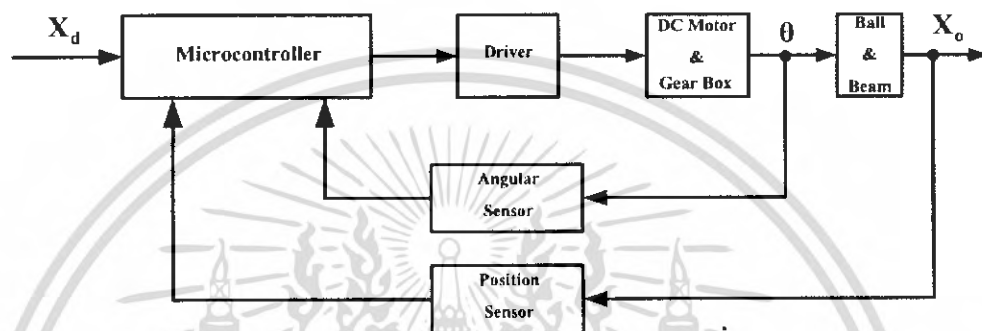
ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ

3. แรงดัน V_f ที่เป็นแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรถนเซอร์ไม่ตรงตามที่คำนวณ อาจเป็นเพราะผลที่ได้จากการอ่านของมิเตอร์ ไม่ตรงกับแรงดันจริง

4. แหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ในการทดลอง ให้แรงดันออกมาไม่สม่ำเสมอ (เพราะเกิดการสูญเสียกระแสไปในวงจรแบ่งแรงดันมากเกินไป)

5.3 ข้อเสนอแนะ

ควรออกแบบวงจรเซนเซอร์ตำแหน่งของลูกบอลใหม่ โดยให้ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของลวดความร้อน ไปเป็นส่วนหนึ่งในวงจร Bridge Amplifier ซึ่งให้แรงดันออกมาเป็นเชิงเส้นกว่า และใช้ Microcontroller เป็นตัวควบคุม ดับล็อกไดอะแกรมของระบบที่แนะนำ



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมระบบใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

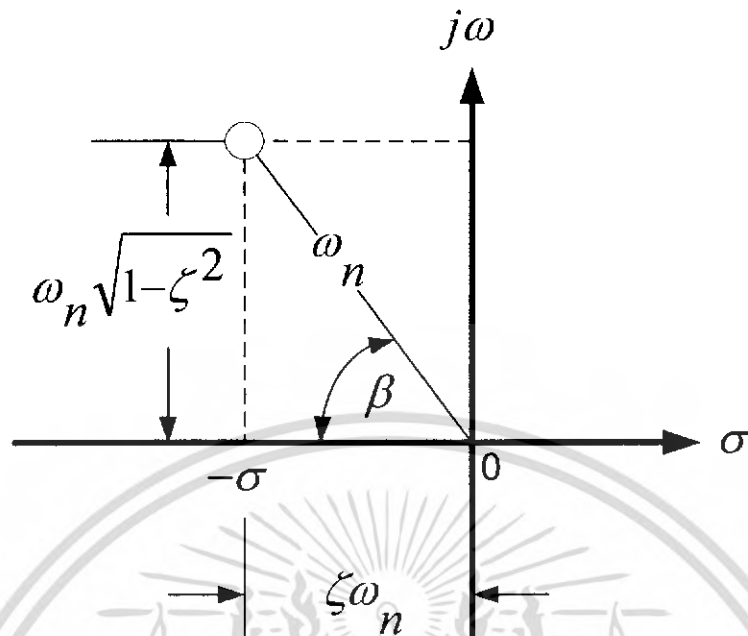
เอกสารอ้างอิง

- [1] An Straushen , **Design of control systems for DC driver** , Springer-Verlag , 1990.
- [2] Benjamin C.Kao, Farid Golnaraghi. **Automatic Control System** , Eight Edition, John Wiley & Son;Inc. 2003.
- [3] Chanat La-orpacharapan .”**Shaped Time-Optimal Closed-Loop Servomechanisms**”
B.S. King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang.1995,
M.S.University of Colorado,1998.
- [4] Douglas C.giancoli. **Physics For Scientists Engineers** , Third Edition, Prentice Hall International, Inc 2000.
- [5] Friedrich Froler , **Introduction to Electronic Control Engineering** , Wiley eastern limited,1982.
- [6] Katsuhiko Ogata. **Modern Control Engineering** , Fourth Edition, Prentice-Hall International, Inc 1992.
- [7] Katsuhiko Ogata. **System Dynamics** , Second Edition, Prentice-Hall International, Inc 2000.
- [8] Paul. Fishbane ,Stephen Gasiorowicz ,Stephen T.Thorntow. **Physics For Scientists an Engineers** ,second Edition,Prentice Hall 1996.
- [9] Richard D.Klafter ,Thomas A.Chmielewski, Michale Negin. **Robotic Engineering**, Prentice Hall 1989.
- [10] <http://www.control-system-principle.co.uk/whaitpapers/ball-and-beam1.pdf>
- [11] [http://www .engine.umich.edu/group/otm/examples/ball/ball.html](http://www.engine.umich.edu/group/otm/examples/ball/ball.html)
- [12] <http://www.library.cmu.edu/ctms/ctms/ctms/examples/ball/digbbid.htm>
- [13] <http://www.fecquip.com/TQ%20PRODUCT%20AREAS/TQCONTROL/EE106/!ce106.htm>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความสัมพันธ์ของ ζ กับ ω_n ที่เป็นตัวกำหนดตำแหน่งโพล

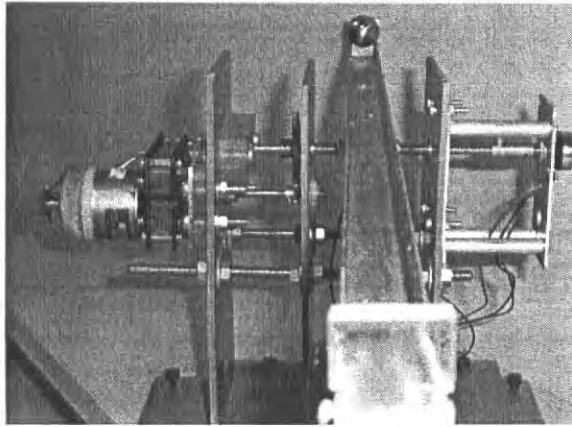
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

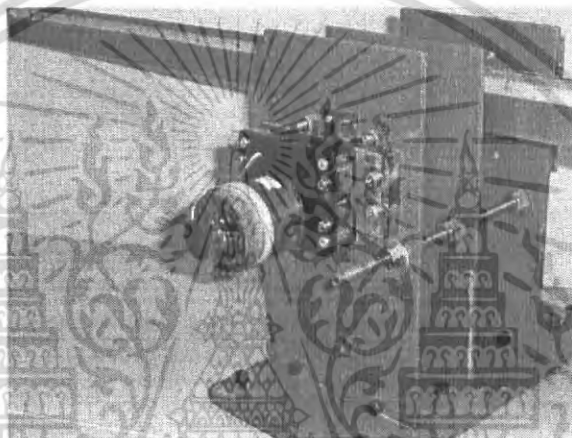
๑



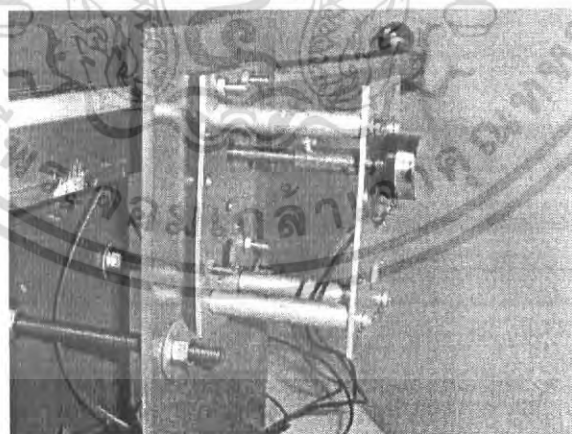
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ลักษณะโดยรวมของลูกบอล,คาน, โปเทนชิโอมิเตอร์,ดีซีมอเตอร์และเกียร์บล็อก



ลักษณะการติดตั้งดีซีมอเตอร์

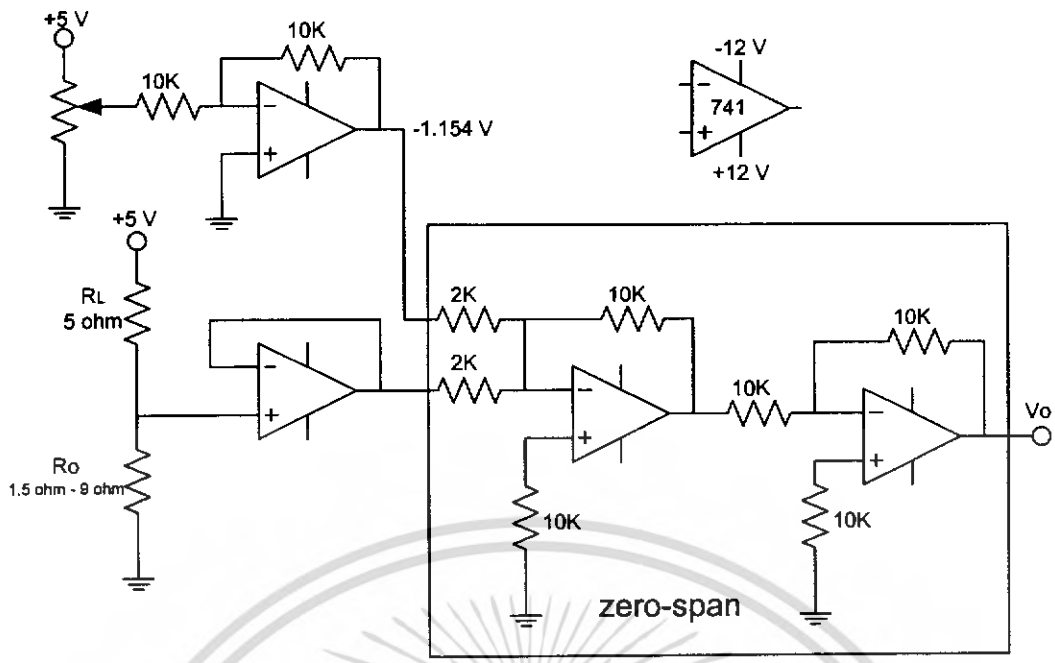


ลักษณะการติดตั้งโปเทนชิโอมิเตอร์

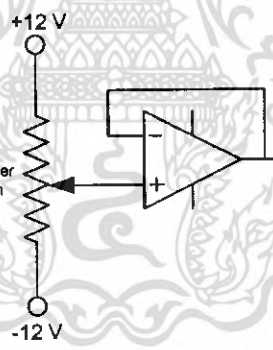
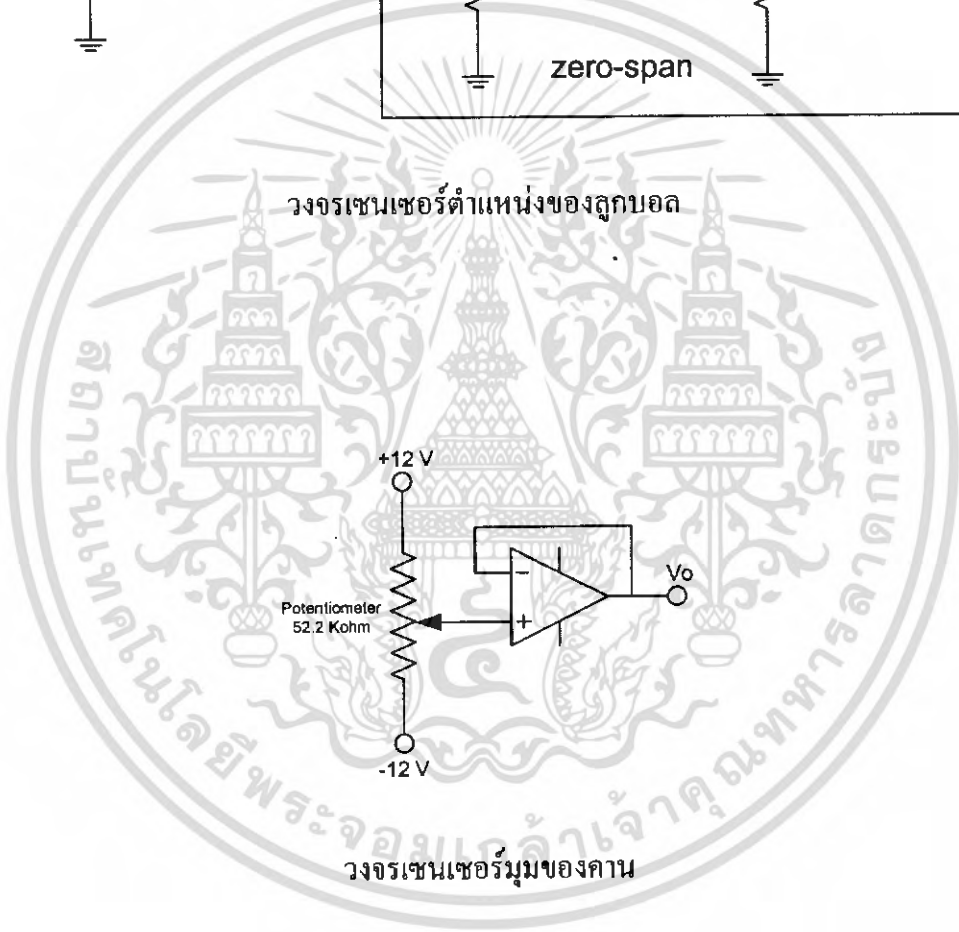
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

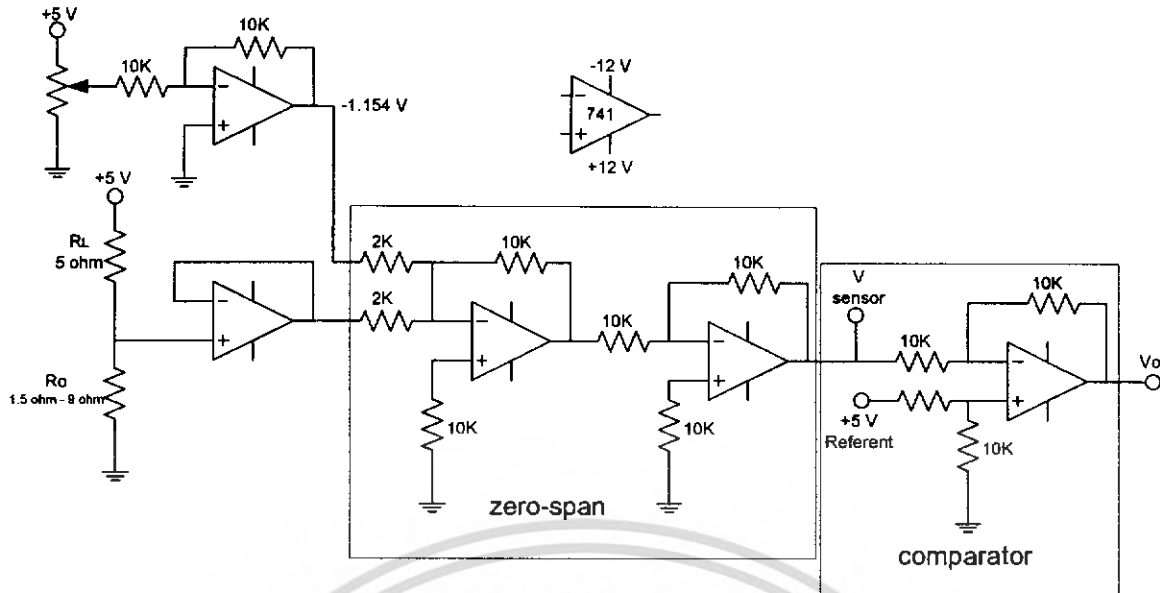


วงจรเซนเซอร์ตำแหน่งของลูกบอล



วงจรเซนเซอร์มุมของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วงจรเปรียบเทียบ(เปรียบเทียบตำแหน่ง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้