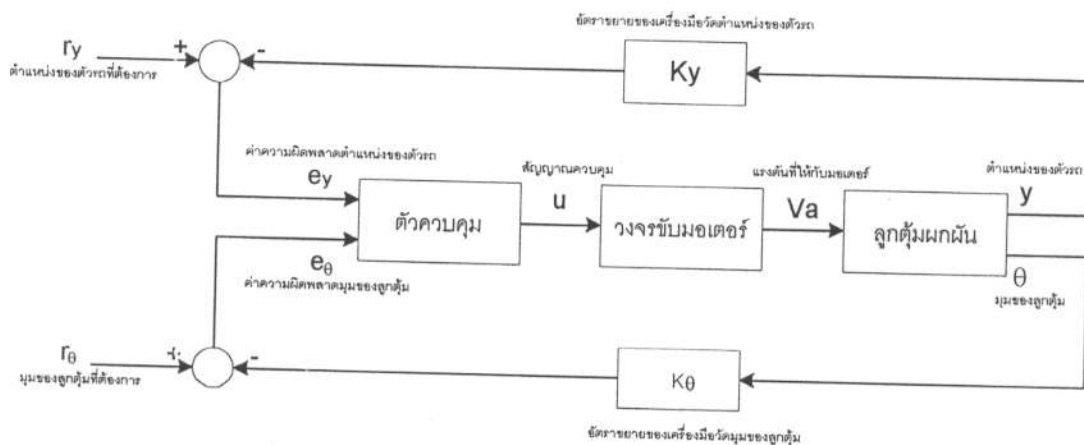


บทที่ 5

ผลการทดสอบ

การทดสอบการควบคุมลูกตุ้มผกผัน เป็นการทดสอบเพื่อดูว่า วิธีการควบคุมที่ออกแบบไว้ แล้วนั้น สามารถควบคุมลูกตุ้มผกผัน ในทางปฏิบัติให้มีเสถียรภาพ และ มีผลตอบสนองทางเวลาที่ดี ได้หรือไม่

การทดสอบเริ่มต้นโดยการนำสัญญาณที่วัดตำแหน่งของตัวรถ และวัดมุมของลูกตุ้ม มาป้อนกลับโดยผ่านตัวควบคุมที่สร้างขึ้นจากวงจรรวมในภาพที่ 4.15 ซึ่งเอาต์พุตของตัวควบคุม จะเป็นสัญญาณควบคุม เพื่อทำให้ลูกตุ้มผกผันประพฤติตัวเป็นระบบที่มีเสถียรภาพ เนื่องจากลูกตุ้มผกผัน ใช้ดีซีมอเตอร์ในการขับเคลื่อนตัวรถให้เคลื่อนที่ แต่สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุม ไม่สามารถจ่ายกระแสได้มากพอที่จะทำให้ดีซีมอเตอร์ขับเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องต่อสัญญาณควบคุมผ่านวงจรขับมอเตอร์ เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์ได้มากขึ้น โดยลักษณะของการต่อระบบป้อนกลับ เพื่อที่ควบคุมลูกตุ้มผกผัน แสดงในภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 แสดงการต่อระบบป้อนกลับเพื่อควบคุมลูกตุ้มผกผัน

ก่อนการทดสอบการควบคุมลูกตุ้มผกผัน ควรจะทดสอบวงจรขับมอเตอร์ เพื่อที่จะได้ทราบค่าของอัตราขยายของวงจรขับมอเตอร์ในทางปฏิบัติ เพื่อที่จะใช้ค่าของอัตราขยายของวงจรขับมอเตอร์ไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม และควรทดสอบการทำงานของตัวควบคุมเสียก่อน เพราะบางทีตัวควบคุมที่สร้างขึ้นนั้น อาจจะทำให้เกิดสัญญาณควบคุมที่ไม่ถูกต้องเท่าที่ควร ดังนั้นควรทำการตรวจสอบให้แน่ใจว่าตัวควบคุม สามารถให้สัญญาณที่ถูกต้องเสียก่อน

5.1 การทดสอบวงจรขั้วมอเตอร์

การทดสอบวงจรขั้วมอเตอร์ เป็นการทดสอบหาอัตราการขยายของวงจรขั้วมอเตอร์ในทางปฏิบัติ เพื่อที่จะนำค่าที่ได้ไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม เนื่องจากสัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุม มีค่าสูงสุดเพียง ± 13.5 โวลต์ แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้ดีซีมอเตอร์ ขนาด 24 โวลต์ ซึ่งแรงดันขนาดนี้อาจทำให้มอเตอร์มีความเร็ว ไม่เพียงพอที่จะควบคุมลูกตุ้มผกผันได้ ดังนั้นจึงสร้างวงจรขั้วมอเตอร์ที่มีอัตราการขยายประมาณ 2 เท่าเพื่อที่จะทำให้มอเตอร์ทำงานได้เร็วขึ้น เป็นการขยายขีดความสามารถในการขับเคลื่อนของตัวรถนั่นเอง เนื่องจากวงจรขั้วมอเตอร์ทำจากวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ ก็ต้องมีการเกิดแรงดัน drop ภายในวงจรทำให้อัตราการขยายลดลง อีกทั้งเมื่อต่อคร่อมมอเตอร์ ก็ทำให้เกิดแรงดัน drop เหมือนกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับโหลดของมอเตอร์ ดังนั้นควรทดสอบวงจรขั้วมอเตอร์ เพื่อที่จะทำให้ทราบอัตราการขยายของวงจรขั้วมอเตอร์ในทางปฏิบัติ

การทดสอบทำได้โดยการป้อนแรงดันเข้าที่ขาอินพุทของวงจรขั้วมอเตอร์ และวัดแรงดันคร่อมที่ขาเอาต์พุท ก็สามารถทราบอัตราการขยายของวงจรขั้วมอเตอร์ได้ ซึ่งผลการทดสอบสามารถแสดงได้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบวงจรขั้วมอเตอร์

อินพุท	เอาต์พุท	อัตราขยาย
1.0	1.6	1.60
1.5	2.5	1.67
2.0	3.6	1.80
2.5	4.5	1.80
3.0	5.5	1.83
3.5	6.6	1.88
4.0	7.6	1.90
4.5	8.6	1.91
5.0	9.6	1.92
5.5	10.6	1.92
6.0	11.5	1.91
6.5	12.6	1.93

อินพุท	เอาต์พุท	อัตราขยาย
-1.0	-0.6	0.60
-1.5	-1.8	1.20
-2.0	-2.6	1.30
-2.5	-3.7	1.48
-3.0	-4.6	1.53
-3.5	-5.6	1.60
-4.0	-6.6	1.65
-4.5	-7.6	1.68
-5.0	-8.5	1.70
-5.5	-9.5	1.72
-6.0	-10.6	1.76
-6.5	-11.6	1.78

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบวงจรรีบมอเตอร์ (ต่อ)

ทดสอบวงจรรีบมอเตอร์ทางบวก		
อินพุต	เอาต์พุต	อัตราขยาย
7.0	13.5	1.92
7.5	14.7	1.96
8.0	15.5	1.93
8.5	16.6	1.95
9.0	17.5	1.94
9.5	18.5	1.94
10.0	19.5	1.95
10.5	20.6	1.96
11.0	21.5	1.95
11.5	22.6	1.96
12.0	23.3	1.94
12.5	23.9	1.91
13.0	24.4	1.87
13.5	24.8	1.83
ค่าเฉลี่ย		1.89

ทดสอบวงจรรีบมอเตอร์ทางลบ		
อินพุต	เอาต์พุต	อัตราขยาย
-7.0	-12.5	1.78
-7.5	-13.5	1.80
-8.0	-14.5	1.81
-8.5	-15.6	1.83
-9.0	-16.6	1.84
-9.5	-17.6	1.85
-10.0	-18.6	1.86
-10.5	-19.5	1.85
-11.0	-20.5	1.86
-11.5	-21.4	1.86
-12.0	-22.3	1.85
-12.5	-23.4	1.87
-13.0	-24.3	1.86
-13.5	-25.3	1.87
ค่าเฉลี่ย		1.70

ดังนั้นอัตราขยายของวงจรรีบมอเตอร์เฉลี่ยทั้งด้านบวกและด้านลบ คือ 1.80

5.2 การทดสอบตัวควบคุม

การทดสอบตัวควบคุม ก็เพื่อตรวจสอบสัญญาณควบคุม ที่ได้จากตัวควบคุมนั้น ว่ามีความถูกต้องพอที่นำไปควบคุมลูกตุ้มผกผัน ได้หรือไม่ ทำได้โดยการต่อสัญญาณที่วัดตำแหน่งของตัวรถ และสัญญาณที่วัดมุมของลูกตุ้มเป็นอินพุตของตัวควบคุม จากนั้นวัดสัญญาณควบคุมที่เอาต์พุตของตัวควบคุม

จากตัวควบคุมที่สร้างขึ้นจากวงจร ที่แสดงในภาพที่ 4.15 เมื่อนำมาทดสอบ จะได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 5.2

หมายเหตุ ในภาพที่ 5.2 ถึง ภาพที่ 5.8 เป็นภาพที่ได้ข้อซิลโคป ซึ่งสัญญาณแต่ละช่อง (Channel) จะใช้แทนสัญญาณดังต่อไปนี้

ช่องที่ 1 เป็นสัญญาณแสดงตำแหน่งของตัวรถ

ช่องที่ 2 เป็นสัญญาณแสดงมุมของลูกตุ้ม

ช่องที่ 3 แสดงสัญญาณควบคุม

ภาพที่ 5.2 แสดงผลสัญญาณควบคุม ที่ไม่ถูกต้องของตัวควบคุม เมื่ออินพุทเป็นศูนย์ จากภาพที่ 5.2 เมื่อสัญญาณแสดงตำแหน่งของตัวรถ มีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือตัวรถอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของราง และสัญญาณแสดงมุมของลูกตุ้ม มีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือมุมของลูกตุ้มอยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกับแนวราบ ซึ่งเป็นจุดสมดุลของลูกตุ้มผกผัน แต่สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุม มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ โดยมีค่าประมาณ -1.2 โวลต์ ดังนั้นถ้านำตัวควบคุมนี้ไปควบคุมการทำงานของลูกตุ้มผกผัน จะเห็นได้ว่าจะไม่สามารถควบคุมลูกตุ้มผกผัน ให้มีเสถียรภาพได้ เพราะว่า ที่จุดสมดุลของลูกตุ้มผกผัน ตัวควบคุมให้สัญญาณควบคุมไม่ถูกต้องนั่นเอง ดังนั้นสัญญาณควบคุมที่ถูกต้อง ควรจะมีค่าเป็นศูนย์

เหตุที่สัญญาณควบคุม มีค่าไม่ถูกต้องนั้น อาจะมาจากหลายสาเหตุ เช่น การใช้ค่าความต้านทานไม่ถูกต้องตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งอาจจะใช้ค่าใกล้เคียง และอาจจะมาจากค่าของ Offset voltage ของตัวออปแอมป์ ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างของแรงดันที่ขา Inverting และขา Noninverting ของตัวออปแอมป์ ดังนั้นควรใช้ออปแอมป์ที่มีค่า Offset voltage น้อย ๆ เพื่อให้สัญญาณควบคุมมีถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ถ้าใช้ออปแอมป์ที่มีค่า Offset voltage น้อย ๆ แล้วสัญญาณควบคุม ยังไม่ถูกต้องเท่าที่ควร วิธีแก้ไขคือ ทำให้ออปแอมป์นั้น สามารถปรับ Offset voltage ได้ ซึ่งสัญญาณที่ได้ทำการปรับแต่งให้ถูกต้องแสดงในภาพที่ 5.3

ภาพที่ 5.3 แสดงผลสัญญาณควบคุม ที่ถูกต้องของตัวควบคุม เมื่ออินพุตเป็นศูนย์

5.3 การทดสอบการควบคุมลูกตุ้มผกผัน

การทดสอบการควบคุมลูกตุ้มผกผัน เพื่อทดสอบดูว่า ลูกตุ้มผกผันมีเสถียรภาพ และมีผลตอบสนองทางเวลา ดีเหมือนตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ การทดสอบจะทำในกรณีต่าง ๆ คือ กรณีที่ลูกตุ้มผกผันมีการรบกวนจากภายนอก กรณีที่จุดเริ่มต้นไม่ได้อยู่ที่จุดสมดุล และในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราขยาย

ก่อนการทดสอบการควบคุมลูกตุ้มผกผัน ลองทดสอบในกรณีที่ไม่ได้มีการควบคุม ว่า ลูกตุ้มผกผันจะประพฤติตัวอย่างไร การทดสอบทำได้โดย ให้แรงภายนอกกระทำกับลูกตุ้มผกผัน ในขณะที่ลูกตุ้มผกผันอยู่ที่จุดสมดุล ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 5.4

จากภาพที่ 5.4 จะเห็นได้ว่า เมื่อให้แรงภายนอกกระทำกับลูกตุ้มผกผัน ก็จะทำให้ตำแหน่งของตัวรถเปลี่ยนไป และมุมของลูกตุ้มก็เปลี่ยนไปด้วย เมื่อไม่ได้มีการควบคุม ตัวรถจะไปหยุดที่ตำแหน่งใหม่ ไกลหรือใกล้จากตำแหน่งเดิม ขึ้นอยู่กับแรงภายนอกที่มากระทำ ส่วนลูกตุ้มก็จะล้มนั่นเอง

ภาพที่ 5.4 แสดงผลตอบสนองของลูกตุ้มผกผัน ที่ยังไม่ได้มีการควบคุม
เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ

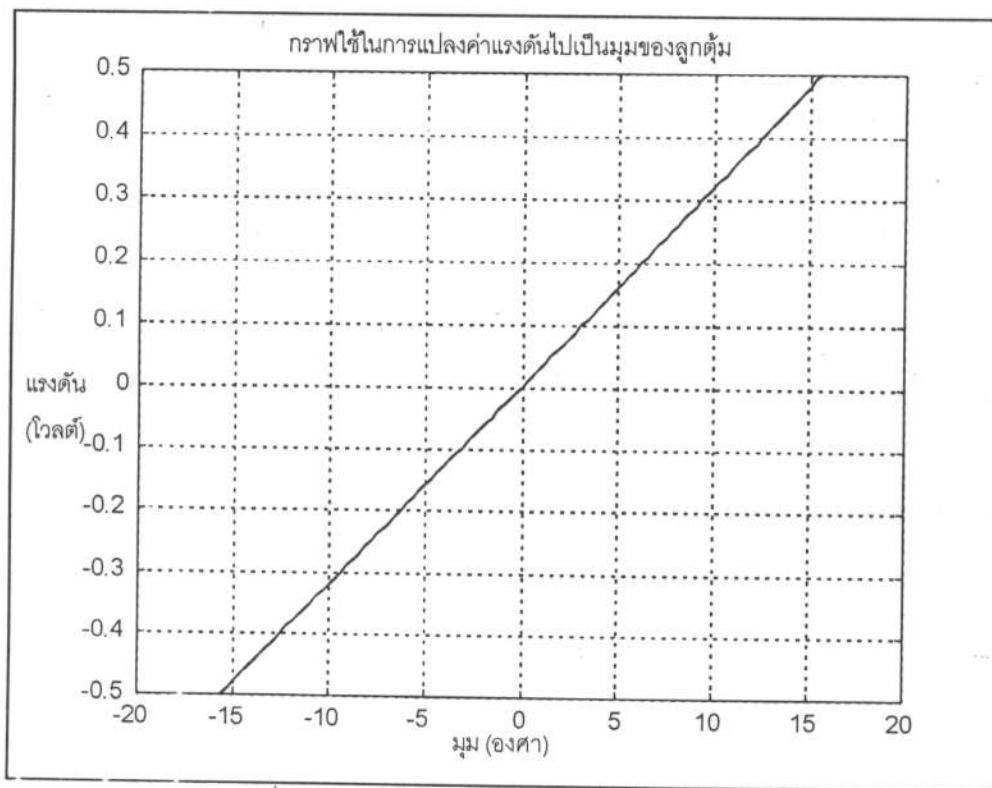
การทดสอบการควบคุมลูกตุ้มผกผัน จะใช้ตัวควบคุมที่สร้างขึ้นจากวงจรในภาพที่ 4.16 เป็นตัวทดสอบการควบคุม เพราะว่าสามารถปรับอัตราขยายของตัวควบคุมได้ เพื่อให้การควบคุมมีเสถียรภาพ และผลตอบสนองดีขึ้น ซึ่งสามารถปรับน้ำหนักของการควบคุมแต่ละตัวได้ โดยที่อัตราขยายที่ได้จากการออกแบบนั้น บางทีอาจจะควบคุมลูกตุ้มผกผันได้ไม่ดีนัก อาจจะเป็นเพราะค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไม่ถูกต้องเท่าที่ควร หรืออาจเป็นเพราะมีค่าบางตัวที่ไม่ได้คิด เช่น ความฝืด เป็นต้น ดังนั้นการปรับแต่งตัวควบคุมทำเพื่อ ให้ลูกตุ้มผกผันมีเสถียรภาพ และผลตอบสนองทางเวลา ตามที่ต้องการได้

การทดสอบการควบคุมลูกตุ้มผกผัน ทำได้โดยการต่อวงจรการควบคุม ตามภาพที่ 5.1 ซึ่งเป็นการควบคุมแบบลูปปิด แล้วทำการทดสอบในกรณีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

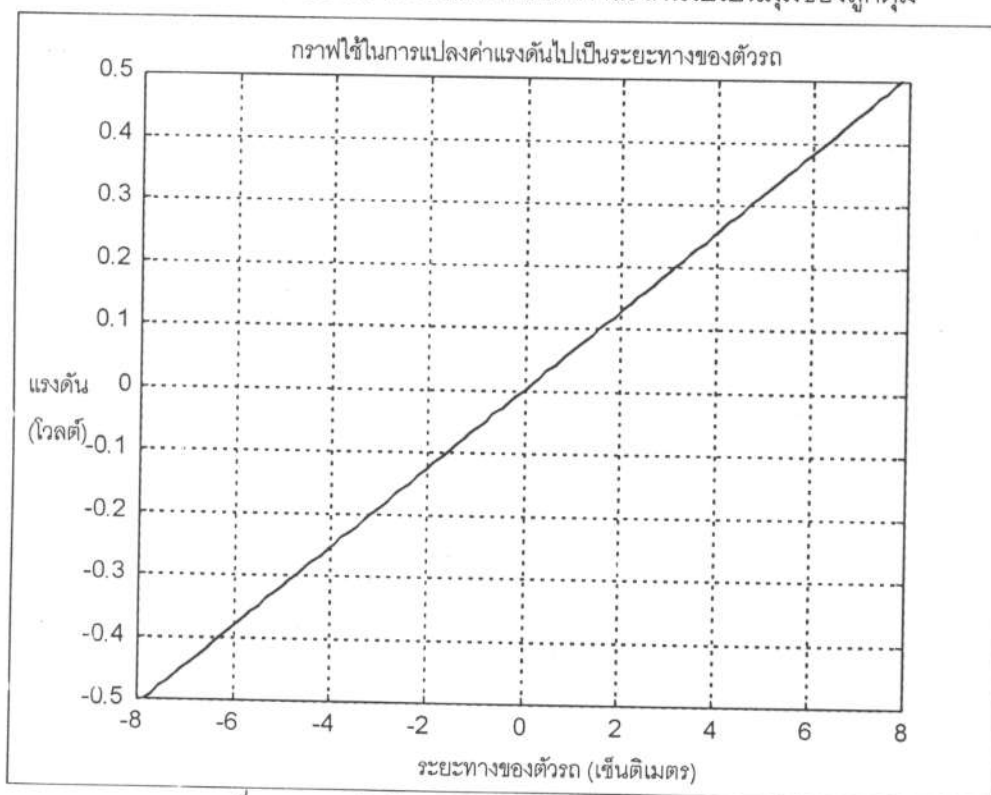
หมายเหตุ

1. ค่าแรงดันที่อ่านได้จากโพเทนชิออร์มิเตอร์ สามารถแปลงไปเป็นมุมของลูกตุ้ม ได้โดยการคูณด้วยค่าคงที่ 0.54 กับแรงดันที่อ่านค่าได้ หน่วยที่ได้จะเป็น เรเดียน (rad) ถ้าต้องการแปลงเป็นองศา ก็คูณด้วยค่าคงที่ 57.29 เข้าไปอีก

2. การแปลงจากค่าแรงดันไปเป็นตำแหน่งของตัวรถ ทำได้โดยการคูณค่าคงที่ 15.71 เข้ากับค่าแรงดันที่อ่านได้ โดยถ้าคูณด้วยค่าคงที่นี้หน่วยที่ได้ จะเป็นเซนติเมตร เมื่ออัตราขยายของโพเทนชิออร์มิเตอร์ที่วัดตำแหน่งของตัวรถ มีค่าเท่ากับ 6.366 volt/meter



ภาพที่ 5.5 กราฟที่ใช้ในการแปลงค่าแรงดันไปเป็นมุมของลูกตุ้ม

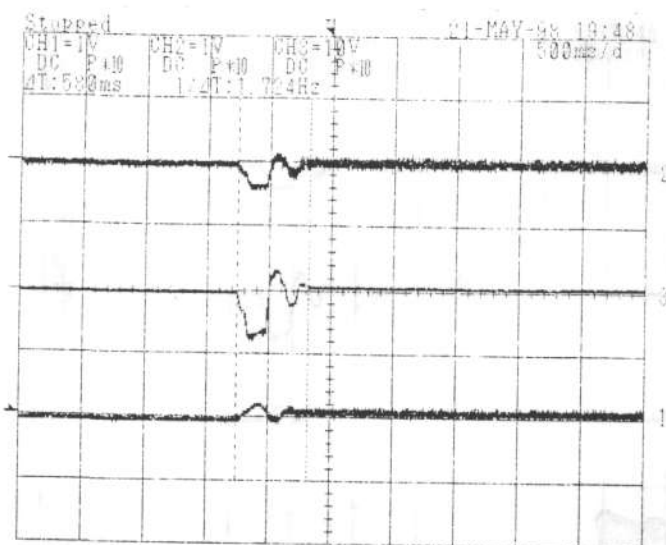


ภาพที่ 5.6 กราฟที่ใช้ในการแปลงค่าแรงดันไปเป็นระยะทางของตัวรถ

5.3.1 การทดสอบในกรณีที่มีแรงภายนอกมากระทำ

การทดสอบทำได้โดยให้แรงภายนอกกระทำกับลูกตุ้มผกผัน ในขณะที่ลูกตุ้มผกผันอยู่ในสภาวะสมดุล ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 5.7

จากภาพที่ 5.7 จะเห็นได้ว่า ในขณะที่ลูกตุ้มผกผันอยู่ในสภาวะสมดุล ถ้ามีแรงภายนอกมากระทำ ลูกตุ้มผกผันก็จะพยายามปรับตัวเองให้เข้าสู่จุดสมดุลเสมอ โดยใช้เวลาสู่สมดุล (Settling time) ประมาณ 0.58 วินาที



ภาพที่ 5.7 แสดงผลตอบสนองของลูกตุ้มผกผัน เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ

จากการทดสอบ โดยให้แรงภายนอกมากระทำกับลูกตุ้มผกผันต่างกัน ผลปรากฏว่า ถ้าแรงภายนอกที่มากระทำกับลูกตุ้มผกผันนั้นมีค่าไม่มากนัก ลูกตุ้มผกผันก็สามารถปรับตัวเองให้เข้าสู่จุดสมดุลได้เสมอ แต่ถ้าแรงภายนอกมากระทำมากเกินไป ลูกตุ้มผกผันก็ไม่สามารถปรับตัวเองให้เข้าสู่จุดสมดุลได้

5.3.2 การทดสอบในกรณีที่จุดเริ่มต้นไม่ได้อยู่ที่จุดสมดุล

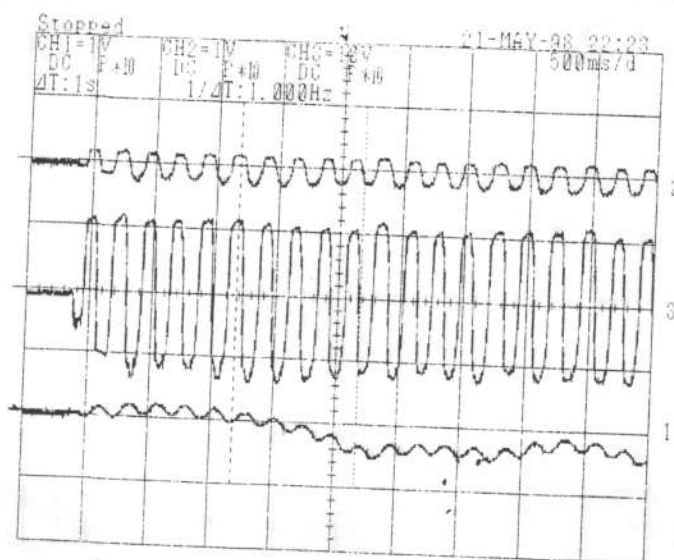
การทดสอบจะทดสอบในกรณีที่มุมของลูกตุ้มไม่ได้อยู่ที่จุดสมดุล ทำได้โดยเอียงลูกตุ้มไว้ที่มุม ที่ไม่ใช่จุดสมดุล จากนั้นก็ทำการควบคุม ผลการควบคุมแสดงในภาพที่ 5.8

จากภาพที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าถ้ามุมเริ่มต้นของลูกตุ้มก่อนทำการควบคุมไม่ได้อยู่ที่ จุดสมดุล เมื่อทำการควบคุม ลูกตุ้มผกผันก็จะพยายามปรับมุมของลูกตุ้ม ให้มาอยู่ที่จุดสมดุล

จากการทดสอบ ถ้าให้มุมเริ่มต้นของลูกตุ้ม ก่อนการควบคุมเป็นมุมเอียงมากเกินไป เมื่อทำการควบคุม ลูกตุ้มผกผันก็ไม่สามารถ ทำให้มุมของลูกตุ้มเข้าสู่จุดสมดุลได้

5.3.3.2 ผลของการปรับอัตราขยายการควบคุมมุมของลูกตุ้ม

การปรับอัตราขยายการขยายนี้ เป็นการปรับน้ำหนักการควบคุมของมุมของลูกตุ้ม ถ้าให้น้ำหนักน้อยเกินไป ก็จะทำให้การควบคุมช้าเกินไป ไม่ทันความเร็วในการลំของลูกตุ้ม แต่ถ้าเพิ่มน้ำหนักการควบคุมมากขึ้น ก็จะทำให้การควบคุมเร็วขึ้น แต่ถ้าให้น้ำหนักมากเกินไปก็จะทำให้เกิดการแกว่งมากขึ้นด้วย ดังนั้นการให้น้ำหนักการควบคุมของมุมของลูกตุ้ม ต้องให้เหมาะสม โดยการให้น้ำหนักการควบคุมมุมของลูกตุ้มมากเกินไป ผลการควบคุมเมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำ แสดงในภาพที่ 5.9



ภาพที่ 5.9 แสดงผลการควบคุม เมื่อให้น้ำหนักการควบคุมมุมของลูกตุ้ม มากเกินไป

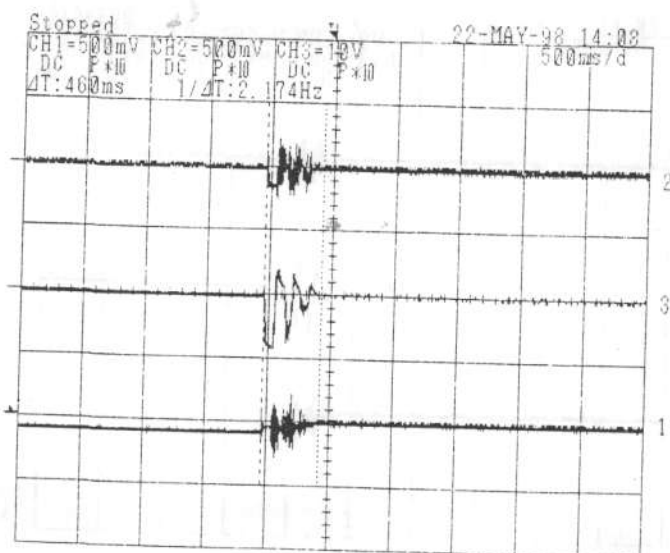
จากภาพที่ 5.9 จะเห็นได้ว่า ถ้าให้น้ำหนักการควบคุมมุมของลูกตุ้ม มากเกินไป เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำ ลูกตุ้มผกผันก็พยายามปรับตัวให้เข้าสู่จุดสมดุล แต่เนื่องจากแรงที่ใช้ในการควบคุมไม่เหมาะสม จึงทำให้เกิดการแกว่งของระบบได้

5.3.3.3 ผลของการปรับอัตราขยายการควบคุมมุมของความเร็วของตัวรถ

การปรับอัตราขยายนี้ จะเป็นการให้น้ำหนักการควบคุมกับความเร็วของตัวรถ เพื่อให้ทำให้ตัวรถเข้าสู่จุดสมดุลเร็วขึ้น เพราะถ้าให้น้ำหนักการควบคุมน้อยเกินไป ก็จะทำให้ตัวรถเคลื่อนที่ช้า อาจจะไม่ทันการลัมของลูกตุ้ม อีกทั้งความผิดพลาดของตำแหน่งของตัวรถมากด้วย การเพิ่มอัตราขยาย ก็จะทำให้ลูกตุ้มผกผันประพัตติตัวเร็วขึ้น และทำให้ความผิดพลาดของตำแหน่งของตัวรถลดลงด้วย

5.3.3.4 ผลของการปรับอัตราขยายการควบคุมมุมของความเร็วของลูกตุ้ม

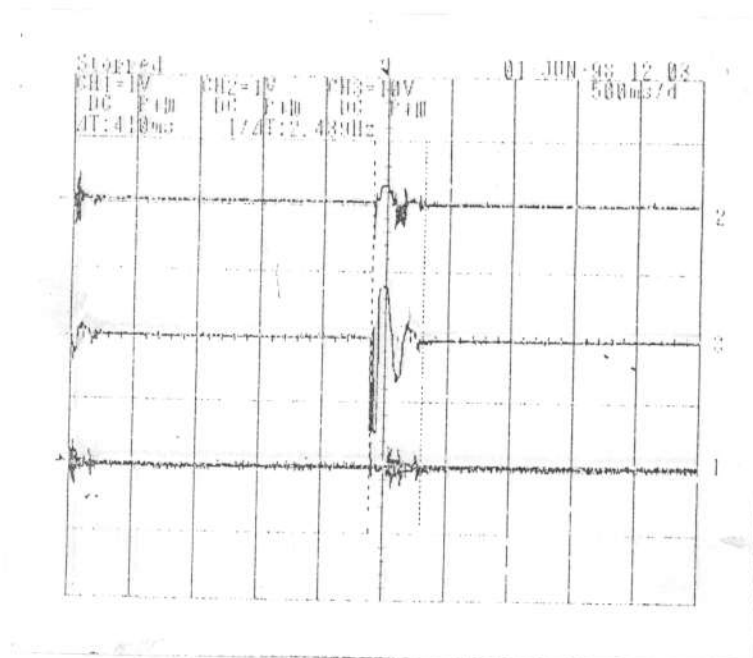
ถ้าเพิ่มอัตราขยายนี้ ก็จะทำให้ผลตอบสนองของการควบคุมเร็วขึ้น แต่ก็เกิดการแกว่งมากขึ้นด้วย แต่มุมก็ลูกตุ้มก็มีความถูกต้องมากขึ้นด้วย แต่ถ้ามากเกินไปก็จะแกว่งมาก ก็ควบคุมไม่ได้ แต่ถ้าลดอัตราขยายก็จะทำให้ผลตอบสนองของการควบคุมช้าลง ซึ่งผลของการเพิ่มอัตราขยายนี้ แสดงในภาพที่ 5.10



ภาพที่ 5.10 แสดงผลการควบคุม เมื่อเพิ่มอัตราขยายการควบคุมความเร็วของลูกตุ้ม

5.3.4 การทดสอบในกรณีทีอินพุตเป็นสัญญาณอิมพัลส์

การทดสอบทำได้โดยการให้สัญญาณอิมพัลส์ เป็นสัญญาณอินพุต ในขณะที่ลูกตุ้มผกผันอยู่ในสภาวะสมดุล ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 5.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณอิมพัลส์ ก็จะมีผลกระทบต่อระบบ แต่ลูกตุ้มผกผันสามารถปรับตัวเองให้เข้าสู่จุดสมดุลได้ โดยใช้เวลาสู่สมดุลประมาณ 1.38 วินาที



ภาพที่ 5.11 แสดงผลตอบสนองของลูกตุ้มผกผันเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณอิมพัลส์