

บทที่ 5

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงการทดลองข่ายงานระบบประสาทและวิธีการประยุกต์ข่ายงานระบบประสาทเพื่อใช้ควบคุมหุ่นยนต์ โดยมีขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นส่วนของการรวบรวมชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทดสอบข่ายงานระบบประสาท ซึ่งทำการรวบรวมจากแบบจำลองสามมิติของหุ่นยนต์ที่สร้างด้วย Open Dynamics Engine ขั้นตอนที่ 2 เป็นส่วนของการทดลองข่ายงานระบบประสาท โดยการพัฒนาโปรแกรมข่ายงานระบบประสาทที่ใช้การฝึกสอนแบบป้อนกลับด้วยภาษาซี เพื่อหาโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ของข่ายงานระบบประสาทที่สามารถจำแนกชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบได้ดีที่สุด ขั้นตอนสุดท้ายคือส่วนของการประยุกต์ข่ายงานระบบประสาทเข้ากับโปรแกรมควบคุมเพื่อควบคุมหุ่นยนต์จริงโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม

5.1 การรวบรวมชุดข้อมูล

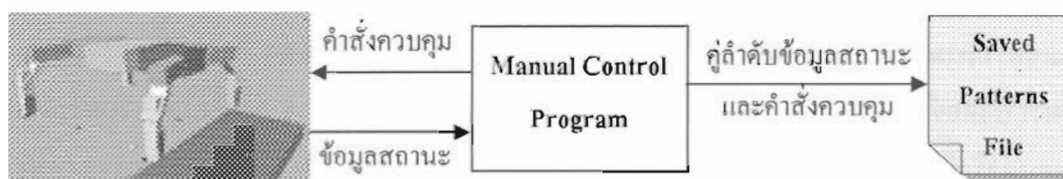
การรวบรวมชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทดสอบข่ายงานระบบประสาท ทำโดยใช้แบบจำลองสามมิติของหุ่นยนต์ที่สร้างด้วย Open Dynamics Engine เพื่อความสะดวกในการใช้งาน เนื่องจากไม่จำเป็นต้องทำการเชื่อมต่อกับหุ่นยนต์จริง โดยแบบจำลองหุ่นยนต์นั้นได้ทำการสร้างให้มีส่วนของเซ็นเซอร์ตรวจจับการชนทั้ง 8 จุด อยู่ในตำแหน่งเดียวกับเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์จริง เพื่อให้สามารถใช้แบบจำลองหุ่นยนต์ในการรวบรวมชุดข้อมูลได้ สำหรับการรวบรวมชุดข้อมูลจะเริ่มจากการทดลองควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้เดินไปข้างหน้า โดยกำหนดรูปแบบท่าทางการเดินให้เป็นแบบเดียวกันตลอดการเดินคือ Crawling Gait การส่งคำสั่งควบคุมจะทำเมื่อหุ่นยนต์อยู่ในสถานะหยุดนิ่งหลังจากปฏิบัติตามคำสั่งก่อนหน้าเสร็จเรียบร้อยแล้ว หรือหยุดนิ่งเนื่องจากเซ็นเซอร์มีการตรวจพบสิ่งกีดขวาง โดยเมื่อหุ่นยนต์อยู่ในสถานะหยุดนิ่ง โปรแกรมจะทำการอ่านค่าพารามิเตอร์ของจุดเชื่อมต่อทั้ง 10 จุด และค่าสถานะของเซ็นเซอร์ 8 ค่า ซึ่งมีจำนวนเท่ากับของหุ่นยนต์จริงคือ 18 ค่าข้อมูลที่เป็นข้อมูลเข้า ค่าที่อ่านได้จะเรียกว่าค่าสถานะท่าทางของหุ่นยนต์ หลังจากนั้นจะทำการเลือกคำสั่งที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้อ่านที่จะส่งผลให้หุ่นยนต์สามารถเดินข้ามสิ่งกีดขวางไปข้างหน้าได้ และบันทึกค่าค่านั้นเก็บไว้

การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์เพื่อรวบรวมชุดข้อมูลทำการทดลอง 12 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 5-1 โดยแต่ละกรณีต่างกันที่ขนาดของสิ่งกีดขวางที่และตำแหน่งที่ตั้ง

ตารางที่ 5-1 การทดลองเพื่อรวบรวมข้อมูลจากแบบจำลองหุ่นยนต์

ลำดับ	ชื่อการทดลอง	แบบของ สิ่งกีดขวาง	ขาที่ใช้ข้ามสิ่งกีดขวาง			
			FR	FL	RR	RL
1	การเดินบนพื้นราบที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง	-				
2	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้าขวา	1	●			
3	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้าซ้าย	1		●		
4	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหลังขวา	1			●	
5	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหลังซ้าย	1				●
6	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาด้านหน้า	2	●	●		
7	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาด้านหลัง	2			●	●
8	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาด้านขวา	2	●		●	
9	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาด้านซ้าย	2		●		●
10	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้าขวาและขาหลังซ้าย	1	●			●
11	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้าซ้ายและขาหลังขวา	1		●	●	
12	เดินข้ามสิ่งกีดขวางทั้ง 4 ขา	3	●	●	●	●

ภาพรวมของระบบการรวบรวมชุดข้อมูลโดยการทดลองควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์แสดงในภาพที่ 5-1 โดยชุดข้อมูลที่รวบรวมได้เป็นเหตุการณ์จริงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเดินข้ามสิ่งกีดขวางของแบบจำลองหุ่นยนต์ของแต่ละกรณี ส่วนข้อมูลในตารางที่ 5-2 เป็นคำอธิบายสถานะต่าง ๆ ที่ใช้ในแผนภาพ State Diagram ซึ่งมีทั้งหมด 26 สถานะ



ภาพที่ 5-1 แผนภาพระบบการรวบรวมชุดข้อมูลจากแบบจำลองหุ่นยนต์

ตารางที่ 5-2 คำอธิบายสถานะที่ใช้ในการเขียน State Diagram

ลำดับ	ชื่อสถานะ	คำอธิบาย
1	Initial State	สถานะเริ่มต้น
2	FR step 1	ขา FR ยกขึ้นที่ระดับ 1
3	FL step 1	ขา FL ยกขึ้นที่ระดับ 1
4	RR step 1	ขา RR ยกขึ้นที่ระดับ 1
5	RL step 1	ขา RL ยกขึ้นที่ระดับ 1
6	FR step 2	ขา FR ยกขึ้นที่ระดับ 2
7	FL step 2	ขา FL ยกขึ้นที่ระดับ 2
8	RR step 2	ขา RR ยกขึ้นที่ระดับ 2
9	RL step 2	ขา RL ยกขึ้นที่ระดับ 2
10	FR at 8	ขา FR อยู่ที่ตำแหน่ง 8
11	FL at 8	ขา FL อยู่ที่ตำแหน่ง 8
12	RR at 2	ขา RR อยู่ที่ตำแหน่ง 2
13	RL at 2	ขา RL อยู่ที่ตำแหน่ง 2
14	FR hit at 2-6	ขา FR ตรวจพบสิ่งกีดขวางในตำแหน่งที่ 2 ถึง 6
15	FR hit at 7-8	ขา FR ตรวจพบสิ่งกีดขวางในตำแหน่งที่ 7 ถึง 8
16	FL hit at 2-6	ขา FL ตรวจพบสิ่งกีดขวางในตำแหน่งที่ 2 ถึง 6
17	FL hit at 7-8	ขา FL ตรวจพบสิ่งกีดขวางในตำแหน่งที่ 7 ถึง 8
18	RR hit at 4-8	ขา RR ตรวจพบสิ่งกีดขวางในตำแหน่งที่ 4 ถึง 8
19	RR hit at 2-3	ขา RR ตรวจพบสิ่งกีดขวางในตำแหน่งที่ 2 ถึง 3
20	RL hit at 4-8	ขา RL ตรวจพบสิ่งกีดขวางในตำแหน่งที่ 4 ถึง 8
21	RL hit at 2-3	ขา RL ตรวจพบสิ่งกีดขวางในตำแหน่งที่ 2 ถึง 3
22	FR down	ขา FR วางลง
23	FL down	ขา FL วางลง
24	RR down	ขา RR วางลง
25	RL down	ขา RL วางลง
26	Move Forward	ถ้าน้ำหนักตัวไปด้านหน้า

ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงการควบคุมแบบจำลองในการทดลองจำนวน 12 การทดลอง ตามรูปแบบที่กำหนดในตารางที่ 5-1 ซึ่งเกี่ยวข้องกับ คำสั่ง ขั้นตอน และรายการ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้อธิบายความหมายของคำดังกล่าวเพื่อความเข้าใจที่ตรงกันดังนี้

คำสั่ง คือ การปรับค่าพารามิเตอร์ของจุดเชื่อมต่อของแบบจำลองเพื่อให้ทำงานเช่นเดียวกับการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ ตัวอย่างของคำสั่ง เช่น M10(0), M5(8), M6(8) และ MF เป็นต้น

ขั้นตอน คือ การกำหนดลำดับของการส่งคำสั่งไปควบคุมแบบจำลอง (หรือควบคุมหุ่นยนต์) เนื่องจากคำสั่งแต่ละคำสั่งจะส่งผลให้สถานะท่าทางของแบบจำลองเปลี่ยนไป ดังนั้นการจะควบคุมแบบจำลองให้เคลื่อนที่ในการทดลองแต่ละสถานการณ์ จึงจำเป็นต้องส่งคำสั่งควบคุมตามลำดับที่เหมาะสม ตัวอย่างขั้นตอน เช่น ขั้นตอนการเดินบนพื้นราบ ประกอบด้วยการใช้คำสั่งจำนวน 12 คำสั่ง คือ M10(0) M10(1) M10(2) M5(8) M6(8) MF M9(0) M9(1) M9(2) M7(2) M8(2) MB แต่ต้องกำหนดลำดับของการส่งคำสั่ง จำนวน 14 ครั้ง ตามลำดับคือ

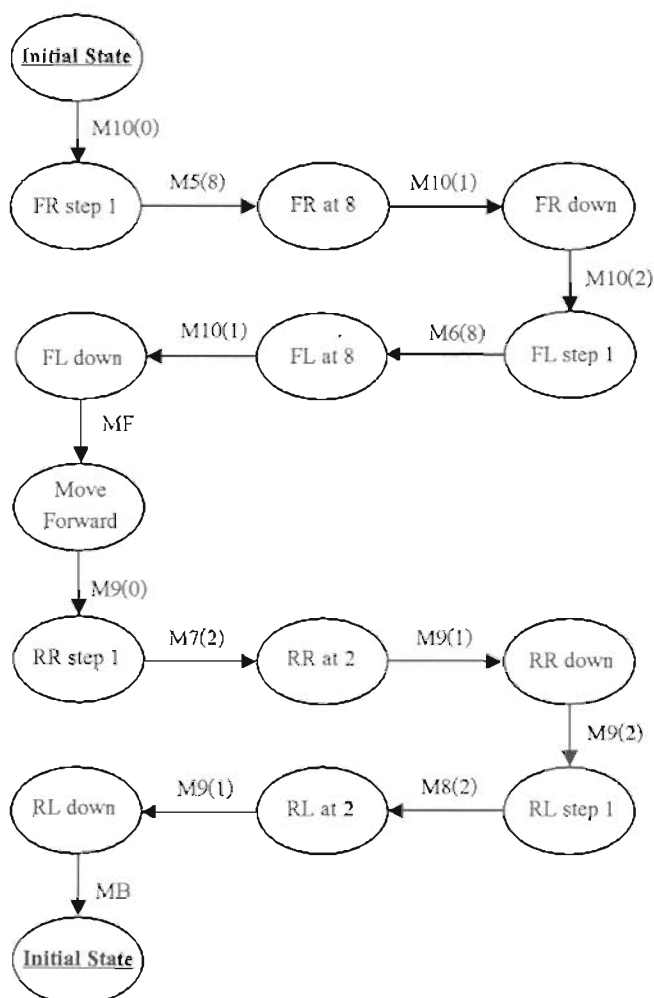
- | | |
|-----------|--|
| 1) M10(0) | เพื่อยกขา FR ขึ้น |
| 2) M5(8) | เพื่อก้าวขา FR ไปที่ตำแหน่ง 8 |
| 3) M10(1) | เพื่อวางขา FR ลง |
| 4) M10(2) | เพื่อยกขา FL ขึ้น |
| 5) M6(8) | เพื่อก้าวขา FL ไปที่ตำแหน่ง 8 |
| 6) M10(1) | เพื่อวางขา FL ลง |
| 7) MF | เพื่อถ่ายน้ำหนักตัวไปด้านหน้า |
| 8) M9(0) | เพื่อยกขา RR ขึ้น |
| 9) M7(2) | เพื่อก้าวขา RR ไปที่ตำแหน่ง 2 |
| 10) M9(1) | เพื่อวางขา RR ลง |
| 11) M9(2) | เพื่อยกขา RL ขึ้น |
| 12) M8(2) | เพื่อก้าวขา RL ไปที่ตำแหน่ง 2 |
| 13) M9(1) | เพื่อวางขา RL ลง |
| 14) MB | เพื่อถ่ายน้ำหนักตัวไปด้านหลังและกลับสู่สถานะเริ่มต้น |

รายการ คือ ลำดับของค่าสถานะท่าทางของหุ่นยนต์กับคำสั่งควบคุม ซึ่งเกิดจากการควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้เดินในการทดลองแบบต่างๆ ที่ทำการบันทึกลงแฟ้มข้อมูลเพื่อใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทดสอบข่ายงานระบบประสาท ตัวอย่างเช่น

8888 2200 11 1111 0000 A//M10(0) ← คือรายการที่บันทึกลงแฟ้มข้อมูล

5.1.1 การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้เดินบนพื้นราบ

การทดลองนี้เริ่มต้นที่ลำดับของข้อมูลสถานะท่าทางของแบบจำลองกับคำสั่งที่เลือกเมื่อส่งคำสั่งควบคุมคำสั่งแรกจากข้อมูลของแบบจำลองที่อยู่ในสถานะเริ่มต้น (Initial State) และสิ้นสุดการทดลองเมื่อสามารถควบคุมแบบจำลองให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและกลับมาอยู่ในสถานะเริ่มต้นอีกครั้ง เรียกว่าเป็นการควบคุมครบ 1 รอบการเดิน (1 Cycle) แม้ว่าจุดเชื่อมต่อแต่ละจุดจะมีค่าตำแหน่งที่เป็นไปได้หลายตำแหน่ง ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1 ตารางที่ 4-2 ส่งผลให้เกิดค่าสถานะท่าทางที่เป็นไปได้จำนวนมาก แต่เมื่อทำการทดลองควบคุมแบบจำลองให้เดินไปข้างหน้าพบว่าในการเดินไปข้างหน้ามีขั้นตอนในการเดินทั้งหมดเพียง 14 ขั้นตอน โดยเริ่มควบคุมการยกขาและก้าวขาตามลำดับจากขา FR FL RR และ RL ภาพที่ 5-2 เป็นภาพของ State Diagram เพื่ออธิบายการเปลี่ยนสถานะของแบบจำลองเมื่อได้รับคำสั่งควบคุม โดยข้อความในวงรีคือสถานะของแบบจำลอง ส่วนข้อความที่กำกับลูกศรคือคำสั่งควบคุม



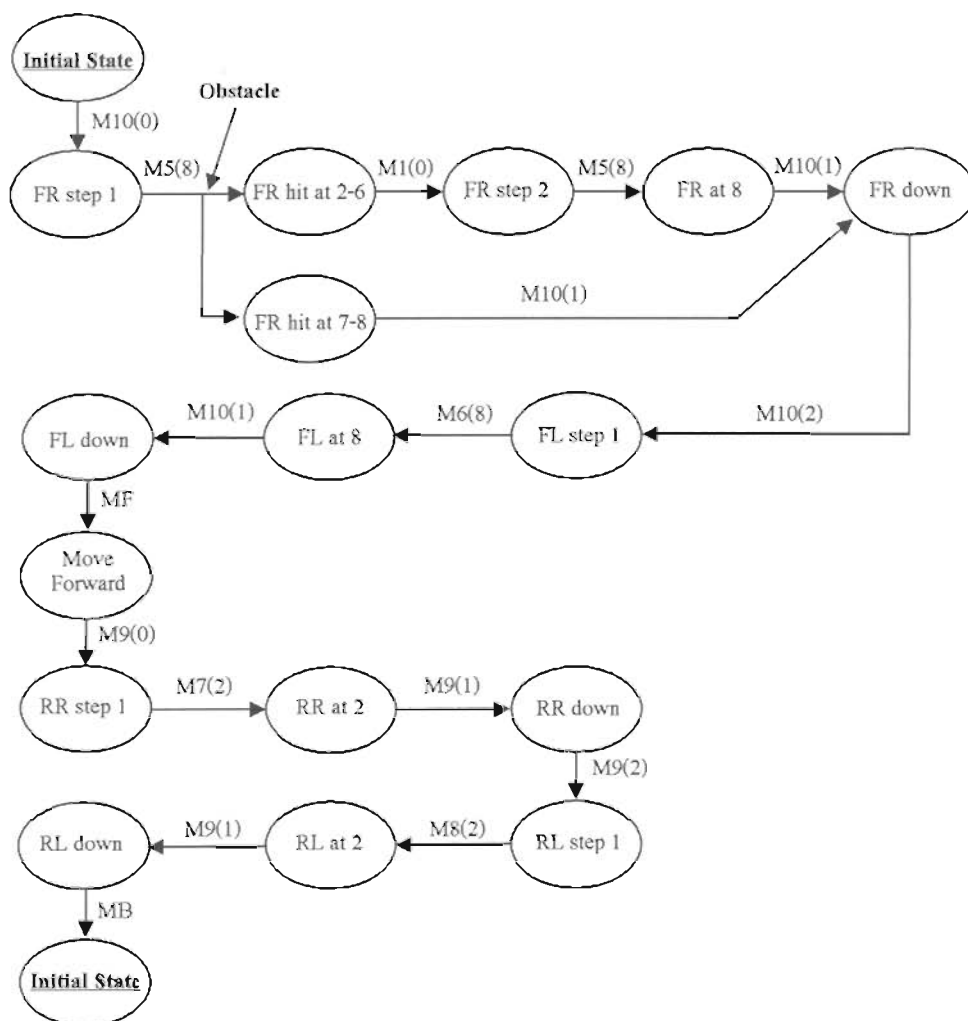
ภาพที่ 5-2 State Diagram การควบคุมแบบจำลองให้เดินบนพื้นราบ

5.1.2 การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้เดินข้ามสิ่งกีดขวางหน้าด้านขวา (FR)

การทดลองนี้ใช้สิ่งกีดขวางแบบที่ 1 ตามที่อธิบายในหัวข้อ 4.2 เริ่มต้นที่กู่ลำดับของข้อมูลเมื่อขา FR ตรวจพบสิ่งกีดขวางและจบการทดลองเมื่อขา FR ก้าวลงจากสิ่งกีดขวางได้ โดยตำแหน่งของการตรวจพบสิ่งกีดขวางที่เป็นไปได้มี 7 ตำแหน่งคือ 2 ถึง 8 ภาพที่ 5-3 แสดงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง



ภาพที่ 5-3 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในการควบคุมแบบจำลองเดินข้ามสิ่งกีดขวางขา FR



ภาพที่ 5-4 State Diagram การตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวางขา FR

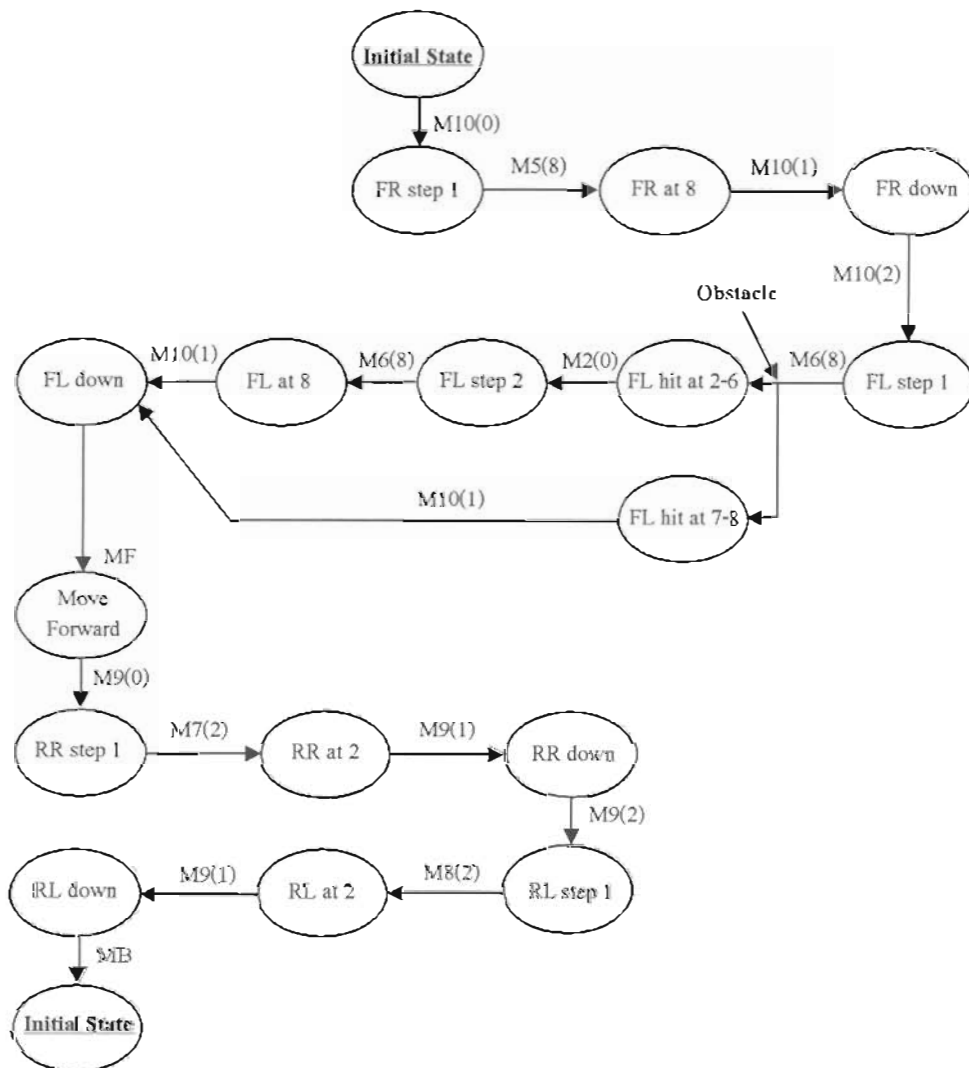
State Diagram ของการตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวางขา FR แสดงในภาพที่ 5-4 โดยมีการควบคุมที่ต่างกัน 2 กรณีในขณะที่ก้าวขา คือ กรณีตรวจพบสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง 2 ถึง 6 จะยกขา FR ให้สูงขึ้นด้วยคำสั่ง M1(0) และก้าวต่อไป แต่ถ้าตรวจพบที่ตำแหน่ง 7 หรือ 8 จะเลือกคำสั่ง M10(1) เพื่อวางขาลง จากการทดลองพบว่าเป็นไปได้ของการควบคุมในเหตุการณ์การตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวางขา FR จำนวน 39 ขั้นตอน การเดินบนสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมแบบเดียวกับการเดินบนพื้นราบ (ต่างกันที่จุดเชื่อมต่อ M1 อยู่ที่ตำแหน่ง 0) จึงมีขั้นตอนการควบคุม 14 ขั้นตอน ส่วนการเดินลงจากสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมเช่นเดียวกับการเดินบนพื้นราบเช่นกันแต่เพิ่มขั้นตอนการวางขา FR ลงด้วยคำสั่ง M1(8) เข้ามา 1 ขั้นตอน ทำให้มีขั้นตอนการควบคุม 15 ขั้นตอน ดังนั้นจึงรวบรวมชุดข้อมูลได้ทั้งหมดเท่ากับ $39 + 14 + 15 = 68$ รายการ

5.1.3 การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้เดินข้ามสิ่งกีดขวางหน้าด้านซ้าย (FL)

การทดลองนี้ใช้สิ่งกีดขวางแบบที่ 1 โดยจะเริ่มบันทึกข้อมูลเมื่อขา FL ตรวจพบสิ่งกีดขวางและจบการทดลองเมื่อขา FL ก้าวลงจากสิ่งกีดขวางได้ ซึ่งตำแหน่งของการตรวจพบสิ่งกีดขวางขา FL จะเป็นไปได้ 7 ตำแหน่งคือ 2 ถึง 8 ภาพที่ 5-5 แสดงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง ส่วน State Diagram ของการตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวางขา FL แสดงในภาพที่ 5-6 โดยมีการควบคุมที่ต่างกัน 2 กรณีในขณะที่ก้าวขา คือ กรณีตรวจพบสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง 2 ถึง 6 จะยกขาให้สูงขึ้นด้วยคำสั่ง M2(0) แต่ถ้าตรวจพบที่ตำแหน่ง 7 หรือ 8 จะเลือกคำสั่ง M10(1) เพื่อวางขาลง จากการทดลองพบว่าเป็นไปได้ของการควบคุมในเหตุการณ์การตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวางขา FL จำนวน 30 ขั้นตอน การเดินบนสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมแบบเดียวกับการเดินบนพื้นราบ (ต่างกันที่จุดเชื่อมต่อ M2 อยู่ที่ตำแหน่ง 0) จึงมีขั้นตอนการควบคุม 14 ขั้นตอน ส่วนการเดินลงจากสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมเช่นเดียวกับการเดินบนพื้นราบเช่นกันแต่เพิ่มขั้นตอนการวางขา FL ลงด้วยคำสั่ง M2(8) เข้ามา 1 ขั้นตอน ทำให้มีขั้นตอนการควบคุม 15 ขั้นตอน ดังนั้นจึงรวบรวมชุดข้อมูลได้ทั้งหมดเท่ากับ $30 + 14 + 15 = 59$ รายการ



ภาพที่ 5-5 เหตุการณ์ที่เกิดในการควบคุมแบบจำลองเดินข้ามสิ่งกีดขวางขา FL



ภาพที่ 5-6 State Diagram การตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวางขา FL

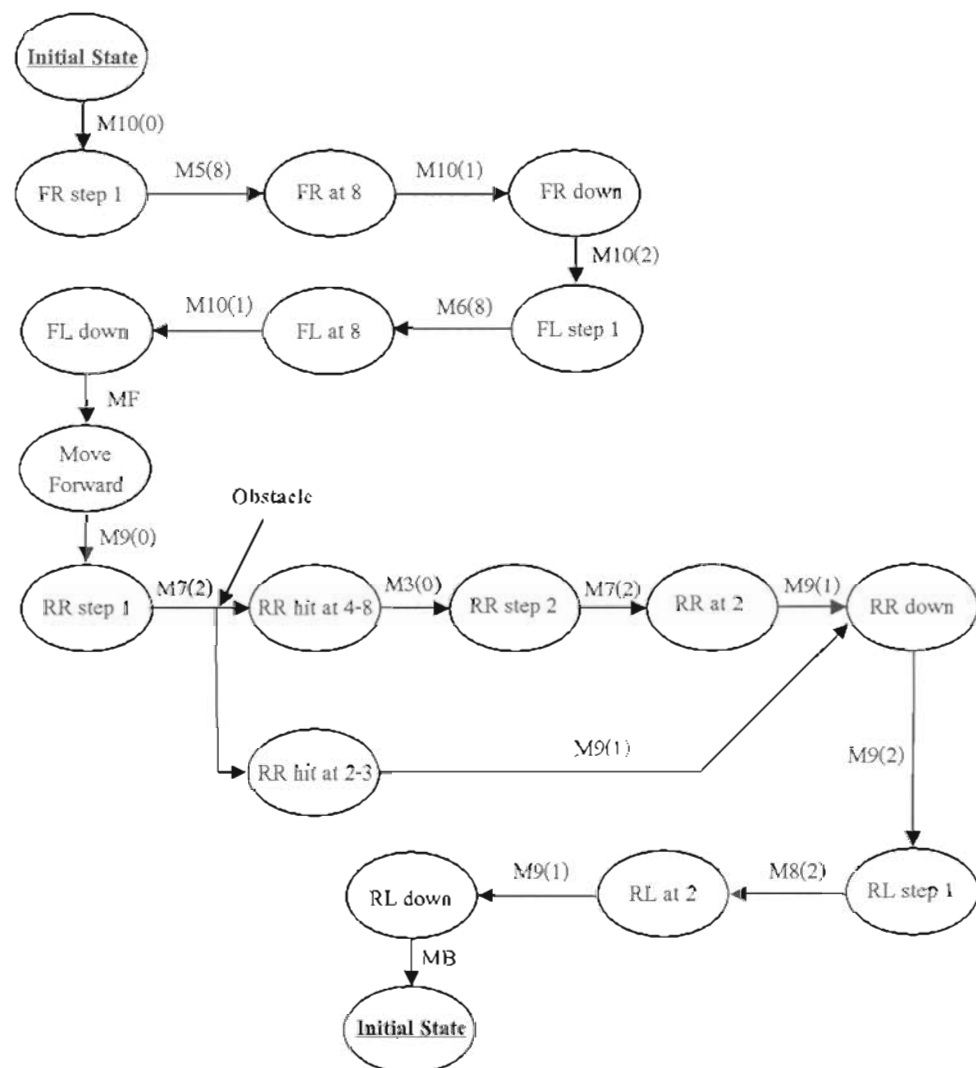
5.1.4 การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้เดินข้ามสิ่งกีดขวางทางด้านขวา (RR)

การทดลองนี้ใช้สิ่งกีดขวางแบบที่ 1 โดยจะเริ่มบันทึกลำดับของการควบคุมเมื่อขา RR เริ่มก้าวไปข้างหน้าและตรวจพบสิ่งกีดขวางและจบการทดลองเมื่อขา RR ก้าวลงจากสิ่งกีดขวางได้ ซึ่งตำแหน่งของการตรวจพบสิ่งกีดขวางขา RR จะเป็นไปได้ 7 ตำแหน่ง คือ 8 ถึง 2 ภาพที่ 5-7 แสดงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง ส่วน State Diagram ของการตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวางขา RR แสดงในภาพที่ 5-8 โดยมีการควบคุมที่ต่างกัน 2 กรณีในขณะที่ก้าวขา คือ กรณีตรวจพบสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง 8 ถึง 4 จะยกขาให้สูงขึ้นด้วยคำสั่ง M3(0) แต่ถ้าตรวจพบที่ตำแหน่ง 3 หรือ 2 จะเลือกคำสั่ง M9(1) เพื่อวางขาลง จากการทดลองพบว่ามีความเป็นไปได้ของการควบคุมในเหตุการณ์การตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวางขา RR จำนวน 25 ขั้นตอน การเดินบนสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมแบบเดียวกับการเดินบนพื้นราบ (ต่างกันที่จุดเชื่อมต่อ M3 อยู่

ที่ตำแหน่ง 0) จึงมีขั้นตอนการควบคุม 14 ขั้นตอน ส่วนการเดินทางจากสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมเช่นเดียวกับการเดินบนพื้นราบเช่นกันแต่เพิ่มขั้นตอนการวางขา RR ลงด้วยคำสั่ง M3(8) เข้ามา 1 ขั้นตอน ทำให้มีขั้นตอนการควบคุม 15 ขั้นตอน ดังนั้นจึงรวบรวมชุดข้อมูลได้ทั้งหมดเท่ากับ $25 + 14 + 15 = 54$ รายการ



ภาพที่ 5-7 เหตุการณ์ที่เกิดในการควบคุมแบบจำลองเดินข้ามสิ่งกีดขวางขา RR



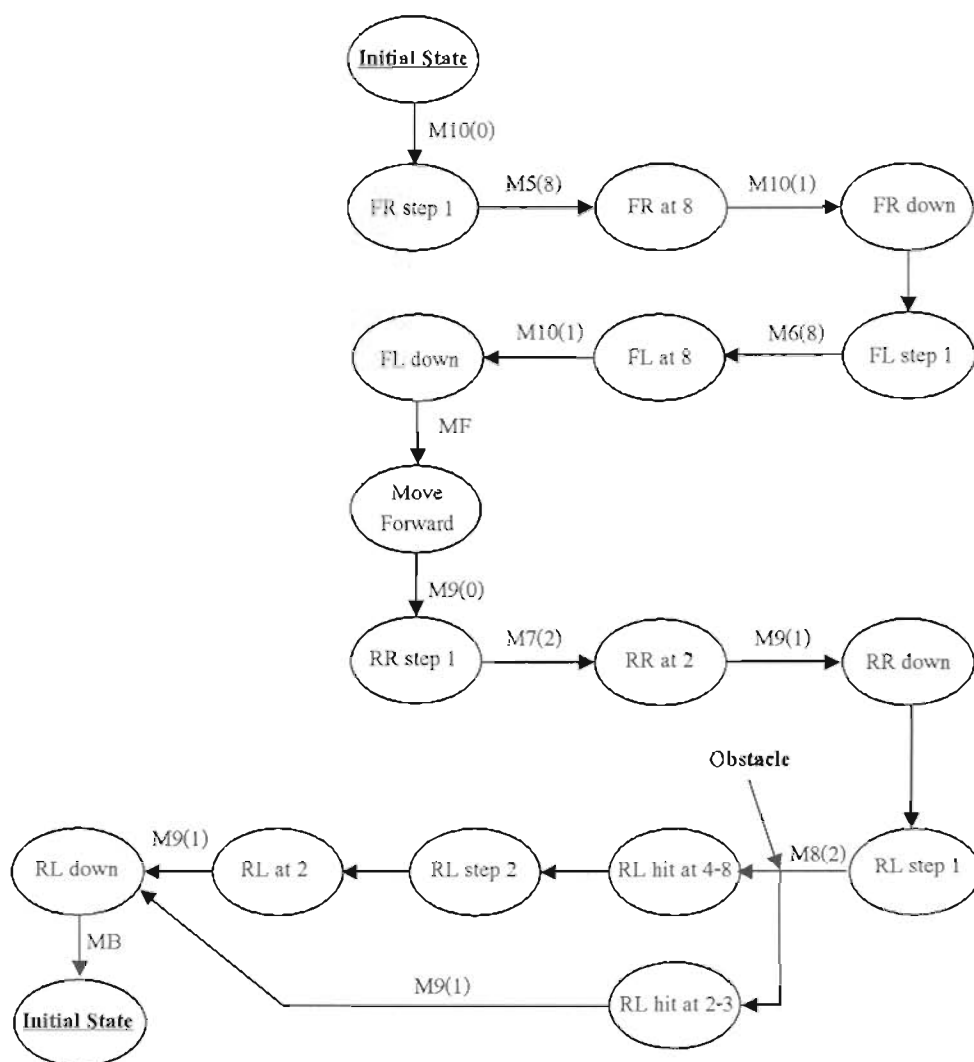
ภาพที่ 5-8 State Diagram การตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวางขา RR

5.1.5 การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้ก้าวเดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหลังด้านซ้าย (RL)

การทดลองนี้ใช้สิ่งกีดขวางแบบที่ 1 โดยจะเริ่มบันทึกลำดับของการควบคุมเมื่อขา RL เริ่มก้าวไปข้างหน้าและตรวจพบสิ่งกีดขวางและจบการทดลองเมื่อขา RL ก้าวลงจากสิ่งกีดขวางได้ ซึ่งตำแหน่งของการตรวจพบสิ่งกีดขวางขา RL จะเป็นไปได้ 7 ตำแหน่ง คือ 8 ถึง 2 ภาพที่ 5-9 แสดงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง ส่วน State Diagram ของการตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวางขา RL แสดงในภาพที่ 5-10 โดยมีการควบคุมที่ต่างกัน 2 กรณีในขณะที่ก้าวขา คือ กรณีตรวจพบสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่ง 8 ถึง 4 จะยกขาให้สูงขึ้นด้วยคำสั่ง M4(0) แต่ถ้าตรวจพบที่ตำแหน่ง 3 หรือ 2 จะเลือกคำสั่ง M9(1) เพื่อวางขาลง จากการทดลองพบว่ามีความเป็นไปได้ของการควบคุมในเหตุการณ์การตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวางขา RL จำนวน 16 ขั้นตอน การเดินบนสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมแบบเดียวกันกับการเดินบนพื้นราบ (ต่างกันที่จุดเชื่อมต่อ M4 อยู่ที่ตำแหน่ง 0) จึงมีขั้นตอนการควบคุม 14 ขั้นตอน ส่วนการเดินลงจากสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมเช่นเดียวกับการเดินบนพื้นราบเช่นกันแต่เพิ่มขั้นตอนการวางขา RL ลงด้วยคำสั่ง M4(8) เข้ามา 1 ขั้นตอน ทำให้มีขั้นตอนการควบคุม 15 ขั้นตอน ดังนั้นจึงรวบรวมชุดข้อมูลได้ทั้งหมดเท่ากับ $16 + 14 + 15 = 45$ รายการ



ภาพที่ 5-9 เหตุการณ์ที่เกิดในการควบคุมแบบจำลองเดินข้ามสิ่งกีดขวางขา RL



ภาพที่ 5-10 State Diagram การตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวางขา RL

5.1.6 การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้ก้าวเดินข้ามสิ่งกีดขวางทางด้านหน้า (FR & FL)

การทดลองนี้ใช้สิ่งกีดขวางแบบที่ 2 ซึ่งวางกีดขวางขา 2 ข้างคือ FR และ FL โดยจะเริ่มบันทึกค่าลำดับของข้อมูลเมื่อขา FR ตรวจพบสิ่งกีดขวางและจบการทดลองเมื่อขา RL ก้าวลงจากสิ่งกีดขวางได้ โดยเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองแสดงในภาพที่ 5-11 ซึ่งเป็นการทดลองที่ 2 ต่อเนื่องด้วยการทดลองที่ 3 จึงมีขั้นตอนควบคุมในการตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวาง $39 + 30 = 69$ ขั้นตอน ส่วนการเดินลงจากสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมเช่นเดียวกับการเดินบนพื้นราบเช่นกันแต่เพิ่มขั้นตอนการวางขา FR ลงด้วยคำสั่ง M1(8) และวางขา FL ลงด้วยคำสั่ง M2(8) เข้ามา 2 ขั้นตอน ทำให้มีขั้นตอนการควบคุม 16 ขั้นตอน ดังนั้นจึงรวบรวมชุดข้อมูลได้ทั้งหมดเท่ากับ $69 + 14 + 16 = 99$ รายการ



ภาพที่ 5-11 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในการควบคุมแบบจำลองเดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้า

5.1.7 การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้ก๊าวเดินข้ามสิ่งกีดขวางทางด้านหลัง (RR & RL)

การทดลองนี้ใช้สิ่งกีดขวางแบบที่ 2 ซึ่งวางกีดขวางขา 2 ข้างคือ RR และ RL โดยจะเริ่มบันทึกลำดับของข้อมูลเมื่อขา RR ตรวจพบสิ่งกีดขวางและจบการทดลองเมื่อขา RL ก๊าวลงจากสิ่งกีดขวางได้ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองแสดงในภาพที่ 5-12 ซึ่งเป็นการทดลองที่ 4 ต่อเนื่องด้วยการทดลองที่ 5 จึงมีขั้นตอนควบคุมในการตรวจพบและก๊าวข้ามสิ่งกีดขวาง $25 + 16 = 41$ ขั้นตอน ส่วนการเดินลงจากสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมเช่นเดียวกับการเดินบนพื้นราบเช่นกันแต่เพิ่มขั้นตอนการวางขา RR ลงด้วยคำสั่ง M3(8) และวางขา RL ลงด้วยคำสั่ง M4(8) เข้ามา 2 ขั้นตอน ทำให้มีขั้นตอนการควบคุม 16 ขั้นตอน ดังนั้นจึงรวบรวมชุดข้อมูลได้ทั้งหมด $41 + 14 + 16 = 71$ รายการ



ภาพที่ 5-12 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในการควบคุมแบบจำลองเดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหลัง

5.1.8 การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้ก๊าวเดินข้ามสิ่งกีดขวางทางด้านขวา (FR & RR)

การทดลองนี้ใช้สิ่งกีดขวางแบบที่ 2 ซึ่งวางกีดขวางขา 2 ข้างด้านขวาคือ FR และ RR โดยจะเริ่มบันทึกลำดับของข้อมูลเมื่อขา FR ตรวจพบสิ่งกีดขวางและจบการทดลองเมื่อขา RR ก๊าวลงจากสิ่งกีดขวางได้ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองแสดงในภาพที่ 5-13 ซึ่งเป็นการทดลองที่ 2 ต่อเนื่องด้วยการทดลองที่ 4 จึงมีขั้นตอนควบคุมในการตรวจพบและก๊าวข้ามสิ่งกีดขวาง $39 + 25 = 64$ ขั้นตอน ส่วนการเดินลงจากสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมเช่นเดียวกับการเดินบนพื้นราบเช่นกันแต่เพิ่มขั้นตอนการวางขา FR ลงด้วยคำสั่ง M1(8) และวางขา RR ลงด้วย

คำสั่ง M3(8) เข้ามา 2 ขั้นตอน ทำให้มีขั้นตอนการควบคุม 16 ขั้นตอน ดังนั้นจึงรวบรวมชุดข้อมูลได้ทั้งหมดเท่ากับ $64 + 14 + 16 = 94$ รายการ



ภาพที่ 5-13 เหตุการณ์ที่เกิดในการควบคุมแบบจำลองเดินข้ามสิ่งกีดขวางทางด้านขวา

5.1.9 การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้ก้าวเดินข้ามสิ่งกีดขวางทางด้านซ้าย (FL & RL)

การทดลองนี้ใช้สิ่งกีดขวางแบบที่ 2 ซึ่งวางกีดขวางขา 2 ขาทางด้านซ้ายคือขา FL และ ขา RL โดยจะเริ่มบันทึกลำดับของข้อมูลเมื่อขา FL ตรวจพบสิ่งกีดขวางและจบการทดลองเมื่อแบบจำลองสามารถเดินข้ามสิ่งกีดขวางได้ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองแสดงในภาพที่ 5-14 ซึ่งเป็นการทดลองที่ 3 ต่อเนื่องด้วยการทดลองที่ 5 จึงมีขั้นตอนควบคุมในการตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวาง $30 + 16 = 46$ ขั้นตอน ส่วนการเดินลงจากสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมเช่นเดียวกับการเดินบนพื้นราบเช่นกันแต่เพิ่มขั้นตอนการวางขา FL ลงด้วยคำสั่ง M2(8) และวางขา RL ลงด้วยคำสั่ง M4(8) เข้ามา 2 ขั้นตอน ทำให้มีขั้นตอนการควบคุม 16 ขั้นตอน ดังนั้นจึงรวบรวมชุดข้อมูลได้ทั้งหมดเท่ากับ $46 + 14 + 16 = 76$ รายการ



ภาพที่ 5-14 เหตุการณ์ที่เกิดในการควบคุมแบบจำลองเดินข้ามสิ่งกีดขวางทางด้านซ้าย

5.1.10 การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้ก้าวเดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้าขาและขาหลังซ้าย

การทดลองนี้ใช้สิ่งกีดขวางแบบที่ 1 จำนวน 2 ชั้นเพื่อวางกีดขวางขา FR และ ขา RL โดยจะเริ่มบันทึกลำดับของข้อมูลเมื่อขา FR ตรวจพบสิ่งกีดขวางและจบการทดลองเมื่อแบบจำลองสามารถเดินข้ามสิ่งกีดขวางได้ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองแสดงในภาพที่ 5-15 ซึ่งเป็นการทดลองที่ 2 ต่อเนื่องด้วยการทดลองที่ 5 จึงมีขั้นตอนควบคุมในการตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวาง $39 + 16 = 55$ ขั้นตอน ส่วนการเดินลงจากสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมเช่นเดียวกับการเดินบนพื้นราบเช่นกันแต่เพิ่มขั้นตอนการวางขา FR ลงด้วยคำสั่ง M1(8) และวางขา RL ลงด้วยคำสั่ง M4(8) เข้ามา 2 ขั้นตอน ทำให้มีขั้นตอนการควบคุม 16 ขั้นตอน ดังนั้นจึงรวบรวมชุดข้อมูลได้ทั้งหมดเท่ากับ $55 + 14 + 16 = 85$ รายการ



ภาพที่ 5-15 เหตุการณ์ที่เกิดในการควบคุมแบบจำลองเดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้าขาและหลังซ้าย

5.1.11 การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้ก้าวเดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้าซ้ายและขาหลังขวา

การทดลองนี้ใช้สิ่งกีดขวางแบบที่ 1 จำนวน 2 ชั้นเพื่อวางกีดขวางขา 2 ขาคือขา FL และขา RR โดยจะเริ่มบันทึกลำดับของข้อมูลเมื่อขา FL ตรวจพบสิ่งกีดขวางและจบการทดลองเมื่อแบบจำลองสามารถเดินข้ามสิ่งกีดขวางได้ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองแสดงในภาพที่ 5-16 การทดลองนี้คือการทดลองที่ 3 ต่อเนื่องด้วยการทดลองที่ 4 จึงมีขั้นตอนควบคุมในการตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวาง $30 + 25 = 55$ ขั้นตอน ส่วนการเดินลงจากสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมเช่นเดียวกับการเดินบนพื้นราบเช่นกันแต่เพิ่มขั้นตอนการวางขา FL ลงด้วยคำสั่ง M2(8) และวางขา RR ลงด้วยคำสั่ง M3(8) เข้ามา 2 ขั้นตอน ทำให้มีขั้นตอนการควบคุม 16 ขั้นตอน ดังนั้นจึงรวบรวมชุดข้อมูลได้ทั้งหมดเท่ากับ $55 + 14 + 16 = 71$ รายการ



ภาพที่ 5-16 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในการควบคุมแบบจำลองเดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้าขาและหลังซ้าย

5.1.12 การควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้ก้าวเดินข้ามสิ่งกีดขวางขาทั้ง 4 ข้าง

การทดลองนี้ใช้สิ่งกีดขวางแบบที่ 3 ตามที่อธิบายในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2 ซึ่งวางสิ่งกีดขวางขาทั้ง 4 ข้าง โดยจะเริ่มบันทึกค่าข้อมูลเมื่อขา FR ตรวจพบสิ่งกีดขวางและจบการทดลองเมื่อขา RL ก้าวลงจากสิ่งกีดขวางได้ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองแสดงในภาพที่ 5-17 การทดลองนี้คือการทดลองที่ 2 และต่อเนื่องด้วยการทดลองที่ 3, 4 และ 5 และเมื่อก้าวขึ้นบนสิ่งกีดขวางครบทั้ง 4 ขาแล้วจะทำการยกตัวขึ้นด้วยคำสั่ง MU อีก 1 ขั้นตอน จึงมีขั้นตอนควบคุมในการตรวจพบและก้าวข้ามสิ่งกีดขวาง $39 + 30 + 25 + 16 + 1 = 111$ ขั้นตอน ส่วนการเดินลงจากสิ่งกีดขวางใช้ขั้นตอนการควบคุมเช่นเดียวกับการเดินบนพื้นราบเช่นกันแต่เพิ่มขั้นตอนการลดตัวลงด้วยคำสั่ง MD วางขา FL ลงด้วยคำสั่ง M2(8) วางขา RR ลงด้วยคำสั่ง M3(8) และวางขา RL ลงด้วยคำสั่ง M4(8) เข้ามา 4 ขั้นตอน ทำให้มีขั้นตอนการควบคุม 18 ขั้นตอน ดังนั้นจึงรวบรวมชุดข้อมูลได้ทั้งหมดเท่ากับ $111 + 14 + 18 = 143$ รายการ



ภาพที่ 5-17 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในการควบคุมแบบจำลองเดินข้ามสิ่งกีดขวางขา 4 ข้าง

ตารางที่ 5-3 ชุดข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดลองควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์

ลำดับ	การทดลอง	ชุดข้อมูลที่รวบรวมได้ (รายการ)
1	การเดินบนพื้นราบที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง	14
2	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้าขวา	68
3	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้าซ้าย	59
4	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหลังขวา	54
5	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหลังซ้าย	45
6	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาด้านหน้า	99
7	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาด้านหลัง	71
8	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาด้านขวา	94
9	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาด้านซ้าย	76
10	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้าขวาและขาหลังซ้าย	85
11	เดินข้ามสิ่งกีดขวางขาหน้าซ้ายและขาหลังขวา	71
12	เดินข้ามสิ่งกีดขวางทั้ง 4 ขา	143
13	กรณีที่ไม่สามารถก้าวข้ามสิ่งกีดขวางได้	49
	รวม	928

จากการทดลองควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์ให้เดินในการทดลองทั้ง 12 การทดลองตามที่อธิบายไว้ข้างต้นทำให้รวบรวมชุดข้อมูลลำดับการควบคุมได้เป็นจำนวน 879 รายการ และทางผู้วิจัยได้เพิ่มชุดข้อมูลที่จะส่งผลให้หุ่นยนต์ไม่สามารถก้าวเดินข้ามสิ่งกีดขวางได้อีกจำนวน 49 รายการ ในกรณีที่ขาข้างที่ตรวจพบสิ่งกีดขวางขึ้นแล้วแต่ยังไม่สามารถข้ามผ่านได้ (ชุดข้อมูลสำหรับคำสั่ง STOP) ทำให้จำนวนชุดข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดลองทั้งหมดมีเท่ากับ 928 รายการ ดังแสดงในตารางที่ 5-3 หลังจากนั้นนำชุดข้อมูลทั้งหมดที่รวบรวมได้นำมาจำแนกชุดข้อมูลที่ซ้ำซ้อนออกไปจำนวน 27 รายการ โดยข้อมูลที่ซ้ำซ้อนคือมีส่วนของค่าสถานะท่าทางและคำสั่งควบคุมที่เหมือนกัน ซึ่งเกิดจากการทดลองที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น เมื่อก้าวลงจากสิ่งกีดขวางขา FR ในการทดลองที่ 5.1.2 กับการก้าวไปอยู่ที่ตำแหน่ง 8 ของขา FR ของการเดินบนพื้นราบในการทดลองที่ 5.1.1 จะพบว่าสถานะปัจจุบันของแบบจำลองในทั้ง 2 การทดลองจะเหมือนกันและใช้คำสั่งเดียวกัน ซึ่งถือว่าเป็นชุดข้อมูลที่ซ้ำซ้อน เป็นต้น ทำให้คงเหลือชุดข้อมูลสำหรับการทดลองทั้งหมด 901 รายการ

5.2 การทดลองข่ายงานระบบประสาท

ในส่วนนี้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ข่ายงานระบบประสาท ในการจำแนกหรือเลือกคำสั่ง ความคุมที่เหมาะสมกับข้อมูลทางและสถานะของหุ่นยนต์ ข่ายงานระบบประสาทนั้นมีรูปแบบและสถาปัตยกรรมที่แตกต่างกันจำนวนมาก โดยข่ายงานที่ได้รับความนิยมและใช้งานอย่างแพร่หลายคือข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Multi-Layer Perceptron) และใช้เทคนิคการปรับค่าน้ำหนักการเชื่อมโยงหรือการฝึกสอนแบบป้อนกลับ (Back-Propagation Training) การฝึกสอนข่ายงานระบบประสาทจะใช้วิธีทำซ้ำ โดยการนำชุดข้อมูลฝึกสอนป้อนเข้าสู่กระบวนการฝึกสอนครั้งละ 1 รายการตามลำดับ และทำการปรับค่าน้ำหนักการเชื่อมโยงซึ่งจำนวนรอบของการทำซ้ำนั้นขึ้นอยู่กับปัญหาและผู้ทำการทดลอง ซึ่งมักพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error : MSE) ว่ามีค่าที่น้อยเท่าที่ต้องการหรือยอมรับได้หรือไม่

แม้ว่าข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าแบบหลายชั้นและใช้เทคนิคการฝึกสอนแบบป้อนกลับจะได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพ แต่จากการทดลองพบว่าในช่วงแรกของการฝึกสอนค่า MSE จะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงจุดหนึ่งจากนั้นจะมีอัตราการลดลงที่ช้ามากจนกระทั่งจบการฝึกสอน และแต่ละปัญหามีจำนวนข้อมูลนำเข้า ข้อมูลนำออก รวมทั้งมีความซับซ้อนต่างกัน ดังนั้นจึงไม่มีรูปแบบของข่ายงานรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งที่เหมาะสมกับทุกปัญหา การประยุกต์ใช้ข่ายงานสำหรับงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้ในระหว่างขั้นตอนการฝึกสอน

ข่ายงานระบบประสาทที่ใช้ในการทดลองนี้คือ ข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น และใช้เทคนิคการปรับค่าน้ำหนักการเชื่อมโยงแบบป้อนกลับ ชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับฝึกสอนและทดสอบข่ายงานได้จากทดลองควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์จำนวน 901 รายการ ตามที่อธิบายในหัวข้อ 5.1 โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ คือ ใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอนข่ายงานจำนวน 451 รายการและใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับทดสอบข่ายงานจำนวน 450 รายการ และข่ายงานจะทำการจำแนกคำสั่งสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ซึ่งมีทั้งหมด 23 คำสั่ง ซึ่งโครงสร้างและพารามิเตอร์ของข่ายงานระบบประสาทแสดงในตารางที่ 5-4 และ ตารางที่ 5-5 ตามลำดับ

5.2.1 โครงสร้างของข่ายงานระบบประสาท

5.2.1.1 เนื่องจากข้อมูลสถานะทางของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นข้อมูลนำเข้ามีทั้งหมด 18 คำ ดังนั้นจำนวนข้อมูลนำเข้าของข่ายงานระบบประสาทจึงมีทั้งหมด 18 หน่วย

5.2.1.2 เนื่องจากจำนวนคำสั่งสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดมี 23 คำสั่ง ดังนั้นจำนวนข้อมูลออกของข่ายงานระบบประสาทจึงมี 23 หน่วย

5.2.1.3 จำนวนชั้นซ่อนของข่ายงานระบบประสาทที่ใช้คือ 1 ชั้น โดยใช้จำนวนหน่วยประมวลผลในชั้นซ่อนต่างกัน 8 คำคือ 15, 20, 25, ..., 50

5.2.1.4 ฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้คือ ฟังก์ชันเชิงตรรกะ (Sigmoid)

5.2.2 พารามิเตอร์สำหรับข่ายงานระบบประสาท

5.2.2.1 ค่าอัตราการเรียนรู้ใช้ 3 ค่า คือ 0.010, 0.015 และ 0.020

5.2.2.2 จำนวนรอบการฝึกสอนใช้คือ 500,000 และ 1,000,000 รอบ

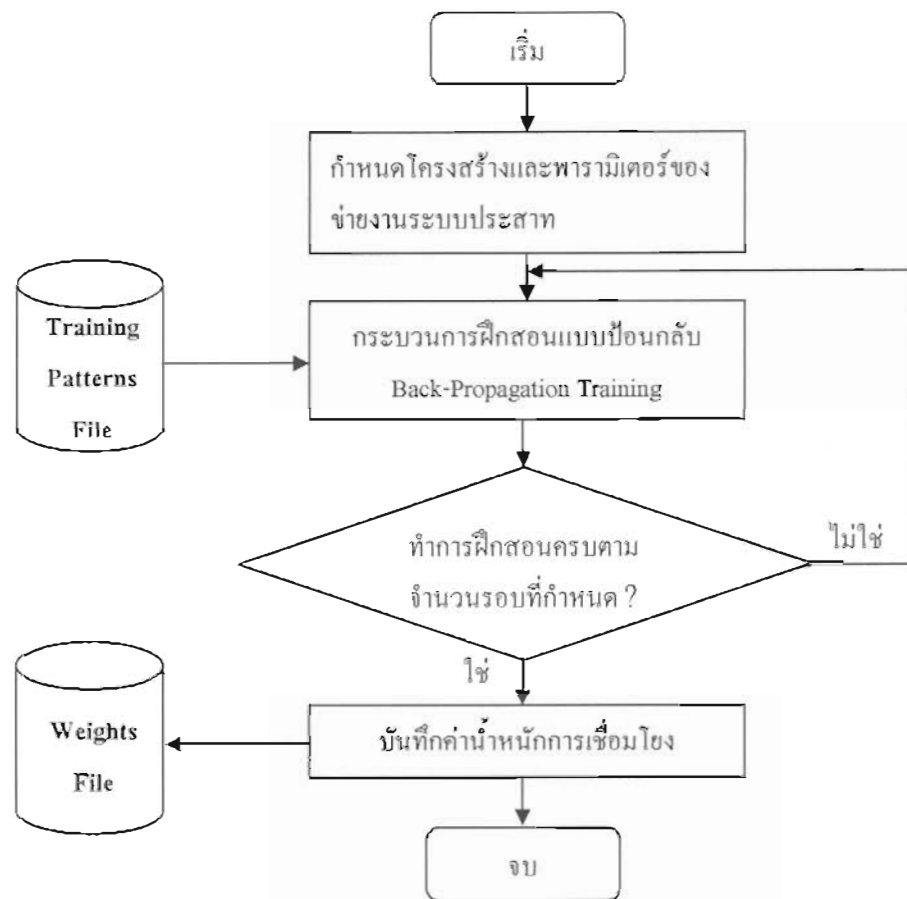
ตารางที่ 5-4 โครงสร้างของข่ายงานระบบประสาท

โครงสร้างของข่ายงานระบบประสาท	ค่า
จำนวนข้อมูลนำเข้า	18-
จำนวนข้อมูลนำออก	23-
จำนวนชั้นซ่อนของข่ายงาน	1
จำนวนหน่วยประมวลผลในชั้นซ่อน	15, 20, 25, ... , 50
ฟังก์ชันกระตุ้น	ฟังก์ชันเชิงตรรกะ (Sigmoid)

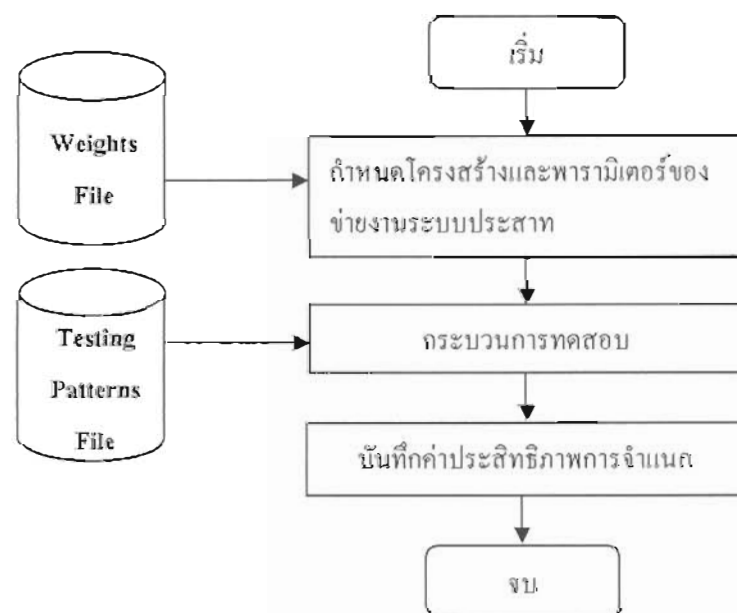
ตารางที่ 5-5 พารามิเตอร์สำหรับข่ายงานระบบประสาท

พารามิเตอร์ของข่ายงานระบบประสาท	ค่า
ค่าอัตราการเรียนรู้	0.010, 0.015, 0.020
จำนวนรอบการฝึกสอน	500,000 1,000,000

การทดลองกับข่ายงานระบบประสาทใช้ชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอน (Training Patterns File) ที่ทำการแบ่งจากชุดข้อมูลที่รวบรวมได้ทั้งหมดจากแฟ้มชุดข้อมูล หลังจากทำการฝึกสอนแล้ว ทดสอบด้วยชุดข้อมูลที่รวบรวมได้ทั้งหมดจากแฟ้มชุดข้อมูลทดสอบ (Testing Patterns File) โดยแผนภาพแสดงขั้นตอนการฝึกสอนและทดสอบข่ายงานระบบประสาทแสดงในภาพที่ 5-18 และภาพที่ 5-19 ตามลำดับ



ภาพที่ 5-18 แผนผังขั้นตอนการฝึกสอนข่ายงานระบบประสาท



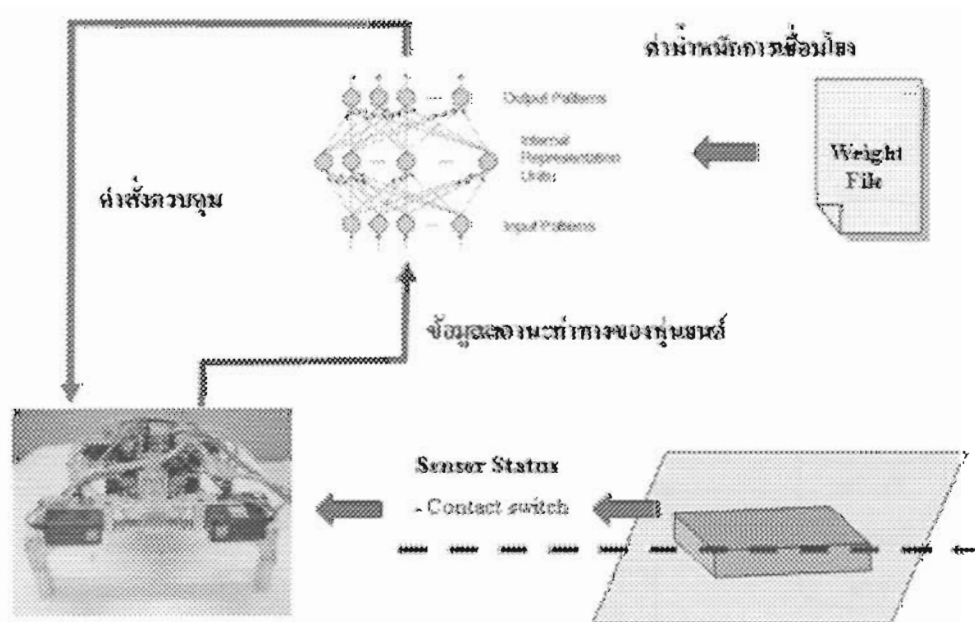
ภาพที่ 5-19 แผนผังขั้นตอนการทดสอบข่ายงานระบบประสาท

5.3 การประยุกต์ใช้งานระบบประสาทกับการควบคุม

หลังจากทดลองและทดสอบเพื่อหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ของข่ายงานระบบประสาทที่เหมาะสมกับปัญหาที่วิจัยได้แล้ว จะทำการบันทึกข้อมูลโครงสร้างของข่ายงานระบบประสาทและค่าน้ำหนักการเชื่อมโยงที่สามารถเรียนรู้การจำแนกชุดข้อมูลฝึกสอนและชุดข้อมูลทดสอบได้ดีที่สุดในไฟล์ข้อมูล ซึ่งค่าประสิทธิภาพการจำแนกที่ดีที่สุดที่ต้องการคือช่วง 95 - 100 เปอร์เซ็นต์

โปรแกรมควบคุมจะทำหน้าที่รับข้อมูลสถานะท่าทางของหุ่นยนต์จากการสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์บนตัวหุ่นยนต์ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม จากนั้นจะส่งข้อมูลที่รวบรวมได้เข้าสู่การคำนวณของข่ายงานระบบประสาทตามโครงสร้างที่บันทึกไว้ในไฟล์ข้อมูล ซึ่งในโปรแกรมควบคุมนี้ส่วนของข่ายงานระบบประสาทจะทำเฉพาะขั้นตอนของการป้อนไปยังหน้าทํานานข้อมูลที่ออกจากข่ายงานคือค่าส่งควบคุม ซึ่งจะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์บนหุ่นยนต์ เพื่อส่งไปควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ในระบบต่อไป ระบบการควบคุมหุ่นยนต์จึงแสดงในภาพที่ 5-20

โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์พัฒนาบนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ทะเล โดยใช้โปรแกรมประยุกต์ QT Designer เวอร์ชัน 3.1.2 ช่วยในการเขียนโปรแกรมภาษาซีและ QT ยังสนับสนุนการพัฒนาในแนวคิดต่อกับผู้ใช้แบบกราฟฟิกส์ (GUI) ช่วยให้โปรแกรมที่พัฒนาใช้งานได้ง่าย



ภาพที่ 5-20 ระบบการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยข่ายงานระบบประสาท