



การปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของหุ่นยนต์อัตโนมัติโดยใช้โครงข่ายออร์บีโนนเทียน

นายโพธิวัฒน์ งามบรรจรวิวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาทักษารหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2562

การปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของหุ่นยนต์อัตโนมัติโดยใช้โครงข่ายชอร์ตไมเนทีเยม

นายโพธิ์วัฒน์ งามขาววิวัฒน์ วศ.ม. (สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
บริษัทฯ จำกัด สาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และระบบอัตโนมัติ
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ.ดร. ปรเมษฐ์ มณฑุพงศ์)

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์

(ดร. ปิชญา รีกิติกุล)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

๗๗๙ ๒๕๖๒

(ผศ.ดร. ถวิลดา มนีวรรณ)

กรรมการ

(ดร. สุริยา น้ำสุกคำพงษ์)

กรรมการ

(ผศ.ดร. นุจุณ์ เสริม แก้วกำเนิดพงษ์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของหุ่นยนต์อัตโนมัติโดยใช้โครงข่ายอร์โนนเทียม
หน่วยกิต	36
ผู้เขียน	นายโพธิ์วัฒน์ งามชรวิวัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ปิติราษฎร์ ชีรากิตติกุล
หลักสูตร	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
คณะ	สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

ตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตล้วนมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนพฤติกรรม เพื่อให้ดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาพแวดล้อมที่แปรร้าย หรือสถานการณ์ที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ ซึ่งต่างจากหุ่นยนต์ที่มีการกำหนดเส้นทางไว้ก่อนแล้ว ดังนั้นภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงให้ความสนใจในเรื่องความสามารถในการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของหุ่นยนต์อัตโนมัติในกรณีที่สภาพแวดล้อมเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยใช้แรงบันดาลใจจากกลไกออร์โนนในธรรมชาติที่เป็นส่วนหนึ่งในการปรับและรักษาสมดุลของเซลล์ หรือระบบการทำงานภายในร่างกาย ซึ่งภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการทดลองนำกลไกออร์โนนเทียมมาใช้งานร่วมกับหุ่นยนต์ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบขา และแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองของหุ่นยนต์เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงจากภายนอก (การเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นผิว) และภายใน (การเสียหายของหุ่นยนต์) โดยผลของการทดลองการเปลี่ยนแปลงภายนอกพบว่าหุ่นยนต์สามารถปรับเปลี่ยนท่าทางการเคลื่อนที่ให้สอดคล้องไปกับพื้นผิวได้จากการกระตุ้นของกลไกออร์โนน และในการทดลองการเปลี่ยนแปลงภายในพบว่าเมื่อหุ่นยนต์ได้รับความเสียหาย ระบบสามารถปรับท่าทางการเคลื่อนที่ใหม่เพื่อให้หุ่นยนต์ยังสามารถทำงานและเคลื่อนที่ไปดำเนินหน้าต่อได้ ในการทดลองสุดท้ายที่เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ระหว่าง ระบบที่ไม่มีกลไกออร์โนน, ระบบที่มีกลไกออร์โนนเทียม และระบบโครงข่ายออร์โนนเทียม เพื่อสังเคราะห์ขั้นตอนในการออกแบบโครงข่ายออร์โนนเทียม และศึกษาถึงขอบเขตความสามารถของการใช้กลไกออร์โนนเทียมในรูปแบบต่าง ๆ ผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเลือกรูปแบบของโครงข่ายออร์โนนเทียมที่เหมาะสมส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของหุ่นยนต์

คำสำคัญ : กลไกออร์โนนเทียม / โครงข่ายออร์โนนเทียม / ตัวควบคุมการเคลื่อนที่

Thesis Title	Adaptive Behaviours for Autonomous Robots using Artificial Hormone Network
Thesis Credits	36
Candidate	Mr.Potiwat Ngamkajornwiwat
Thesis Advisor	Dr. Pitiwut Teerakittikul
Program	Doctor of Philosophy
Field of Study	Robotics and Automation
Faculty	Institute of Field Robotics
Academic Year	2019

Abstract

Organisms in nature can adapt their behaviors to survive in unpredictable situations. In contrast, robots can only properly perform in predefined conditions. This thesis focuses on enabling a walking robot to autonomously adopt its locomotion in various unknown environments. We apply a hormone-based self- adaptive system to a walking robot. The proposed artificial hormone mechanism's performance is tested to facilitate both internal and external disturbances. For external environmental changes, we validate the robustness of our control approach with six different unknown terrains. The walking robot successfully demonstrates its self-adaption to navigate on unknown complex terrains. On the other hand, to simulate internal environmental change, the robot is intentionally damaged by turning off the motor command. The result shows that the walking robot can regenerate adjusted gaits to maintain its ability to continue moving forward. In summary, for both conditions, it is shown that the artificial hormone walking robot can demonstrate productive movements on various terrains and address possible faults occurring to the robot. Lastly, in the final experiment, we compare the effectiveness of robotic mobility between non-hormone systems, artificial hormone mechanisms, and artificial hormone network. This experiment aims to synthesize procedures in the design of artificial hormone networks and identify the ability of artificial hormone mechanisms in various approaches. The last experiment result indicates that having the right artificial hormone network setting can result in compelling robot performances.

Keywords: Artificial hormone mechanism / Walking robot / Locomotion control

กิตติกรรมประกาศ

ผลสำเร็จของวิทยานิพนธ์นี้เกิดขึ้น ได้จากตัวข้าพเจ้าเองเป็นหลัก หากแต่พิจารณาเข้าไปถึงแก่นความสำเร็จนี้มิได้เกิดแต่ตัวของข้าพเจ้าเองผู้เดียว เนื่องจากได้รับการสนับสนุนและคำแนะนำจากอาจารย์หลายท่านที่ให้คำแนะนำ และบุคคลสำคัญที่เป็นจุดเริ่มของงานวิจัยนี้คือ ดร.ปิติวุฒน์ ชีรากิตติ ภูล ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและพี่ชายที่เคารพและเป็นแบบอย่างในการทำงาน รวมถึง พศ.ดร.ณิวิศา มณีวรรณ เป็นผู้ที่ให้ความรู้และโอกาสกับข้าพเจ้าตลอดมาตั้งแต่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ระดับชั้นมัธยมปลาย จนถึงสำเร็จการศึกษาปริญญาเอก และขอบคุณ ศ.ดร.ประเมษฐ์ มณฑพวงศ์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์สำหรับทำการทดลองต่างๆ พร้อมกับให้คำแนะนำและมอบโอกาสในการร่วมทำงานวิจัย ที่ต่างประเทศ รวมถึงเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครอบครัวและเพื่อนพี่น้องทุกท่านที่ร่วมเป็นกำลังใจกับการพัฒนางานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	๑
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๒
กิตติกรรมประกาศ	๓
สารบัญ	๔
รายการรูปประกอบ	๕

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
2. กลไกออร์โมนเทียม	6
2.1 กลไกออร์โมนในธรรมชาติ	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลไกออร์โมนเทียม	8
2.3 กลไกออร์โมนเทียม	15
2.4 การปรับปรุงกลไกออร์โ�นเทียม	18
2.5 แนวคิดการออกแบบและตั้งค่ากลไกออร์โມนเทียม	24
3. การใช้กลไกออร์โโมนเทียมร่วมกับหุ่นยนต์	34
3.1 ระบบการทำงานของหุ่นยนต์	34
3.2 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว	37
3.3 การทดลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว ในกรณีการเปลี่ยนแปลงจากภายนอก	41
3.4 การทดลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว ในกรณีการเปลี่ยนแปลงจากภายใน	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5	การทดลองเปรียบเทียบระหว่างกลไกออร์โนนแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุง	65
3.6	สรุปผลการทดลองและแนวทางพัฒนา	73
 4. การสร้างโครงข่ายออร์โนนเทียม		74
4.1	ระบบการทำงานของหุ่นยนต์	75
4.2	การออกแบบความคุณแบบโครงข่ายออร์โนนเทียม	76
4.3	การทดลองเปรียบเทียบระบบความคุณทั้ง 3 รูปแบบ	78
4.4	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	81
 5. สรุปงานวิจัยและแนวทางพัฒนาในอนาคต		85
 เอกสารอ้างอิง		86
 ประวัติผู้วิจัย		90

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 แผนผังแสดงกลไกชอร์โนน	6
2.2 แผนผังแสดงระบบการทำงานของ Khalique [14] โดยที่ D คือหุ่นยนต์สำหรับค้นหา และ R คือหุ่นยนต์สำหรับการขนย้ายแร่	9
2.3 แผนผังแสดงระบบการทำงานของ Timmis [17]	10
2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการหล่อสารชอร์โนนต่อการกระตุ้น [19]	11
2.5 แผนผังแสดงระบบการทำงานของ Lones [20]	12
2.6 แผนผังแสดงระบบการทำงานของ Hickton [21]	13
2.7 สนามทดสอบพฤติกรรมหุ่นยนต์นักล่าของ Hickton [21]	13
2.8 แผนผังแสดงระบบการทำงานแบบโครงข่ายชอร์โนนเที่ยมของ Teerakittikul [10]	14
2.9 สนามทดสอบหุ่นยนต์ 4 ล้อ เพื่อการค้นหาวัตถุ [10]	14
2.10 แสดงแนวคิดกลไกชอร์โนนเที่ยมแบบดึงเดิน	16
2.11 โครงสร้างภายในต่อมชอร์โนนแบบดึงเดิน	16
2.12 โครงสร้างภายในตัวรับชอร์โนนแบบดึงเดิน	18
2.13 กราฟแสดงความเข้มข้นของสารชอร์โนนจากกลไกชอร์โนนเที่ยมแบบดึงเดิน	19
2.14 แสดงแนวคิดกลไกชอร์โนนเที่ยมแบบปรับปรุง	20
2.15 โครงสร้างภายในต่อมชอร์โนนแบบปรับปรุง	20
2.16 โครงสร้างภายในต่อมชอร์โนนแบบปรับปรุง	21
2.17 กราฟแสดงการเบรียบเทียบที่อย่างการเลื่อนสายของสารชอร์โนน	22
2.18 กราฟแสดงการเบรียบเทียบที่อย่างการเลื่อนสายของสารชอร์โนนในช่วงขอบขาลง	23
2.19 แสดงแนวคิดการทำงานของกลไกชอร์โนนเที่ยมแบบดึงเดิน (รูป ก.) และกลไกชอร์โนนเที่ยมแบบใหม่ (รูป ข.)	24
2.20 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบกลไกชอร์โนน (รูป ก.) แบบดึงเดิน และ (รูป ข.) แบบปรับปรุง	25
2.21 แผนผังแสดงกระบวนการภายในขั้นตอนที่ 1	26
2.22 แผนผังแสดงกระบวนการภายในขั้นตอนที่ 2	27
2.23 แผนผังแสดงกระบวนการภายในขั้นตอนที่ 3	28
2.24 แผนผังแสดงกระบวนการภายในขั้นตอนที่ 4	29

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
2.25 กราฟแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง SI กับ HC ที่ค่า α เท่ากับ 0.8(สีเทา), 0.5(สีส้ม) และ 0.2(สีน้ำเงิน)	30
2.26 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบโครงข่ายชอร์โอมนเทียม	31
2.27 แผนภูมิแสดงเงื่อนในการออกแบบโครงข่ายชอร์โอมนเทียม	32
3.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์ 6 ขา โดยภาพ (ก) หุ่นยนต์ด้วยโปรแกรมจำลอง LPZrobots (ข) ภาพด้านหน้าของหุ่นยนต์ MORF และ (ค) ภาพด้านบนของหุ่นยนต์ MORF	35
3.2 แสดงโครงสร้างภายในของระบบควบคุม MNLC ที่มี CPG-based control เป็นส่วนหลัก	36
3.3 แสดงรูปแบบการยกเท้าของหุ่นยนต์ที่ค่า MI ค่าต่าง ๆ โดยที่แทนสีดำคือจังหวะการยกเท้าของหุ่นยนต์ กำหนดให้ R0, R1 และ R2 คือขาด้านขวาโดยเรียงจากขาหน้ากลางและหลังตามลำดับ ส่วน L0, L1 และ L2 คือขาด้านซ้ายเรียงลำดับเช่นเดียวกัน	37
3.4 แผนผังแสดงระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว (ALCS)	38
3.5 แผนผังแสดงการเตรียมสัญญาณสำหรับการกระตุ้นต่อมชอร์โอมนเทียม (ก) คำสั่งมอเตอร์ (ข) ค่าประมาณการสัมผัสพื้น (ค) ค่าจากเซนเซอร์จากปลายเท้า (ง) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์และค่าประมาณการสัมผัสพื้นจากขาด้านหลังซ้ายของหุ่นยนต์สำหรับการกระตุ้นต่อมชอร์โอมนทาง SI	40
3.6 แสดงลักษณะของพื้นผิวทั้ง 6 แบบ (ก) พื้นเรียบ, (ข) พื้นเนิน, (ค) พื้นเอียงขึ้น, (ง) พื้นเอียงลง, (จ) พื้นขรุขระ และ (น) พื้นขันบันได	42
3.7 กราฟแสดงผลการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นเรียบ	43
3.8 กราฟแสดงผลการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นเนิน	43
3.9 กราฟแสดงผลการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นเอียงขึ้น	43
3.10 กราฟแสดงผลการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นเอียงลง	44
3.11 กราฟแสดงผลการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นขรุขระ	44
3.12 กราฟแสดงผลการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นขันบันได	44
3.13 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของสัญญาณตัวอย่างสำหรับการประเมินค่า Stability และ Harmony	47
3.14 กราฟแสดงตัวอย่างเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สำหรับประเมินค่าคุณภาพใน การเคลื่อนที่	47

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.15 แผนภูมิแสดงความสำเร็จในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นรูปแบบ T1 พื้นเรียบ, T2พื้นเนิน, T3พื้นเอียงขึ้น, T4พื้นเอียงลง, T5พื้นชั้นบันได (สีน้ำเงิน คือ ระบบ ALCS และสีส้ม คือ ระบบ MNLC)	48
3.16 แผนภูมิแสดงค่าดัชนีการวัดประสิทธิภาพของการทดสอบแต่ละพื้นผิวรูปแบบ T1พื้นเรียบ, T2พื้นเนิน, T3พื้นเอียงขึ้น, T4พื้นเอียงลง, T5พื้นชั้นบันได และ T6พื้นชั้นบันได (ก) ค่า Stability และ (ข) ค่า Harmony (สีน้ำเงิน คือ ระบบ ALCS และสีส้ม คือ ระบบ MNLC)	49
3.17 แผนภูมิแสดงค่าดัชนีการวัดประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของการทดสอบแต่ละพื้นผิวรูปแบบ T1พื้นเรียบ, T2พื้นเนิน, T3พื้นเอียงขึ้น, T4พื้นเอียงลง, T5พื้นชั้นบันได และ T6พื้นชั้นบันได (สีน้ำเงิน คือ ระบบ ALCS และสีส้ม คือ ระบบ MNLC)	50
3.18 กราฟแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นผิวเรียบ	50
3.19 แสดงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นเนิน (ก) ค่าความสูงของลำตัวหุ่นยนต์, (ข) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์, (ค) ค่า MI ที่ถูกกระตุ้นด้วยกลไกอร์โรมน และ (ง) รูปแสดงสถานะของหุ่นยนต์ ณ บริเวณต่าง ๆ ของพื้นเนิน	52
3.20 แสดงประสิทธิภาพการเดินของหุ่นยนต์บนพื้นผิวชั้นบันได (ก) ค่าความสูงของลำตัวหุ่นยนต์, (ข) ค่า MI ที่ถูกกระตุ้นด้วยกลไกอร์โรมน (ค) รูปแสดงสถานะของหุ่นยนต์ ณ บริเวณต่าง ๆ ของพื้นผิวชั้นบันได และ (ง) เส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นผิวชั้นบันได	53
3.21 แสดงประสิทธิภาพการเดินของหุ่นยนต์บนพื้นชั้นบันได (ก) ค่าความสูงของลำตัวหุ่นยนต์, (ข) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์, (ค) ค่า MI ที่ถูกกระตุ้นด้วยกลไกอร์โรมน และ (ง) ค่าความเข้มข้นของซอร์โรมน	55
3.22 แสดงพื้นผิวทั้ง 4 ที่ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (ก) พื้นเอียงขึ้น, (ข) พื้นเอียงลง, (ค) พื้นต่างระดับ และ (ง) พื้นชั้นบันไดที่มีหลังคาปิดคลุม	56
3.23 แสดงผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ MORF บนพื้นเอียงขึ้น (ก) ค่า MI ที่ถูกกระตุ้นด้วยกลไกอร์โรมน และ (ข) รูปแสดงสถานะของหุ่นยนต์ ณ บริเวณต่าง ๆ ของพื้นเอียงขึ้น	57
3.24 แสดงผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ MORF บนพื้นเอียงลง (ก) ค่า MI ที่ถูกกระตุ้นด้วยกลไกอร์โรมน และ (ข) รูปแสดงสถานะของหุ่นยนต์ ณ บริเวณต่าง ๆ ของพื้นเอียงลง	57
3.25 แสดงผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ MORF บนพื้นต่างระดับ (ก) ค่า MI ที่ถูกกระตุ้นด้วยกลไกอร์โรมน และ (ข) รูปแสดงสถานะของหุ่นยนต์ ณ บริเวณต่าง ๆ ของพื้นต่างระดับ	58

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.26 แสดงผลการเคลื่อนที่ของหุ้นยนต์ MORF บนพื้นฐานระที่มีหลักปฏิกูลม (ก) ค่า MI ที่ถูกผลกระทบด้วยกลไกออร์โอมน และ(ข)รูปแสดงสถานะของหุ้นยนต์ ณ บริเวณต่าง ๆ ของพื้นฐานระที่มีหลักปฏิกูลม	59
3.27 แสดงลักษณะทางกายภาพของหุ้นยนต์ MORF ครอบแบบใหม่ (ก) ภาพด้านหน้าของ หุ้นยนต์ MORF และ (ข) ภาพด้านบนของหุ้นยนต์ MORF	60
3.28 แผนภูมิแสดงค่าดัชนีการวัดประสิทธิภาพของการทดสอบแต่ละพื้นผิว (ก) ค่า Stability (ข) ค่า Harmony และ (ค) ค่า Displacement โดยที่(สีนำเงิน คือ ระบบ ALCS, สีส้ม คือ ระบบ MNLC และสีเทา คือระบบ MNLC + Reflex)	61
3.29 แสดงตำแหน่งการปิดการทำงานของมอเตอร์	63
3.30 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ้นยนต์ที่ถูกปิดการทำงานมอเตอร์ที่ตำแหน่งที่ 1	64
3.31 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ้นยนต์ที่ถูกปิดการทำงานมอเตอร์ที่ตำแหน่งที่ 2	64
3.32 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ้นยนต์ที่ถูกปิดการทำงานมอเตอร์ที่ตำแหน่งที่ 3	65
3.33 กราฟแสดงค่า MI และค่าความเข้มข้นของสารออร์โอมนจากทางทดลอง การเปลี่ยนแปลงภายใต้	65
3.34 แผนผังแสดงระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว	67
3.35 กราฟแสดงความถี่ของการก้าวขาแต่ละขา โดย (ก)เป็นกลไกออร์โอมนแบบดั้งเดิม และ (ข)เป็นกลไกออร์โอมนแบบปรับปรุง ซึ่งมีลักษณะการเรียงตัวเป็นชั้นๆ ขาขวาด้านหน้า(R1), ขาขวาตรงกลาง(R2), ขาขวาด้านหลัง(R3), ขาซ้ายด้านหน้า(L1), ขาซ้ายตรงกลาง(L2) และขา ซ้ายด้านหลัง(L3)	69
3.36 แผนภูมิแห่งการแสดงผลการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ้นยนต์ โดยที่ (ก)คือระบบทาง ตามแนวแกน X และ(ข)คือระบบทางตามแนวแกน Z ซึ่งกลไกออร์โอมนแบบดั้งเดิม (AHM) และกลไกออร์โอมนแบบปรับปรุง (iAHM)	70
3.37 แสดงตำแหน่งการปิดการทำงานของมอเตอร์	70
3.38 แสดงจุดเสียหายและเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ้นยนต์รูปแบบ ก	71
3.39 แสดงจุดเสียหายและเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ้นยนต์ รูปแบบ ข	72
3.40 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของสารออร์โอมนที่สภาพปกติ, เสียหาย และเมื่อปรับตัว	73
4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของหุ้นยนต์ 4 ขา	75
4.2 แสดงระบบควบคุมแบบกลไกออร์โอมนเที่ยมคู่	76

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.3 แสดงระบบควบคุมแบบโกรงขาข้อหอร์โนนเทียม	77
4.4 แผนภูมิแท่งแสดงผลกระทบการวัดประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ โดยที่เส้นปะ คือ เส้นมาตรฐานในการเปรียบเทียบของระบบที่มีกลไกหอร์โนน และเส้นทึบ คือ เส้นมาตรฐานในการเปรียบเทียบของระบบที่ไม่มีกลไกหอร์โนน	78
4.5 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของกลไกหอร์โนนที่ 1 (เส้นสีส้ม) และกลไกหอร์โนนที่ 2 (เส้นสีน้ำเงิน) โดยเส้นปะแสดงถึงจุดที่กลไกหอร์โนนที่ 2 สามารถกระตุ้นการทำงานของกลไกหอร์โนนที่ 1	79
4.6 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของกลไกหอร์โนนที่ 1 (เส้นสีส้ม) และกลไกหอร์โนนที่ 2 (เส้นสีน้ำเงิน) โดยเส้นปะแสดงถึงจุดที่กลไกหอร์โนนที่ 2 สามารถกระตุ้นการทำงานของกลไกหอร์โนนที่ 1	80
4.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมกลไกหอร์โนนเทียมคู่ (เส้นสีน้ำเงิน) กับระบบโกรงขาข้อหอร์โนน (เส้นสีส้ม) ด้วยชุดคำสั่งมอเตอร์ที่ข้อต่อ Knee	81

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีหุ่นยนต์แบบอัตโนมัติเข้ามาใช้ในชีวิตประจำวันมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ยังมีปัญหาและข้อจำกัดในการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงหลายประการ [1,2] เนื่องจากเป็นเรื่องยากในการออกแบบชุดคำสั่งการทำงานของหุ่นยนต์ให้ครอบคลุมกับสถานการณ์ที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงของแสง[3] หรือรูปแบบพื้นผิว[4] ฯลฯ ดังนั้นวิธีการออกแบบเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถตอบสนองกับสภาพแวดล้อมแบบต่างๆ จึงมีความซับซ้อนมาก นอกเหนือไปในกรณีที่หุ่นยนต์ได้รับความเสียหายที่ระบบเซนเซอร์ หรือระบบขับเคลื่อน[5] เป็นเหตุให้การทำงานของหุ่นยนต์ผิดปกติหรือไม่สามารถควบคุมได้ เหตุการณ์ในลักษณะนี้มักส่งผลให้หุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานตามชุดคำสั่งแบบเดิมได้ ต้องมีการปรับแต่งค่าตัวแปร เพื่อใช้ในการควบคุมให้เหมาะสมมากขึ้น ต่างจากสิ่งมีชีวิตที่มีความสามารถในการปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่า ซึ่งหนึ่งในกลไกสำคัญที่ช่วยทำให้เกิดความสามารถในการปรับตัวของสิ่งมีชีวิตคือ ระบบต่อมไร้ท่อ (endocrine system) เป็นระบบหลักสารฮอร์โมน ตามการกระตุ้นของสิ่งเร้าทั้งจากภายในและภายนอกร่างกาย เมื่อสารฮอร์โมนทำการจับตัวกับตัวรับสารที่อยู่ตามผนังของเซลล์ จะส่งผลให้เกิดการกระตุ้นการทำงานต่างๆ ของเซลล์ เพื่อทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนสมดุลภายในร่างกาย เช่น วาโซเพรสซิน (vasopressin) หรือ ออร์โโนนแอนติไดยูเรติก (anti-diuretic hormone : ADH) เป็นสารฮอร์โมนที่มีส่วนช่วยในการควบคุมปริมาณน้ำในกระแสเลือด เมื่อปริมาณน้ำในกระแสเลือดมีน้อย ADH จะถูกกระตุ้นให้หลังออกมากขึ้น ทำให้ร่างกายเกิดการตอบสนองด้วยการดูดซึมน้ำจากที่ต่างหากลับเข้ากระแสเลือดมากขึ้น และทำการยับยั้งการขับน้ำออก หากมีปริมาณน้ำในกระแสเลือดมากก็จะยับยั้งการหลั่ง ADH ให้ลดลง เพื่อกระตุ้นให้เกิดการขับน้ำออกด้วยการปัสสาวะ และลดกระบวนการดูดซึมน้ำเข้าสู่กระแสเลือดลง[6]

กลไกการทำงานของสารฮอร์โมนเป็นหนึ่งในแรงบันดาลใจที่ถูกนำมาศึกษา และใช้งานกับหุ่นยนต์โดยเรียกว่า กลไกสารฮอร์โมนเทียม (Artificial hormone mechanism) ซึ่งมีรูปแบบเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่มีการออกแบบชุดคำสั่งคล้ายกับการทำงานของสารฮอร์โมนในระบบต่อมไร้ท่อ เช่น การนำกลไกสารฮอร์โมนเทียมเข้ามาร่วมกับระบบการจัดการพลังงานของหุ่นยนต์ เพื่อทำให้หุ่นยนต์ทำงานในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ตรงกับที่ออกแบบไว้ล่วงหน้า [7] หรือการนำกลไกสารฮอร์โมนเทียมมาแก้ปัญหาการทำงานภายในร่างกายให้เงื่อนไขที่ทับซ้อนและขัดแย้งกัน เช่น ในงานของ Renan C. Moioli [8] ได้ให้หุ่นยนต์ทำงานงานภายในร่างกายให้เงื่อนไข 3 ข้อ คือ 1. คืนอาหารและน้ำกลับมาที่ฐาน 2.

กลบหลีกอันตรายจากภัย nokruan 3.รักษาพลังงานให้พอที่จะกลับฐาน ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ขาดแย้งกัน กล่าวคือหุ่นยนต์ต้องใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ แต่หากออกไปค้นหาไกลจากฐานมากทำให้มีโอกาส พลังงานไม่พอที่จะอาหารกลับฐาน หรือหากหุ่นยนต์กลบหลีกอันตรายมากเกินไป หุ่นยนต์ก็จะ พยายามไม่ห่างจากฐาน ซึ่งทำให้โอกาสในการพบอาหารน้อยลง ดังนั้นมีระบบชอร์โมนเทียมมาช่วยในการปรับระดับการตัดสินใจของหุ่น 3 เงื่อนไขนี้ให้เหมาะสมกับสถานการณ์และสภาพแวดล้อม จึงทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของหุ่นยนต์ที่จะทำการกิจได้ดีมากขึ้น เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มี กลไกชอร์โมน

จากการวิจัยของกลไกชอร์โมนเทียมที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นการใช้งานแบบชอร์โมนเดียว อย่างไรก็ตาม การทำงานของชอร์โมนในร่างกายของสั่งมีชีวิตนั้น ไม่ได้ประกอบด้วยสารชอร์โมนเพียงชนิดเดียว แต่เป็นการทำงานร่วมกันของเครือข่ายชอร์โมน ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นการขับยังหรือกระตุ้น การหลังของชอร์โมน จากต่อมชอร์โมนที่หลังสารชอร์โมนนั้นเอง รวมทั้งสารชอร์โมนตัวอื่นด้วย ทั้ง วิธีทางตรงหรือทางอ้อม เช่นชอร์โมนไทโตริปิน ริลิสซิง (thyrotropin releasing hormone : TRH) ซึ่งไปกระตุ้นต่อมใต้สมองส่วนหน้าให้หลังชอร์โมนไทรอยด์สติมิวเลติง (thyroid stimulating hormone : TSH) ออกมาระบุชอร์โมนนี้ไปกระตุ้นการทำงานของต่อมไทรอยด์ ให้สร้างสารชอร์โมน ไตรไอโอดิไซโรนีน (triiodothyronine : T3) และ สารชอร์โมนไทรอกซิน(thyroxine : T4) เมื่อชอร์โมนไทรอยด์มีระดับที่สูงแล้วจะไปขับยังการสร้าง TSH หรือไปขับยังการสร้าง TRH จากตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นถึงการทำงานร่วมกันของสารชอร์โมนเพื่อรักษาสมดุลภายในร่างกาย ด้วยการขับยัง และกระตุ้นของสารชอร์โมนคนละชนิดกัน[6]

นำมาสู่งานวิจัยด้านหุ่นยนต์ที่ใช้โครงข่ายชอร์โมนเทียมที่เกิดจากการนำกลไกชอร์โมน เทียบหาสายอันมาทำงานร่วมกัน เช่น Teerakittikul [9,10] ใช้ระบบโครงข่ายชอร์โมนเทียม (Artificial hormone network) เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบล้อสามารถปรับเปลี่ยนวิธีการเคลื่อนที่และปฏิบัติการกิจต่อได้ เมื่อล้อของหุ่นยนต์ได้รับความเสียหายบางส่วน โดยการออกแบบโครงข่ายชอร์โมนเทียมในงานนี้ใช้ Cartesian Genetic Programming (CGP) เป็นตัวช่วยในการออกแบบการตั้งค่าและการเชื่อมต่อระหว่างกลไกชอร์โมนเทียมเข้าด้วยกัน เนื่องด้วยการตั้งค่าภายในกลไกชอร์โมนเทียมและรูปแบบการเชื่อมต่อ มีความซับซ้อนและสามารถออกแบบได้หลากหลายรูปแบบ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าวิธีการนี้จะสามารถสร้างโครงข่ายชอร์โมนเทียมที่เหมาะสมกับสถานการณ์ที่ซับซ้อน แต่ต้องใช้เวลาในการประมวลผลนาน ซึ่งเป็นอีกปัญหาหนึ่งของการออกแบบโครงข่ายชอร์โมนเทียม

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ งานวิจัยด้านหุ่นยนต์ที่เกี่ยวข้องกับกลไกชอร์โมนเทียมแสดงให้เห็นถึง ความสามารถในการปรับเปลี่ยนการทำงานของหุ่นยนต์ได้ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของ

สภาพแวดล้อมทั้งภายในและภายนอก รวมทั้งสถานการณ์ที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า แต่กลไกชอร์โนนเที่ยมนั้นยังมีข้อจำกัดและปัญหาในการใช้งานอยู่ เช่น โนเดลยังไม่สามารถตอบสนองรูปแบบนวนรูปแบบให้เหมือนกับชอร์โนนในสิ่งมีชีวิต หรือการนำกลไกชอร์โนนเที่ยมมาใช้งานกับหุ่นยนต์ที่มีความซับซ้อนสูง เช่น หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบขา ดังนั้นเป้าหมายของงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นหลักที่ 3 ประเด็น คือ

- ประเด็นที่ 1 การปรับปรุงกลไกชอร์โนนเที่ยม เพื่อเพิ่มรูปแบบในการตอบสนองของกลไกชอร์โนนเที่ยม ให้ความเข้มข้นของชอร์โนน ตอบสนองกับจำนวนตัวรับชอร์โนนที่เปลี่ยนไป เมื่อมีการเพิ่มจำนวนขึ้น ความเข้มข้นควรลดลงอย่างรวดเร็วตามจำนวนที่เพิ่มขึ้น
- ประเด็นที่ 2 การนำกลไกชอร์โนนเที่ยมมาใช้ในการปรับเปลี่ยนท่าทางการเดินของหุ่นยนต์ เช่น เมื่อพบพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลง หรือในกรณีที่ได้รับความเสียหายบางส่วนแบบไม่ทราบชุดเสียหาย
- ประเด็นที่ 3 นำโครงข่ายชอร์โนนเที่ยมมาใช้งานกับการเดินของหุ่นยนต์อัตโนมัติที่มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบขา โดยเปรียบเทียบการทำงานแบบเป็นโครงข่ายและไม่เป็นโครงข่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงกลไกชอร์โนนเที่ยมให้มีรูปแบบการตอบสนองความเข้มข้นของชอร์โนน เมื่อจำนวนตัวรับชอร์โนนเปลี่ยนแปลงไป
2. ศึกษาการนำกลไกชอร์โนนเที่ยมมาใช้สำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบขา ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายในและภายนอก
3. เปรียบเทียบความสามารถในการปรับตัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบขาระหว่างระบบที่ไม่มีกลไกชอร์โนนเที่ยม, แบบกลไกชอร์โนนคู่ และแบบโครงข่ายชอร์โนนเที่ยม
4. เพื่อสร้างเคราะห์หลักการออกแบบโครงข่ายชอร์โนนเที่ยม

1.3 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. กลไกชอร์โนนเที่ยมมีรูปแบบการตอบสนองที่หลากหลายขึ้น
2. ทราบถึงความสามารถในการปรับตัวด้วยกลไกชอร์โนนเที่ยมของหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบขา
3. ได้หลักการออกแบบโครงข่ายชอร์โนนเที่ยม ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ ได้

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาระบบท่อไมร์ห่อเพื่อนำมาปรับปรุงโมเดลของกลไกชอร์โนนเที่ยม
2. ทำการเปรียบเทียบรูปแบบการตอบสนองโมเดลของกลไกชอร์โนนเที่ยมแบบเก่าและใหม่
3. ทำการทดสอบการปรับตัวของกลไกชอร์โนนเที่ยม บนหุ้นชนที่ 6 ขนาดโปรแกรมจำลองของ LPZrobots โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่
 - การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายนอก โดยใช้ลักษณะของพื้นผิว 6 รูปแบบ และใช้ตัววัดประเมินความสามารถ 3 ค่า ดังนี้ ค่าการกระจัด (Displacement), เสถียรภาพ (Stability) และความกลมกลืน (Harmony)
 - การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายใน ด้วยการหยุดมอเตอร์ที่บริเวณข้อต่อขา ไม่ให้เกิดการหมุนตามคำสั่งของระบบควบคุม
4. ทำการทดสอบความสามารถในการปรับตัวของหุ้นชนที่ 4 ขา โดยให้หุ้นชนเดินบนพื้นเรียบ และทำการเปรียบเทียบความสามารถระหว่างระบบที่ไม่มีกลไกชอร์โนนเที่ยม, กลไกชอร์โนนเที่ยมแบบเก่า และโครงข่ายชอร์โนนเที่ยม
5. ทำการสร้างกระบวนการการออกแบบโครงข่ายชอร์โนนเที่ยม

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 1 เป็นบทนำที่กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของงานวิจัยนี้ รวมไปถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 อธิบายถึงหลักการและพัฒนาการของกลไกชอร์โนนเที่ยมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และนำเสนอโมเดลใหม่ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ พร้อมกับเปรียบเทียบผลการทำงานในเชิงของโมเดลทางคณิตศาสตร์

บทที่ 3 นำเสนอการทดลองที่นำกลไกชอร์โนนเที่ยมมาใช้กับหุ้นชนที่ 3 ซึ่งทำให้เข้าใจถึงความสามารถ และข้อจำกัดของการใช้งานกลไกชอร์โนนเที่ยมเพียงหนึ่งกลไก ในการทดลองส่วนนี้จะมุ่งไปที่การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมภายนอกและภายใน และมีการเปรียบเทียบกลไกชอร์โนนเที่ยมแบบเดิม กับแบบใหม่ โดยผลทั้งหมดของการศึกษาในบทนี้จะเป็นแนวทางไปสู่การออกแบบระบบโครงข่ายชอร์โนนเที่ยมในบทถัดไป

บทที่ 4 กล่าวถึงการนำกลไกฮอร์โมนเทียมมาเชื่อมต่อเป็นโครงข่ายสำหรับปรับการก้าวเดินของหุ่นยนต์ 4 ขา โดยมุ่งเน้นการเบริกขึ้นเทียบการทำงานของระบบที่ไม่มีฮอร์โมนเทียม (No hormone), มีฮอร์โมนเทียมมากกว่าหนึ่งชุด (Multiple hormone) และโครงข่ายฮอร์โมนเทียม (Hormone network) ซึ่งจะทำให้ทราบถึงหลักการออกแบบโครงข่ายฮอร์โมนเทียม และทราบถึงข้อจำกัดของการทำงานแบบโครงข่ายฮอร์โมนเทียม

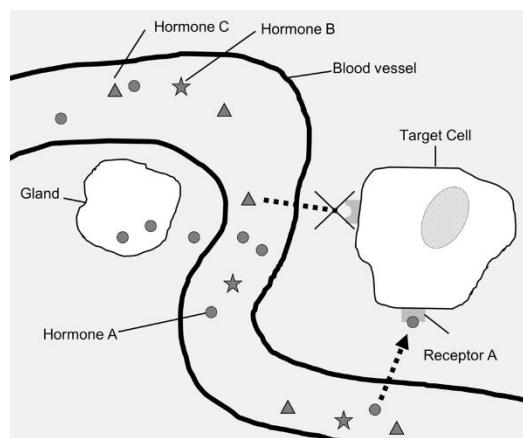
บทที่ 5 เป็นบทสรุปของงานวิจัยนี้ที่มีเป้าหมายในการพัฒนาโมเดลของฮอร์โมนเทียม และการนำฮอร์โมนเทียมมาใช้งานร่วมกับระบบที่มีความซับซ้อนสูง เช่น ระบบประสาทเทียม และอธิบายข้อจำกัดของการใช้งาน

บทที่ 2 กลไกฮอร์โมนเทียม

บทนี้จะอธิบายภาพโดยรวมของกลไกฮอร์โมนในธรรมชาติ พัฒนาการของกลไกฮอร์โมนเทียมดังแต่เริ่มต้นมาจนถึงปัจจุบัน ข้อจำกัดของโมเดลกลไกฮอร์โมนเทียมเดิมที่นำไปสู่การปรับปรุงโมเดลกลไกฮอร์โมนเทียมใหม่ โดยมีการเปรียบเทียบการตอบสนองของโมเดลแบบเก่าและแบบใหม่ ในส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปถึงวิธีการใช้งานและการปรับแต่งค่าตัวแปรภายในกลไกฮอร์โมนเทียมให้เหมาะสมกับการใช้งาน

2.1 กลไกฮอร์โมนในธรรมชาติ

สารออร์โมน คือ สารเคมีที่เกิดจากต่อมไร้ท่อ (Endocrine gland) ซึ่งส่วนใหญ่แล้ว สามารถถูกส่งผ่านไปยังส่วนต่าง ๆ ของร่างกายผ่านทางกระแสเลือด เพื่อทำการกระตุ้นและขับยั้งการทำงานของเซลล์เป้าหมาย (Target cell) และทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนการทำงานภายในเซลล์นั้น ๆ โดยที่ลักษณะของการกระตุ้นหรือขับยั้งที่เซลล์เป้าหมายนี้เกิดจากตัวรับฮอร์โมนที่อยู่บริเวณผนังเซลล์ เมื่อสารออร์โมนจับตัวกับตัวรับฮอร์โมนที่มีลักษณะเหมือนระบบกุญแจ (Lock-and-Key) คือในกรณีที่ลูกกุญแจไม่ได้มีร่องหรือฟันเพื่อที่ตรงกับแม่กุญแจจะไม่สามารถทำงานได้ ดังภาพจำลองในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงตัวอย่างของต่อมไร้ท่อที่หลังสารออร์โมน A (วงกลม) สู่หลอดเลือด และที่บริเวณผนังของเซลล์เป้าหมายจะพบว่ามีตัวรับฮอร์โมน A ที่มีลักษณะตัวรับที่จับกับสารออร์โมน A ได้ ทำให้สามารถจับตัวและทำการกระตุ้นเซลล์เป้าหมาย ในทางตรงกันข้าม สารออร์โมน C ซึ่งมีรูปแบบที่ต่างออกไป (สามเหลี่ยม) ทำให้ไม่สามารถถูกจับด้วยเซลล์เป้าหมายได้ เซลล์เป้าหมายจึงไม่ถูกกระตุ้นจากฮอร์โมน C



รูปที่ 2.1 แสดงกลไกฮอร์โมนในธรรมชาติ

กลไกในการทำงานของฮอร์โมนในธรรมชาติที่จะรักษาสมดุลของสารฮอร์โมนนั้นเกิดจากการทำงาน 2 ส่วน ได้แก่ กลไกการควบคุมสารฮอร์โมน และกระบวนการกำจัดสารฮอร์โมน ดังนั้นในหัวข้อส่วนของกลไกการควบคุมสารฮอร์โมนจะอธิบายถึงรูปแบบการหลังและการยับยั้งของต่อมไร้ท่อในการผลิตสารฮอร์โมน ในส่วนหัวข้อกระบวนการกำจัดสารฮอร์โมน จะอธิบายถึงกระบวนการทำงานเพื่อลดthonสารฮอร์โมนที่คงอยู่ เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการทำงานของสารฮอร์โมนในธรรมชาติ

2.1.1 กลไกในการควบคุมสารฮอร์โมน

การควบคุมปริมาณความเข้มข้นของสารฮอร์โมนนั้นมีหลากหลายรูปแบบ โดยทั่วไปการแบ่งรูปแบบมีหลายหลักการ งานวิจัยนี้อ้างอิงตามหลักการของ Guyton [6] ซึ่งแบ่งการควบคุมสารฮอร์โมนเป็น 3 รูปแบบดังนี้

รูปแบบที่หนึ่ง คือการควบคุมการหลังสารฮอร์โมนแบบยับยั้งข้อกลับ (Negative feedback) เป็นรูปแบบการตอบสนองแบบผูกพันกัน และเป็นรูปแบบที่พบมากที่สุดในสิ่งมีชีวิต คือเมื่อได้รับการกระตุ้นมากทำให้ต่อมนี้ทำการยับยั้งการหลังสารหรือลดปริมาณการหลังสารลง และในทางกลับกันหากได้รับการกระตุ้นน้อย ต่อมจะทำการหลังสารเพิ่มมากขึ้น เช่นสาร Hormone Thyroxin (Thyroxin hormone) ซึ่งถูกผลิตมาจากต่อมไทroid (Thyroid gland) โดยรับการกระตุ้นจากสารฮอร์โมนกระตุ้นต่อมไทรอยด์ (Thyroid-stimulating hormone : TSH) จากต่อมใต้สมอง (Pituitary gland) ซึ่งต่อมนี้จะได้รับการกระตุ้นจากสาร Hormone Thyrotropin (Thyrotropin releasing hormone : TRH) ที่หลั่งมาจากต่อมไอโอดีฟามัส ดังนั้นเมื่อปริมาณสาร Hormone Thyroxin เพิ่มขึ้นจะทำการกระตุ้นต่อมใต้สมองและต่อมไอโอดีฟามัสให้ลดการผลิต TRH และ TSH ลงทำให้ปริมาณของสาร Hormone Thyroxinลดลง

รูปแบบที่สอง คือการควบคุมการหลังสารฮอร์โมนแบบกระตุ้นข้อกลับ (Positive feedback) เมื่อมีการกระตุ้นน้อยลงต่อมจะลดการหลังสารลงตามไปด้วย และในทางกลับกันหากได้รับการกระตุ้นมากขึ้นต่อมจะทำการหลังสารออกมากขึ้นตามไป เช่นการดูดนมมารดาของทารกทำให้กระตุ้นต่อมไอโอดีฟามัส และต่อมไอโอดีฟามัสส่งสัญญาณกระตุ้นไปที่ต่อมใต้สมองส่วนหน้าให้หลังสารฮอร์โมนออกซิโทซิน (Oxytocin) เพื่อกระตุ้นให้เกิดการสร้างน้ำนมและเมื่อทารกดูดนมมากขึ้นทำให้มีการหลังออกซิโทซินมากขึ้น

รูปแบบที่สาม คือการหลังสารฮอร์โมนตามปริมาณการใช้ (Cyclical variations occur in hormone release) รูปแบบนี้สารฮอร์โมนจะถูกหลังออกมากเมื่อมีความจำเป็นโดยที่ต่อมไร้ท่อจะตอบสนองต่อตัวกระตุ้นเมื่อเซลล์ถูกกระตุ้นมากจะมีการหลังสองลักษณะ (Biphasic) คือมีการหลังสารออกมากและรวดเร็วในระยะแรก และลดการหลังลดลงช่วงหลัง ดังนั้นอัตราการหลังของสาร Hormone จึงมีลักษณะขึ้นลงเป็นช่วง

เช่น ฮอร์โมนลูทีไนซิง (Luteinizing hormone : LH) เป็นฮอร์โมนเพศมีการหลั่งเป็นช่วงเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง (Circhoral) และครีโนคอร์ติโคทร็อพิกฮอร์โมน (Adrenocorticotrophic hormone : ACTH) ทำหน้าที่กระตุ้นให้มีการสร้างฮอร์โมนกลูโคคور์ติโคઇด์และมีเนราโลโคร์ติโคઇด์ มีลักษณะการหลั่งปริมาณมากเป็นช่วงเวลาเดิมกันทุกวัน (Diurnal), ฮอร์โมนควบคุมการเจริญเติบโต (Growth hormone : GH) จะหลั่งขณะที่นอนหลับสนิทจึงมีรอบการหลั่งใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง (Circadian) หรือโกรนาโอดิโตรปิน (Gonadotrophins) เป็นสารฮอร์โมนที่มีผลต่อการสืบพันธุ์ในมนุษย์ผู้หญิงช่วงก่อนคลายไปทุก 28 วัน หากเป็นลิ่งมีชีวิตอื่น เช่น วัวหรือปลาดุกจะขึ้นลงตามฤดูกาลซึ่งรูปแบบการหลั่งขึ้นอยู่กับช่วงเวลาประมาณ 1 ปี หรือต่อฤดูกาล (Circannual/seasonal)

จากรูปแบบในการควบคุมปริมาณความเข้มข้นของสารฮอร์โมนในส่วนนี้เป็นหลักการพื้นฐานไปสู่การสร้างกลไกฮอร์โมนเทียม

2.1.2 กระบวนการกำจัดสารฮอร์โมน

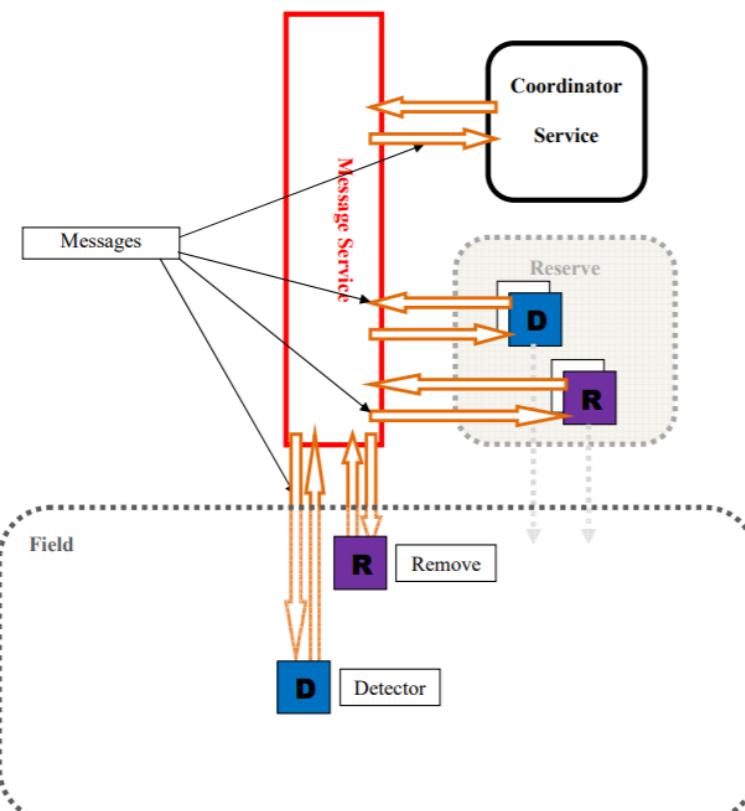
กระบวนการกำจัดสารฮอร์โมนเป็นการลดปริมาณของสารฮอร์โมน เนื่องจากต่อมไร้ท่อทำหน้าที่ผลิตและหลั่งสารฮอร์โมน ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณสารเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการกำจัดสารจึงเป็นอีกส่วนสำคัญสำหรับการรักษาระดับความสมดุลของระบบต่อมไร้ท่อ การกำจัดสารฮอร์โมนเกิดจากนั้งขั้น 4 อย่างได้แก่ กระบวนการเผาผลาญ, การจับตัวของสารฮอร์โมนกับตัวรับสารฮอร์โมน, การขับถ่ายด้วยตับและการขับถ่ายด้วยไต [6] โดยส่วนใหญ่แล้วการย่อยสลายสารฮอร์โมนเกิดจากการเผาผลาญ ซึ่งการลดลงนั้นสามารถคำนวณได้ด้วยสมการครึ่งชีวิต (half-live) ฮอร์โมนแต่ละชนิดใช้เวลาไม่เท่ากัน ในกลุ่มที่เป็นฮอร์โมนชนิดสเตโรอยจะมีช่วงตั้งแต่ประมาณ 20 นาทีถึง 100 นาที และกลุ่มที่เป็นแปปไทด์ ฮอร์โมนจะมีช่วงเวลาประมาณ 1-6 วัน

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการสำคัญที่นำมาใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงกลไกฮอร์โมนเทียม แบบดึงเดินสู่กลไกฮอร์โมนเทียมแบบปรับปรุง โดยจะถูกอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 2.4 การปรับปรุงกลไกฮอร์โมนเทียม

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลไกฮอร์โมนเทียม

กลไกฮอร์โมนเทียมได้รับการศึกษาและพัฒนาเป็นเวลานานจนถึงปัจจุบัน ทำให้กลไกฮอร์โมนเทียมสามารถนำมาใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ ภายใต้หัวข้อนี้เป็นการกล่าวถึงจุดเริ่มต้นของการนำฮอร์โมนเทียมมาใช้งานและพัฒนาต่อมาเป็นระบบการทำงานที่มีประสิทธิภาพและความซับซ้อนที่สูงขึ้น ในช่วงแรกของกลไกฮอร์โมนเทียม เริ่มต้นจากการศึกษาการทำงานของฮอร์โมนในมนุษย์ที่

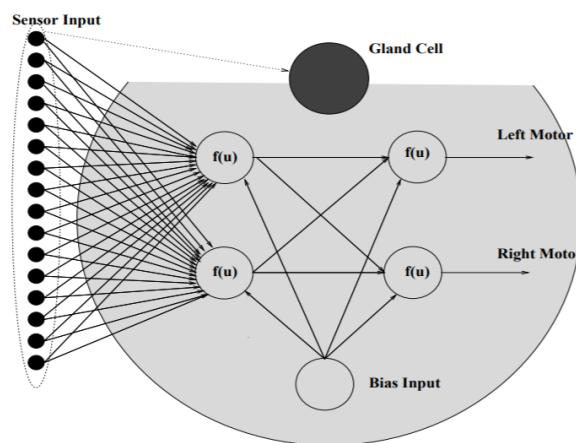
เจาะจงชนิดของสารออร์โอมน และสารออร์โอมนนั้นต้องมีลักษณะการทำงานที่สอดคล้องกับการกิจกรรมการออกแบบระบบควบคุมให้มีการตอบสนองคล้ายกับสารออร์โอมนในธรรมชาติ [11,12,13] เช่น Khalique [11] ได้นำหลักการทำงานของออร์โอมนอินชูลินที่มีหน้าที่ควบคุมปริมาณน้ำตาลกลูโคสในกระเพาะเดื่อด้วยลักษณะการทำงานของออร์โอมนอินชูลินจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำตาลสูงขึ้น ส่งผลให้เพิ่มกระบวนการเผาผลาญและเปลี่ยนน้ำตาลเป็นไขมัน ซึ่งวิธีการจัดเก็บน้ำตาลของออร์โอมนอินชูลินเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการจัดการกับปริมาณน้ำตาลที่ไม่สามารถคาดเดาได้ก่อนล่วงหน้า จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการกิจของหุ่นยนต์บนข่ายและจัดเก็บแร่ โดยการทดลองของ Khalique แบ่งหุ่นยนต์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มทำหน้าที่ค้นหา และกลุ่มทำหน้าที่ขนข่ายและจัดเก็บ รูปแบบการทำงานของหุ่นยนต์ค้นหาจะมีหน้าที่ค้นหาเรเพียงอย่างเดียว เมื่อพบแร่หุ่นยนต์ค้นหาจะส่งข้อมูลพิกัดของแร่และทิศทางของหุ่นยนต์ไปที่สถานีกลาง (Coordination service) เมื่อสถานีกลางรับข้อมูลจากหุ่นยนต์ค้นหาเปรียบเสมือนการถูกกระตุ้น สถานีกลางจะทำการส่งข้อมูลให้กับหุ่นยนต์บนข่ายเพื่อทำการกิจจัดเก็บ ทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนจำนวนของหุ่นยนต์บนข่ายดังตัวอย่างแผนผังแสดงระบบการทำงานในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนผังแสดงระบบการทำงานของ Khalique [14] โดยที่ D คือหุ่นยนต์สำหรับค้นหา และ R คือหุ่นยนต์สำหรับการขนข่ายแร่

จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือการเกิดความสามารถในการปรับเพิ่มลดจำนวนการทำงานของหุ่นยนต์ให้เหมาะสมกับจำนวนแร่ โดยไม่จำกัดจำนวนหุ่นยนต์ อีกทั้งได้รับการยอมรับในเชิงวิชาการ ไม่สามารถนำวิธีการนี้ไปใช้กับการกิจกรรมแบบอื่นได้โดยตรง ต้องทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างรูปแบบการทำงานทำกลไกอย่างใหม่ โดยต้องทำการศึกษาและค้นหาชนิดของสารออร์โนนที่สอดคล้องกับการกิจกรรมนั้น ๆ ซึ่งเป็นข้อตอนที่ใช้เวลานาน

จากปัญหาของกลไกอย่างใหม่ที่จะจดจำชนิดของสารออร์โนน นำไปสู่การพัฒนาเป็นรูปแบบที่ไม่เจาะจงกับชนิดของสารออร์โนน โดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายการทำงานของกลไกด้วยการมุ่งความสนใจไปที่ระบบต่อมไร้ท่อของมนุษย์ การทำงานของระบบต่อมไร้ท่อไม่สามารถทำงานเพียงส่วนเดียว จะต้องมีระบบประสาทเข้ามาทำงานร่วมด้วย จึงทำให้กลไกอย่างใหม่ต้องอยู่รวมกับระบบโครงสร้างประสาทเทียม (Artificial neural network: ANN) [14,15,16,17] เช่น Neal and Timmis [17] ที่ใช้ ANN เป็นส่วนหลักในการทำงานตัดสินใจของหุ่นยนต์ และนำกลไกอย่างใหม่ เทียบมาช่วยในการปรับค่าน้ำหนัก (Weight) ของ ANN ดังรูปที่ 2.3 การทดลองของ Timmis แสดงให้ถึงการเปลี่ยนพฤติกรรมในการตอบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์ และการใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ทำให้ง่ายในการปรับแต่งค่าเพื่อประยุกต์ใช้งานกับระบบอื่น

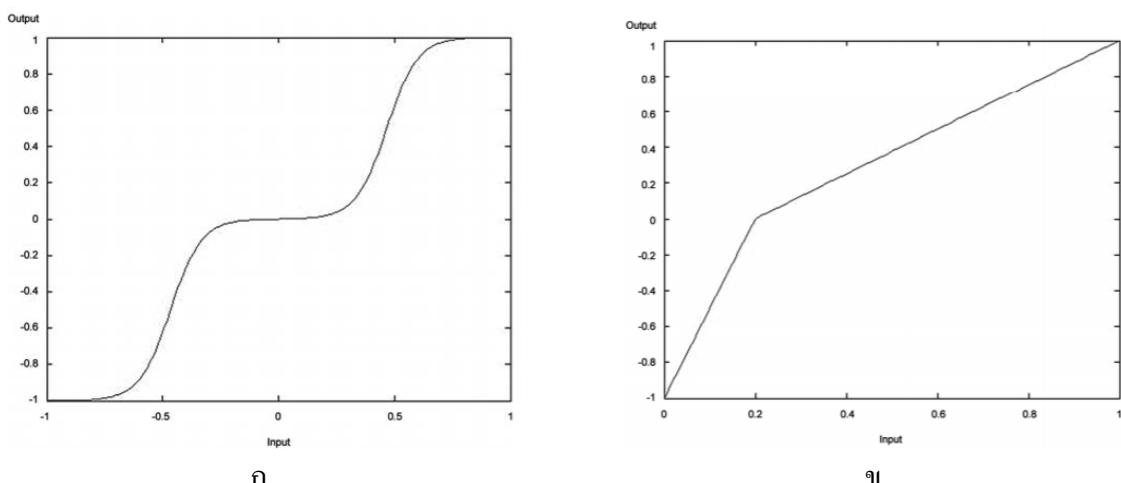


รูปที่ 2.3 แผนผังแสดงระบบการทำงานของ Timmis [17]

โมเดลของ Timmis ได้รับความนิยมในการนำมาใช้กับหุ่นยนต์มากขึ้น [7,8,9,15] โดยเฉพาะกลุ่มวิจัยหุ่นยนต์อัตโนมัติที่มีเป้าหมายให้หุ่นยนต์สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงและไม่สามารถคาดเดาสถานการณ์ได้ล่วงหน้าอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนาน โดยไม่ต้องมีการรีเซ็ตระบบหรือให้มนุษย์เข้ามาช่วยเหลือ (Long term autonomy) [18] อีกทั้งได้รับการยอมรับในเชิงวิชาการ ไม่สามารถนำวิธีการนี้ไปใช้กับการกิจกรรมแบบอื่นได้โดยตรง ต้องทำการปรับเปลี่ยนการตอบสนองให้เพียงตัวแปรต่าง ๆ ภายในกลไก เช่น อัตราการหลังสารออร์โนน, อัตราการแพร่กระจายสารออร์โนน และอัตรา

การเสื่อมสภาพสารออร์โนน ส่งผลให้การรักษาสมดุลของสารออร์โนนที่เกิดจากการออกแบบกลไก ออร์โนนเที่ยมกับระบบควบคุมหุ่นยนต์เป็นไปได้ยากไม่สามารถครอบคลุมรูปแบบการทำงานทำภารกิจที่หลากหลาย

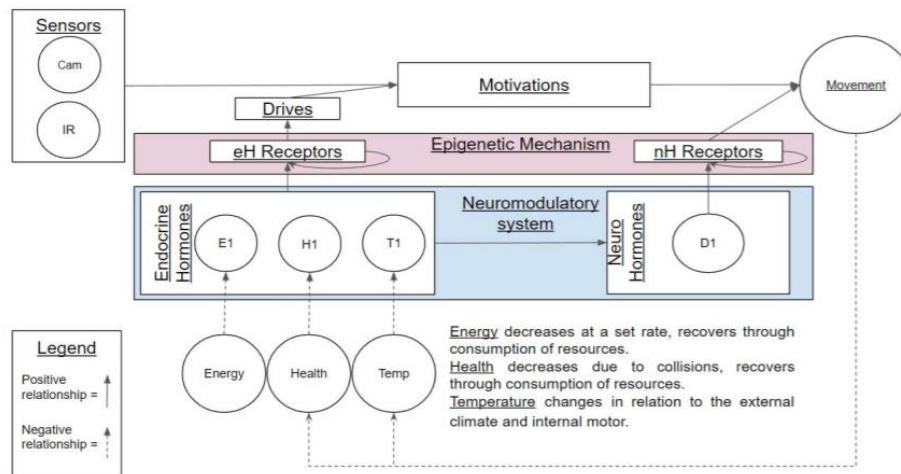
จากปัญหานี้ Pitonakova [19] พยายามนำเสนอระบบควบคุมหุ่นยนต์ที่มีความเสถียรที่สูงขึ้น โดยมีแนวคิดในการพัฒนากลไกออร์โนนเที่ยมให้สามารถปรับรูปแบบการตอบสนองของออร์โนนได้หลากหลายขึ้น โดยการเปลี่ยนรูปแบบของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ของการหลังสารให้เป็นแบบต่าง ๆ เช่นแบบเชิงเส้น, แบบผกผัน, แบบขั้นบันไดหรือแบบตัวเอส (Sigmoid function) เป็นต้น ดังรูปที่ 2.4 เป็นรูปแบบการตอบสนองที่ Pitonakova กำหนดรูปแบบการหลังขึ้นเอง ซึ่งต่างจากเดิมที่มีเพียงรูปแบบตัวเอสเพียงอย่างเดียว ลักษณะของรูปแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของหุ่นยนต์มีรูปแบบที่หลากหลายมากกว่าแบบเดิม และมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อหุ่นยนต์ได้รับการรับกวนจากภายนอก



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการหลังสารออร์โนนต่อการกระตุ้น [19]

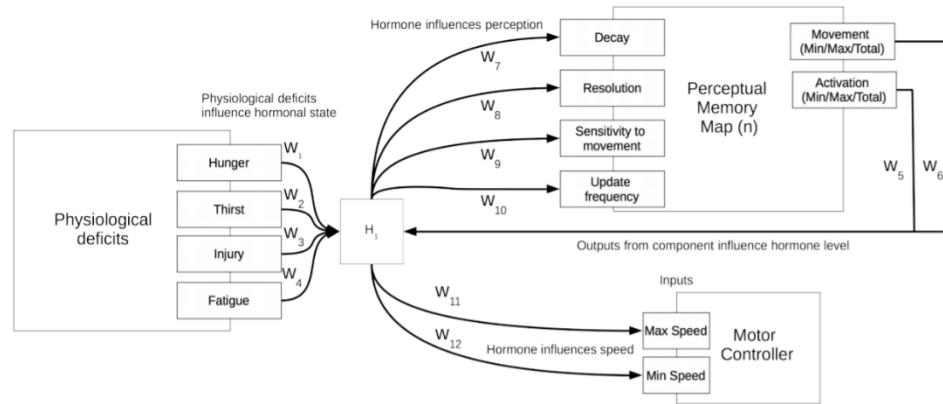
ในปัจจุบันกลไกออร์โนนเที่ยมถูกนำมาใช้กับการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยการนำระบบอื่นมาใช้งานด้วยนอกจากระบบประสาทเที่ยม เช่น งานวิจัยของ Lones แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำให้หุ่นยนต์สามารถปรับตัวตามสภาพแวดล้อม 6 รูปแบบ (รูปแบบอุดมสมบูรณ์, รูปแบบแหล่งพลังงานที่แปรปรวน, รูปแบบก่อการเคลื่อนที่, รูปแบบของสภาพแวดล้อมกลางวัน-กลางคืน, รูปแบบก่อการเคลื่อนที่รวมกับแหล่งพลังงานที่แปรปรวน, รูปแบบผสมระหว่างแหล่งพลังงานที่แปรปรวน ก่อการเคลื่อนที่ และสภาพแวดล้อมกลางวัน-กลางคืน) และสามารถเพิ่มระยะเวลาในการรักษาสมดุลในการทำงานของหุ่นยนต์ได้นานขึ้นกว่าระบบควบคุมเดิม โดยรูปที่ 2.5 แสดงถึงระบบควบคุมการทำงานมีส่วนประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ ระบบควบคุมพื้นฐานใช้สำหรับควบคุมและ

แสดงพฤติกรรมของหุ่นยนต์ตามเงื่อนไขที่กำหนด (Movement), ระบบชอร์โนนที่ขึ้นใช้สำหรับในการปรับค่าความคุณและการแสดงพฤติกรรม (Neuromodulatory system) และระบบเหนือพันธุกรรม (Epigenetic mechanism) ใช้สำหรับปรับการทำงานของตัวรับชอร์โนนให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมมากขึ้น [20]



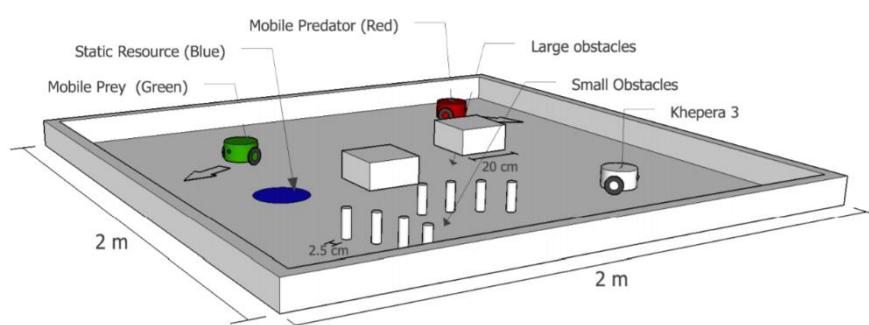
รูปที่ 2.5 แผนผังแสดงระบบการทำงานของ Lones [20]

หรืองานวิจัยของ Hickton[21] ที่มีเป้าหมายเพื่อออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์ที่มีพฤติกรรมซับซ้อนได้คล้ายสั่งมีชีวิต ด้วยการแสดงพฤติกรรมของสัตว์นักล่าต่อเหยื่อในสถานการณ์ต่าง ๆ เช่นในกรณีที่สัตว์นักล่าไม่ทิวแต่กระหายน้ำและเห็นอยู่ล่า สัตว์นักล่าจะตัดสินใจมุ่งไปแหล่งน้ำหรือทำการพักผ่อนถึงแม้ว่าสัตว์นักล่าจะมองเห็นเหยื่อที่ตาม โดยมีหลักการออกแบบดังรูปที่ 2.6 ที่ใช้กลไกชอร์โนนที่ขึ้นเพียงหนึ่งกลไกเป็นแกนกลาง โดยรับการกระตุ้นมาจากค่าสภาพการขาดแคลน (ความทิว, ความกระหายน้ำ, ความเจ็บปวด และความเหนื่อยล้า) และ Perceptual Memory Map (PMM) เป็นส่วนที่ช่วยในการจดจำข้อมูลจากเซนเซอร์เพื่อคาดการณ์ ในส่วนของเซลล์เป้าหมายเป็นการช่วยในการปรับค่าสถานะของ PMM และการค่าความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ ผลประโยชน์โดยอ้อมของ PMM นั้นทำให้ไม่จำเป็นต้องบีดติดกับชนิดหรือจำนวนของข้อมูลจากเซนเซอร์



รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงระบบการทำงานของ Hickton [21]

โดยรูปแบบการทดลองเป็นสนามรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดด้านละ 2 เมตร ทำการติดตั้งเก็บข่าวงขนาดเล็กและใหญ่ไว้ภายในสนามและแหล่งน้ำ 1 แหล่ง โดยมีหุ่นยนต์นักล่าและหุ่นยนต์เหยื่ออย่างละ 1 ตัว และกำหนดให้หุ่นยนต์เหยื่อต้องหนีนักล่าตลอดเวลาดังรูปที่ 2.7 ในการทดลองนี้พบว่ากลไกชอร์โนนสามารถช่วยปรับการตัดสินใจให้เหมาะสมกับสถานการณ์ เช่นในกรณีที่หุ่นยนต์นักล่าเคลื่อนที่เข้าพื้นที่มีลิ้งกีดขวางในช่วงที่ค่าสภาวะขาดแคลนไม่มากนัก (ไม่หิว, ไม่กระหายน้ำ, ไม่เจ็บปวด หรือไม่เหนื่อยล้า) หุ่นยนต์จะแสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ช้าลงคล้ายกับมีความกลัว ด้วยการลดค่าความเร็วเมื่อเดอร์ ต่างจากกรณีที่ค่าสภาวะขาดแคลนสูงขึ้นทำให้หุ่นยนต์นักล่าพยายามเคลื่อนที่มากขึ้นเพื่อค้นหาเหยื่อและล่าเหยื่อ

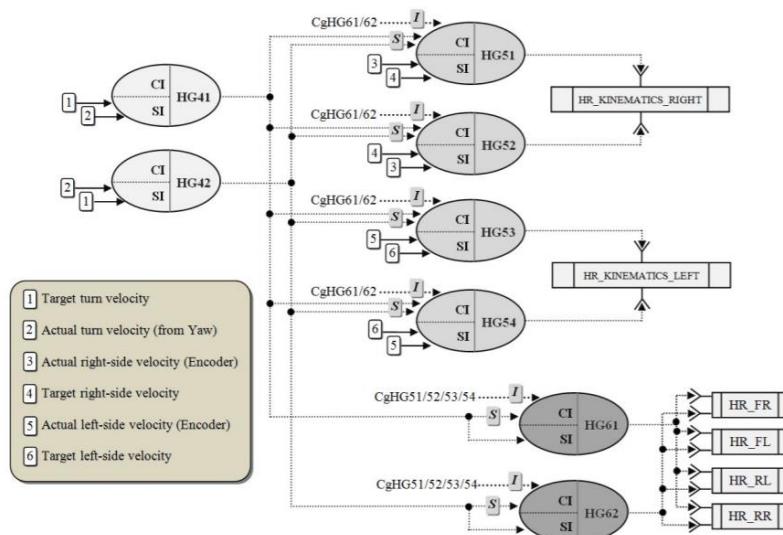


รูปที่ 2.7 สนามทดสอบพฤติกรรมหุ่นยนต์นักล่าของ Hickton [21]

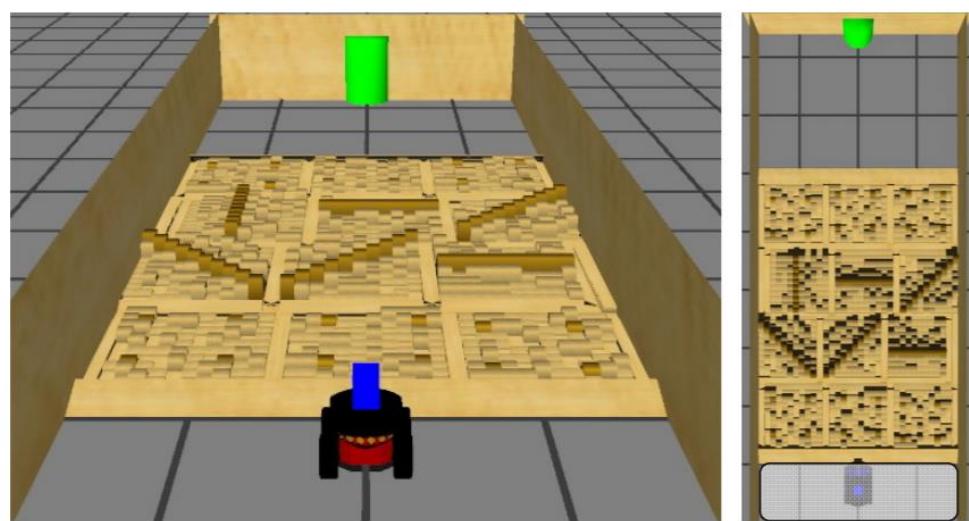
จากการทดลองของ Hickton ที่นำกลไกชอร์โนนเที่ยมมาใช้งานร่วมกับระบบที่มีความซับซ้อนสูง (PMM) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมตามสภาพแวดล้อมจากภายในและภายนอกได้มากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ด้วยระบบนี้มีกลไกชอร์โนนเพียง 1 กลไกเท่านั้น

Hickton ได้คาดการณ์ว่าหากมีจำนวนกลไกอร์โรมน์ที่มากขึ้นอาจทำให้หุ่นยนต์แสดงพฤติกรรมที่ซับซ้อนกับสถานการณ์ได้หลากหลายกว่าเดิม

จากที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยส่วนใหญ่พบว่ากลไกอร์โรมน์เทียมถูกนำมาใช้งานเพียงหนึ่งกลไก ถ้าหากมีจำนวนกลไกที่มากกว่าหนึ่งกลไกก็จะแยกการทำงานของแต่ละกลไกออกจากกัน เนื่องจากปัญหาความซับซ้อนในการเชื่อมต่อระหว่างกลไกอร์โรมน์ และการปรับค่าตัวแปรภายในกลไก ทำให้ Teerakittikul [10] นำเสนอการใช้งานโครงข่ายอร์โรมน์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.8) เพื่อสร้างความสามารถในการปรับตัวให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบ 4 ล้อ (ดังแสดงด้วยตัวอย่างในรูปที่ 2.9) เพื่อทำการกิจกิ้นหาวัตถุในพื้นที่ที่กำหนด เมื่อหุ่นยนต์เกิดความเสียหายกับระบบเซนเซอร์ และ/หรือ ระบบขับเคลื่อน



รูปที่ 2.8 แผนผังแสดงระบบการทำงานแบบโครงข่ายอร์โรมน์เทียมของ Teerakittikul [10]



รูปที่ 2.9 สนามทดสอบหุ่นยนต์ 4 ล้อ เพื่อการกิ้นหาวัตถุ [10]

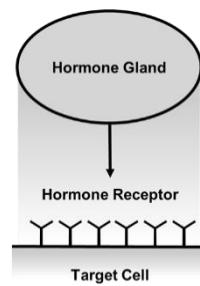
จากปัญหาการกำหนดรูปแบบและเลือกการเชื่อมต่อระหว่างกลไกฮอร์โมนเข้าด้วยกัน รวมถึงการกำหนดค่าตัวแปรสำหรับการปรับการตอบสนองภายในแต่ละกลไกที่มีความสัมพันธ์ต่อกัน เป็นเรื่องซับซ้อนในการออกแบบ Teerakittikul จึงนำเสนองานใช้ Cartesian Genetic Programming (CGP) มาช่วยในการออกแบบโครงข่ายฮอร์โมนเทียม โดย CGP นั้นเป็นเทคนิคนี้ที่ใช้สำหรับการหาความเหมาะสม (Optimize) สำหรับค่าต่าง ๆ โดยมีลักษณะการทำงานเป็นรูปแบบของรหัสพันธุกรรม (genetic code) และต้องกำหนดเงื่อนไขเพื่อวัดผลการทำงานในแต่ละรอบ ซึ่งค่า fitness score คือตัวบ่งชี้ถึงความเหมาะสมของตัวแปรที่ CGP ทำการเลือก และเป็นค่ากำหนดการจบการทำงานหรือทำคำนวนซ้ำ ซึ่งการใช้ CGP เพื่อสร้างรูปแบบการเชื่อมต่อของโครงข่ายฮอร์โมนเทียม และกำหนดรูปแบบของกลไกฮอร์โมนแต่ละอัน มีข้อเสียคือการใช้เวลานาน เนื่องจากต้องใช้จำนวนรอบที่สูงเพื่อทำให้ค่า fitness score ถูกลงสู่ค่าที่เหมาะสม

จากการวิจัยที่เกี่ยวข้องของกลไกฮอร์โมนเทียมที่กล่าวมาแสดงให้เห็นถึงปัญหาและแนวทางในการพัฒนาของกลไกฮอร์โมนเทียม ซึ่งในการพัฒนาที่ผ่านมายังมีข้อจำกัดของกลไกฮอร์โมนเทียมทำให้มีประเด็นในการพัฒนาอยู่ 3 เรื่องได้แก่

- ประเด็นที่หนึ่ง คือ การปรับปรุงโมเดลสามารถทำให้การตอบสนองของกลไกมีความหลากหลายขึ้น ทำให้เพิ่มโอกาสการทำการกิจที่ซับซ้อนหรือรูปแบบการตอบสนองที่หลากหลายได้
- ประเด็นที่สอง คือ การนำกลไกฮอร์โมนมาใช้งานร่วมกับระบบที่มีความซับซ้อนสูงนั้นแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปรับเปลี่ยนที่สูงขึ้น หากแต่การทดลองที่ผ่านมาเป็นการทดสอบกับโครงสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการนำกลไกฮอร์โมนเทียมมาใช้งานร่วมกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบขา
- ประเด็นที่สาม คือ หากมีกระบวนการหรือหลักการสำหรับออกแบบกลไกฮอร์โมนเทียมและโครงข่ายฮอร์โมนเทียม จะทำให้การปรับค่าการตอบสนองภายในกลไก หรือการเชื่อมต่อระหว่างกลไกเป็นไปได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น

2.3 กลไกฮอร์โมนเทียม

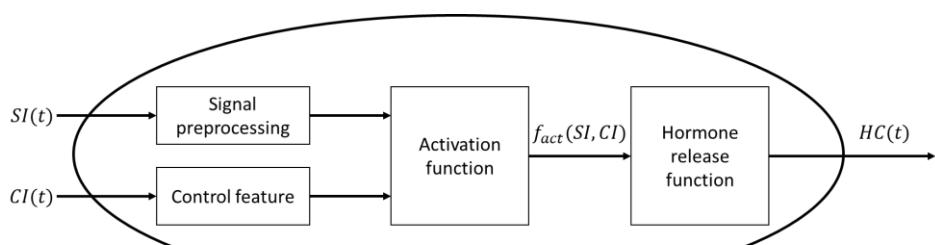
จากหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้ทราบถึงพัฒนาการของกลไกฮอร์โมนเทียมที่ใช้งานในปัจจุบันนี้ โดยมีแนวคิดที่แบ่งกลไกออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของต่อมฮอร์โมน (Hormone gland) ซึ่งทำหน้าที่หลั่งสารฮอร์โมนและบอกถึงระดับความเข้มข้นของฮอร์โมน และส่วนที่ 2 คือตัวรับฮอร์โมน (Hormone receptor) ที่ทำหน้าที่รับสารฮอร์โมนแล้วทำการกระตุ้นเซลล์เป้าหมาย (Target cell) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงแนวคิดกลไกฮอร์โมนที่ยมแบบดึงเดิน

2.3.1 ต่อมฮอร์โมน

ในส่วนของต่อมฮอร์โมนดังแสดงในรูปที่ 2.11 มีการนำเข้าอยู่ 2 ช่องทาง คือช่องรับสัญญาณ (Signal input : SI) และช่องรับการควบคุม (Control input : CI) ในส่วนของการส่งออกมี 1 ช่องทาง คือปริมาณความเข้มข้นของสารฮอร์โมน (Hormone concentration : HC) โดยการทำงานภายในต่อมฮอร์โมนแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ส่วนแรกคือการเตรียมสัญญาณ (Signal preprocessing) มีหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณจากช่องรับสัญญาณสามารถเลือกได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การหาค่าเฉลี่ย หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นต้น ส่วนที่สองรูปแบบการควบคุม (Control feature) เป็นการปรับแต่งการตอบสนองของต่อมฮอร์โมนโดยมี 5 รูปแบบ ได้แก่ การยับยั้ง (Inhibitory), การกระตุ้น (Stimulatory), การป้อนกลับเชิงบวก (Positive feedback), การป้อนกลับเชิงลบ (Negative feedback) และการไม่ตอบสนอง (Disable) เมื่อต่อมฮอร์โมนได้รับสัญญาณจากช่อง CI เข้ามาจะส่งผลต่อปริมาณของ HC ตามรูปแบบที่กำหนด ส่วนที่สามฟังก์ชันการหลัง (Activation function) คือส่วนที่รับค่าของ SI ที่ผ่านการเตรียมสัญญาณเข้ามาใช้ในการคำนวณการหลังและใช้ค่าของ CI ที่ทำตามรูปแบบของส่วนรูปแบบควบคุม ซึ่งภายในส่วนนี้ผู้ใช้สามารถเลือกรูปแบบของสมการในการหลังได้ เช่นรูปแบบตัวเอส (Sigmoid), รูปแบบเชิงเส้น (Linear) เป็นต้น และส่วนสุดท้ายของต่อมฮอร์โมนคือฟังก์ชันปลดปล่อยสารฮอร์โมน (Hormone release function) เป็นการควบคุมปริมาณ HC ที่มีอยู่ในกลไกฮอร์โมนที่ยมทั้งหมด



รูปที่ 2.11 โครงสร้างภายในต่อมฮอร์โมนแบบดึงเดิน

การทำงานของต่อม索ร์โภนสามารถอธิบายในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2.1 ในการปรับการตอบสนองของต่อม索ร์โภนนั้นมีอยู่ 2 ตัวแปรคืออัตราการหลั่งสาร索ร์โภน (α) และ อัตราการเสื่อมสภาพของสาร索ร์โภน (β) ตัวแปรทั้ง 2 นี้เป็นค่าคงที่และมีช่วงการปรับอยู่ที่มากกว่า ศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากันหนึ่ง ($0,1$] ในกรณีที่ค่า α มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้ปริมาณการหลั่งสาร索ร์โภนออกมาน้อย และในกรณีที่ค่า α มีค่าเท่ากับหนึ่งจะเป็นสภาวะที่ปริมาณการหลั่งสาร索ร์โภนออกมามากที่สุด เช่นเดียวกับค่า β หากมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่งผลให้การคงอยู่ของปริมาณสาร索ร์โภนน้อย และในกรณีที่ค่า β เท่ากับหนึ่ง ส่งผลให้การคงอยู่ของปริมาณสาร索ร์โภนมาก หรือ ในอีกความหมายคือไม่มีการเสื่อมสภาพของสาร索ร์โภนนั้นเอง

$$HC(t) = (\alpha \cdot f_{act}(SI, CI)) + (\beta \cdot HC(t - 1)) \quad (2.1)$$

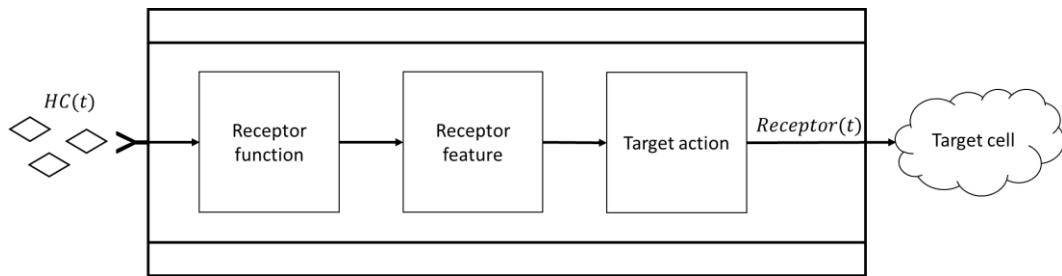
กำหนดให้

$HC(t)$	คือปริมาณความเข้มข้นของสาร索ร์โภน
α	คืออัตราการหลั่งสาร索ร์โภน
$f_{act}(SI, CI)$	คือฟังก์ชันการหลั่งที่ได้รับสัญญาณจาก SI และ CI
β	คืออัตราการเสื่อมสภาพสาร索ร์โภน

2.3.2 ตัวรับ索ร์โภน

ตัวรับ索ร์โภนในสิ่งมีชีวิตมีการทำงานเสมือนกับแม่กุญแจและสาร索ร์โภนเป็นจุดลูกกุญแจ เมื่อแม่กุญแจและลูกกุญแจมีรหัสเดียวกันจึงสามารถปลดล็อกเพื่อทำงาน ซึ่งการทำงานเมื่อปลดล็อกสำหรับกลไก索ร์โภนเที่ยมคือการกระตุ้นเซลล์เป้าหมายให้เกิดการปรับเปลี่ยนการทำงาน ดังนั้นการทำงานของตัวรับ索ร์โภนเที่ยมจึงเริ่มจากการรับค่า HC เข้าสู่การทำงานภายในตัวรับและแสดงผลการปรับการทำงานของเซลล์เป้าหมาย โดยโครงสร้างของตัวรับ索ร์โภนสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.12 ได้แก่ ฟังก์ชันตัวรับ (Receptor function) ที่ตอบสนองต่อความเข้มข้นของสาร索ร์โภนที่สามารถจับตัวได้ มีรูปแบบเชิงเส้น (Linear) และส่วนที่สองคือรูปแบบตัวรับ (Receptor feature) มี 2 รูปแบบคือ รูปแบบผลโดยตรง (Direct effect) และรูปแบบสะสม (Accumulative effect) และส่วนที่สามคือการกระทำต่อเซลล์เป้าหมาย (Target action) เป็นการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ของตัวรับ索ร์โภนกับเซลล์เป้าหมาย เช่น การปรับค่าตัวแปรของเซลล์เป้าหมาย

รายละเอียดของการเลือกรูปแบบในการออกแบบตัวรับ索ร์โภนและต่อม索ร์โภน รวมถึงการปรับแต่งค่าภายในกลไก索ร์โภน มีรายละเอียดอยู่ในหัวข้อ 2.5 แนวคิดการออกแบบและตั้งค่ากลไก索ร์โภนเที่ยม

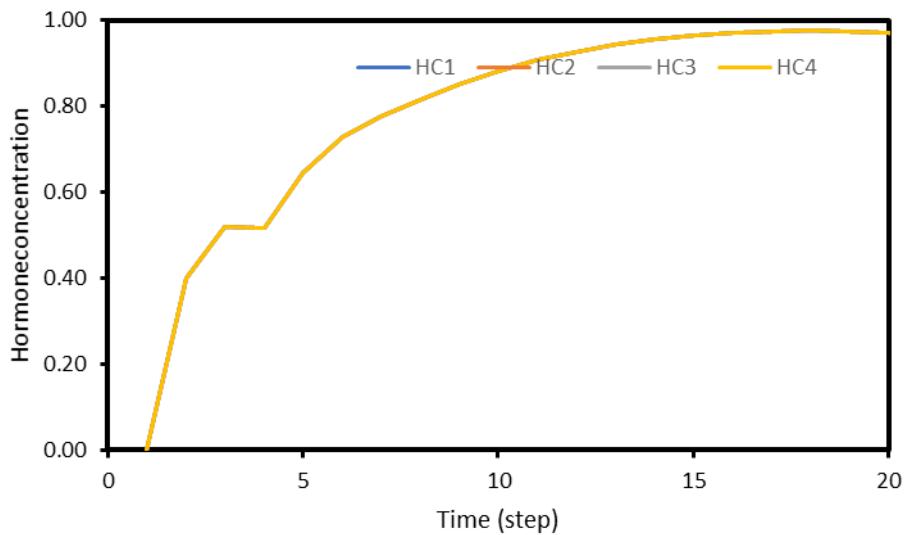


รูปที่ 2.12 โครงสร้างภายในตัวรับสื่อโร์โมนแบบดั้งเดิม

2.4 การปรับปรุงกลไกสื่อโร์โมนเทียม

ขั้นตอนสำหรับการปรับปรุงกลไกสื่อโร์โมนเทียม เริ่มจากการวิเคราะห์ปัญหาในเชิงพฤติกรรมการตอบสนองของกลไกสื่อโร์โมนแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับสื่อโร์โมนในสิ่งมีชีวิต เพื่อนำเสนอแนวคิดใหม่สำหรับการปรับปรุงกลไกสื่อโร์โมนเทียม และทำการตรวจสอบกลไกสื่อโร์โมนเทียมแบบปรับปรุง ด้วยวิธีการเปรียบเทียบการทำงานในเชิงแนวคิดการทำงานและการทำงานคณิตศาสตร์

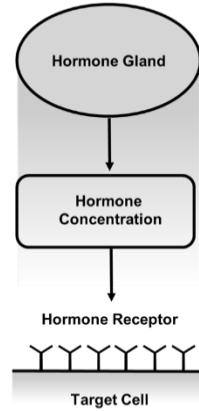
จากหัวข้อที่ 2.1.2 กระบวนการกำจัดสารสื่อโร์โมนในสิ่งมีชีวิตมีอยู่ 4 ปัจจัย ได้แก่ การเมตตา藻อลิซึมโดยเนื้อเยื่อ, การจับตัวของสารสื่อโร์โมนกับตัวรับสื่อโร์โมนที่บริเวณเนื้อเยื่อ, การขับถ่ายออกทางน้ำดีด้วยตับ และการขับถ่ายออกทางปัสสาวะด้วยไต เมื่อนำปัจจัยเหล่านี้เปรียบเทียบกับสมการ 2.1 ของกลไกสื่อโร์โมนเทียมจะพบว่าค่า β เป็นตัวแปรที่รวมทั้ง 4 ปัจจัยไว้เพียงตัวเดียวเท่านั้น เนื่องจากเป็นสิ่งที่สะทวายต่อผู้ออกแบบที่ปรับตัวแปรของกลไกเพียงตัวเดียว หากเกิดการเปลี่ยนแปลงจำนวนของตัวรับสื่อโร์โมนก็ไม่มีผลกับความเข้มข้นของสารสื่อโร์โมน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เป็นการเปรียบเทียบในกรณีที่มีการเพิ่มจำนวนตัวรับสื่อโร์โมนขึ้น โดยที่ $HC1, HC2, HC3$ และ $HC4$ เป็นค่าความเข้มข้นของสารสื่อโร์โมน โดยกำหนดให้ $HC1, HC2, HC3$ และ $HC4$ มีค่า α เท่ากับหนึ่งและค่า β เท่ากับ 0.3 ทั้งหมด และมีจำนวนตัวรับสื่อโร์โมน 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ สังเกตว่าค่าความเข้มข้นของสารสื่อโร์โมนทั้ง 4 กลไกมีค่าเท่ากันทั้งหมด นั้นแสดงถึงความไม่สมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสื่อโร์โมนต่อจำนวนตัวรับสื่อโร์โมนที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้กราฟทั้ง 4 ทับกันเป็นเส้นเดียว ดังนั้นควรแยกปัจจัยการจับตัวของสารสื่อโร์โมนกับตัวรับสื่อโร์โมนที่บริเวณเนื้อเยื่อ ออกจากค่า β เพื่อทำให้ความเข้มข้นของสารสื่อโร์โมนตอบสนองต่อจำนวนตัวรับสื่อโร์โมน



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความเข้มข้นของสารออร์โโนนจากกลไกออร์โโนนเที่ยมแบบดั้งเดิม

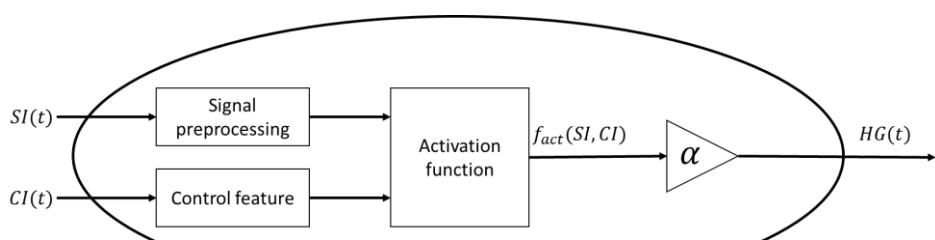
ประเด็นต่อมาระบบต่อมไร้ท่อในสิ่งมีชีวิตมีส่วนประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ ต่อมไร้ท่อ, การส่งถ่ายสารทางหลอดเลือด และตัวรับออร์โโนน (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) ซึ่งต่างจากกลไกออร์โโนนเที่ยมที่มีเพียง 2 ส่วนคือ ต่อมไร้ท่อและตัวรับออร์โโนน (ดังแสดงในรูปที่ 2.10) โดยโมเดลของกลไกออร์โโนนเที่ยม ก่อนหน้าซึ่งมีส่วนของการส่งถ่ายสารออร์โโนน ซึ่งรูปแบบของการส่งถ่ายสารออร์โโนนสนใจที่การแพร่กระจายของสารออร์โโนนจากที่ความเข้มข้นมากไปสู่ความเข้มข้นน้อย โดยมีความสัมพันธ์ของระยะทางจากต่อมไร้ท่อ(ความเข้มข้นสูง)ไปสู่ตัวรับออร์โโนน(ความเข้มข้นต่ำ) แต่ได้มีการยกเลิกส่วนของการแพร่ไป ในธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตการแพร่กระจายสารออร์โโนนเป็นเพียงส่วนหนึ่งของการส่งถ่ายสารทางหลอดเลือดเท่านั้น การให้ผลลัพธ์ของสารออร์โโนนภายในร่างกายนั้นเสมือนถังกักเก็บปริมาณของออร์โโนนในเวลาต่าง ๆ ดังนั้นกลไกออร์โโนนเที่ยมควรมีเพิ่มการให้ผลลัพธ์ของสารออร์โโนนที่อยู่ในการส่งถ่ายสารทางหลอดเลือด เช่นเดียวกับสิ่งมีชีวิต

จากการวิเคราะห์ข้างต้นพบว่าปัญหาของกลไกออร์โโนนเที่ยมแบบเดิมมี 2 ประเด็น ได้แก่ ความเข้มข้นของสารออร์โโนนไม่ตอบสนองต่อจำนวนตัวรับออร์โโนน และส่วนประกอบของกลไกออร์โโนนเที่ยมขาดส่วนการส่งถ่ายสารทางหลอดเลือด ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอแนวทางในการแก้ปัญหาทั้ง 2 ประเด็น โดยการแบ่งกลไกออร์โโนนเที่ยมออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ต่อมออร์โโนน, หลอดเลือด และตัวรับออร์โโนน (ดังรูปที่ 2.14)



รูปที่ 2.14 แสดงแนวคิดกลไกของร์โนนเที่ยมแบบปรับปรุง

ต่อมฮอร์โมนแบบปรับปรุงถูกปรับลดลง ไกเหลือเพียง 3 ส่วนคือ Signal preprocessing, Control feature และ Activation function ซึ่งต่างจากต่อมฮอร์โมนแบบดั้งเดิมคือการตัดส่วน Hormone release function ออกดังรูปที่ 2.15 ส่งผลให้สมการของต่อมฮอร์โมนแบบใหม่มีการปรับเปลี่ยนไป ดังแสดงในสมการที่ 2.2



รูปที่ 2.15 โครงสร้างภายในต่อมฮอร์โมนแบบปรับปรุง

$$HG(t) = \alpha \cdot f_{act}(SI, CI) \quad (2.2)$$

กำหนดค่าตัวแปรดังนี้

$HG(t)$ กือ ต่อมฮอร์โมนที่หลังสารฮอร์โมนที่เวลา t

α กือ อัตราการหลังสารฮอร์โมน

$f_{act}(SI, CI)$ กือ พิกซันการหลังที่ได้รับสัญญาณจาก SI และ CI

เมื่อต่อมฮอร์โมนหลังสารฮอร์โมนออกมานั้นจะถูกส่งสู่หลอดเลือดซึ่งเป็นส่วนที่สองโดยหลอดเลือดมีลักษณะการทำงาน คือ การส่งถ่ายสารฮอร์โมนด้วยการอธิบายถึงปริมาณความเข้มข้นของสารฮอร์โมนในแต่ละเวลา ซึ่งนำมาจากการของต่อมฮอร์โมนแบบดั้งเดิม และเสริมการกำจัดสาร

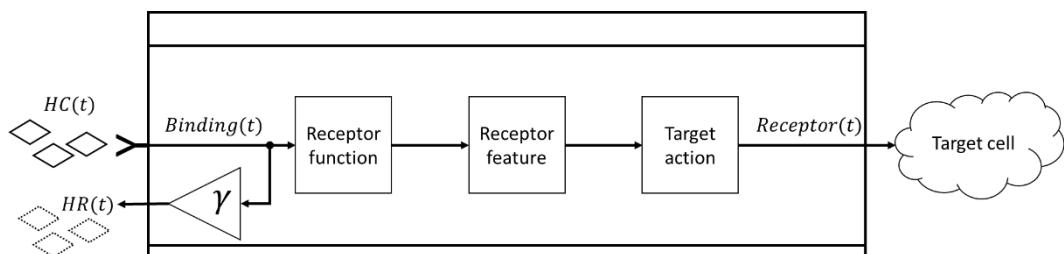
ชอร์โนนด้วยการเลื่อนสลายจากการจับตัวของสารชอร์โนน เพื่อทำให้ความเข้มข้นของสารชอร์โนน ตอบสนองกับจำนวนของตัวรับชอร์โนนดังสมการ 2.3

$$HC(t) = \sum_{i=0}^n HG_i(t) + (\beta \cdot HC(t-1)) - \sum_{j=0}^m HR_j(t) \quad (2.3)$$

กำหนดค่าตัวแปรดังนี้

- $HG_i(t)$ ก cioè ค่าหลังสารชอร์โนนตัวที่ i ณ เวลา t จากต่อมชอร์โนน
- n ก cioè จำนวนทั้งหมดของต่อมชอร์โนนที่ต่อเข้ากับหลอดเลือด
- β ก cioè อัตราการเลื่อนสลายสารชอร์โนน
- $HC(t)$ ก cioè ค่าความเข้มข้นของสารชอร์โนน ณ เวลา t
- $HR_j(t)$ ก cioè ค่าการจับตัวระหว่างสารชอร์โนนกับตัวรับชอร์โนนที่ j ณ เวลา t
- m ก cioè จำนวนทั้งหมดของตัวรับชอร์โนนที่ต่อเข้ากับหลอดเลือด

ส่วนตัวรับชอร์โนนมีการเพิ่มการจับตัวกับสารชอร์โนน (ดังแสดงในรูปที่ 2.16) โดยการจับตัวกับสารชอร์โนนมีลักษณะการทำงานอยู่ 2 อย่าง ก cioè การจับตัวกับสารชอร์โนนเกิดการทำลายสารชอร์โนน และการรับสารชอร์โนนเข้าสู่ภายในตัวรับชอร์โนน เพื่อทำการกระตุ้นฟังก์ชันตัวรับดังสมการที่ 2.4 ค่าความสามารถในการจับตัวระหว่างตัวรับและสารชอร์โนนนี้จะเป็นตัวเรื่องต่อไปสู่ $HR_j(t)$ ในสมการ 2.3 เป็นการเลื่อนสลายแบบการจับตัวของสารชอร์โนนกับตัวรับชอร์โนนที่บริเวณเนื้อเยื่อ



รูปที่ 2.16 โครงสร้างภายในต่อมชอร์โนนแบบปรับปรุง

$$HR(t) = \gamma \cdot Binding(t) \quad (2.4)$$

กำหนดให้

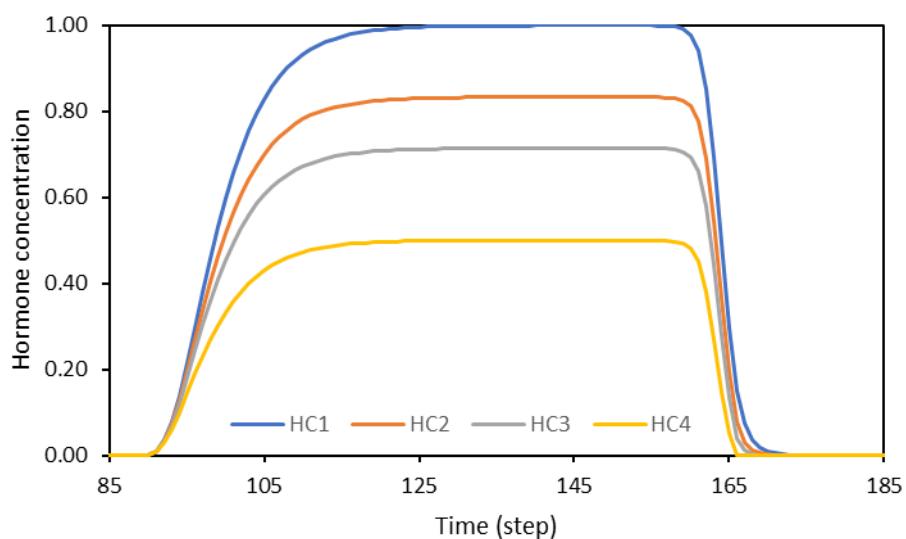
$HR(t)$ กือ ค่าการจับตัวระหว่างสารออร์โนนกับตัวรับออร์โนน ณ เวลา t

γ กือ อัตราความเสื่อมสภาพที่เกิดจากการจับตัวระหว่างตัวรับและสารออร์โนน

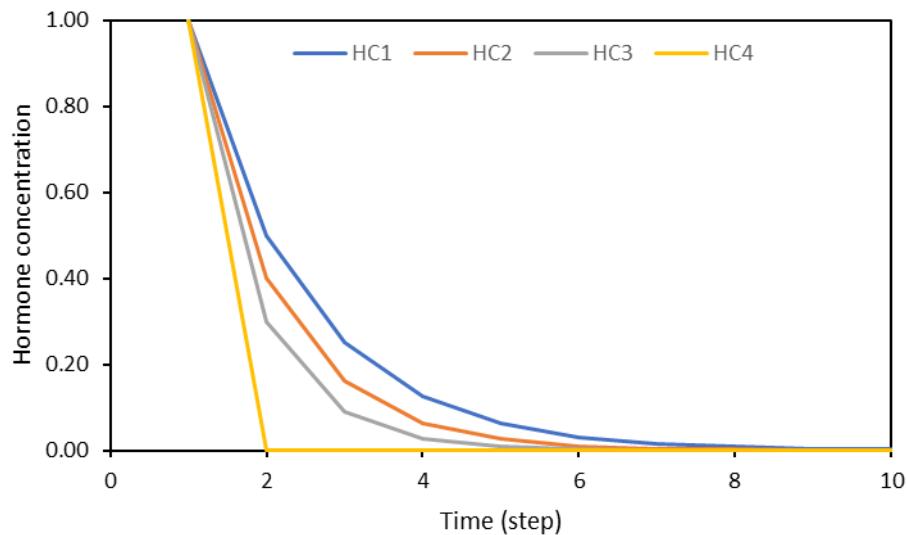
$Binding(t)$ กือ ค่าความสามารถในการจับตัวระหว่างตัวรับและสารออร์โนน

ขั้นตอนต่อไปเป็นการตรวจสอบและเปรียบเทียบโมเดลกลไกออร์โนนที่ยิ่งแบบปรับปรุงกับแบบดั้งเดิม โดยแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การเปรียบเทียบเชิงโมเดลคณิตศาสตร์ และการเปรียบเทียบแนวคิดการประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบ ในส่วนของการเปรียบเทียบการนำกลไกออร์โนนประยุกต์กับหุ่นยนต์จะกล่าวถึงในบทถัดไป

การเปรียบเทียบเชิงโมเดลคณิตศาสตร์ จะทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของสารออร์โนน 4 รูปแบบ ได้แก่ HC1 เป็นแบบดั้งเดิม ส่วน HC2, HC3 และ HC4 เป็นการเพิ่มจำนวนตัวรับออร์โนนเข้าไปในกลไกให้มีจำนวนตัวรับที่ 1, 2 และ 5 ตามลำดับ ในการทดสอบกำหนดให้ค่า α , β และ γ มีค่าเท่ากับ 0.5, 0.5 และ 0.1 ตามลำดับ จากรูปที่ 2.17 แสดงให้ทราบถึงความเข้มข้นของสารออร์โนน มีการตอบสนองต่อจำนวนตัวรับออร์โนน เมื่อพิจารณาการเสื่อมสภาพของสารออร์โนนพบว่าความเร็วในการลดลงของความเข้มข้นแบบผันตรงกับจำนวนตัวรับออร์โนน (ดังแสดงในรูปที่ 2.18)

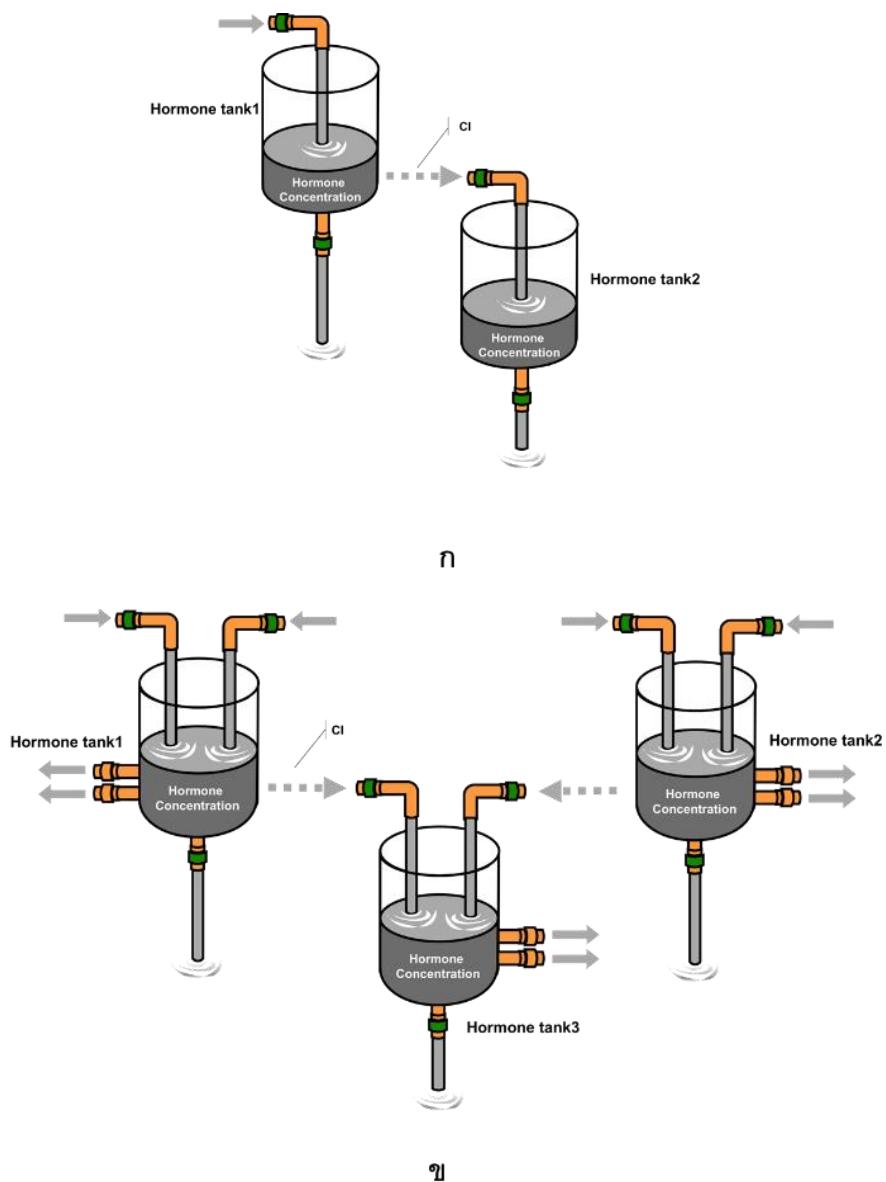


รูปที่ 2.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการเสื่อมสภาพของสารออร์โนน



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการเสื่อมสภาพของสารฮอร์โมนในช่วงขอบข่าย

การเปรียบเทียบแนวคิดการประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบ จากรูปที่ 2.19 แสดงให้เห็นถึงผลของการแยกส่วนของต่อมฮอร์โมนออกจากหลอดเลือด จึงสามารถเพิ่มจำนวนต่อมฮอร์โมนได้อีกอย่างอิสระ ซึ่งต่างจากแบบดั้งเดิมหากต้องการเพิ่มจำนวนของต่อมฮอร์โมนทำได้เพียงวิธีการเดียวคือการทำเป็นโครงข่ายฮอร์โมน และพัฒนาอ้อมของกลไกแบบปรับปรุงรูปแบบการทำงานเป็นแบบหลายตัวรับหลายตัวส่ง (Multi-input and multi-output :MIMO) ส่งผลต่อการตอบสนองความเข้มข้นของสารฮอร์โมนให้มีรูปแบบที่หลากหลายขึ้น



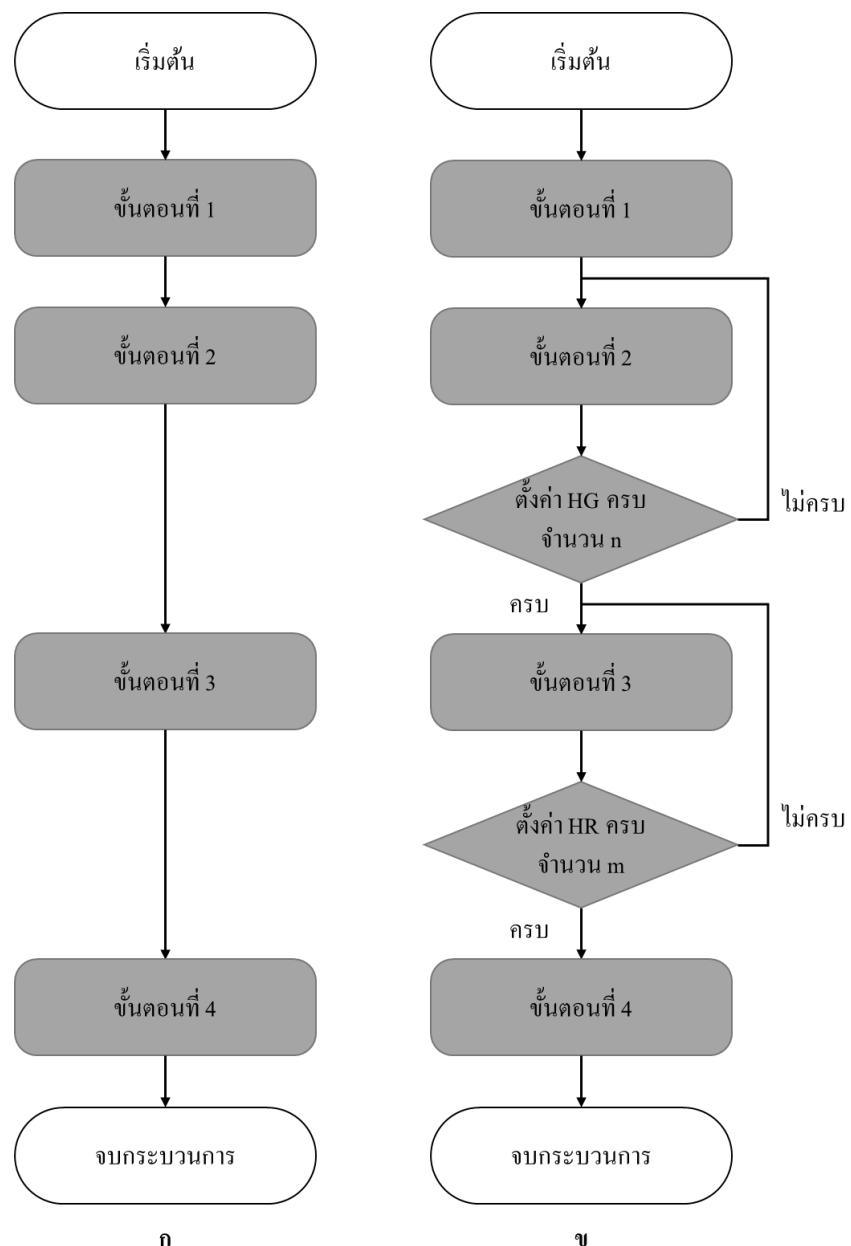
รูปที่ 2.19 แสดงแนวคิดการทำงานของกลไกฮอร์โมนเทียมแบบดั้งเดิม (รูป ก.) และกลไกฮอร์โมนเทียมแบบใหม่ (รูป ข.)

2.5 แนวคิดการออกแบบและตั้งค่ากลไกฮอร์โมนเทียม

จากการวิจัยเกี่ยวกับกลไกฮอร์โมนเทียม (หัวข้อ 2.2) ปัจจุบันที่พบเกิดจากการขาดขั้นตอนการออกแบบสำหรับกลไกฮอร์โมนเทียม เนื่องจากการผู้ออกแบบล้วนใหญ่ใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error) ส่งผลให้ต้องใช้การทดสอบจำนวนมากเนื่องจากค่าตัวแปร α และ β เป็นจำนวนจริงจึงทำให้ความเป็นไปได้มีจำนวนมาก และการออกแบบโครงสร้างของฮอร์โมนเทียมมีความซับซ้อนจากการตั้งค่าและการเขื่อมต่อระหว่างกลไก ดังนั้นผู้จัดทำได้สังเคราะห์แนวคิดการออกแบบกลไกฮอร์โมนเทียม

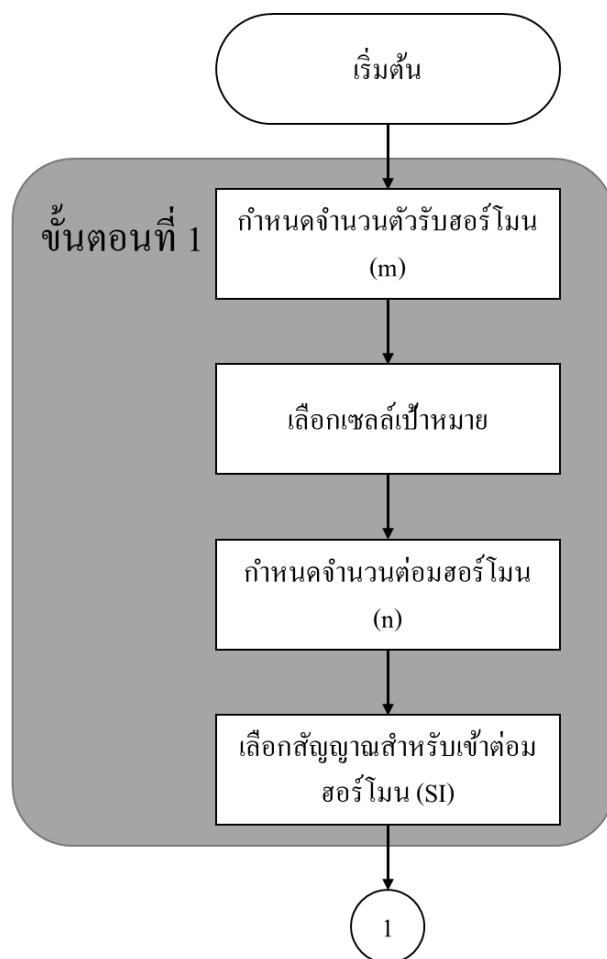
และโครงข่ายชอร์โนนเที่ยม เพื่อจัดลำดับขั้นการออกแบบและลดจำนวนความไม่จำเป็นของค่าตัวแปรภายในกลไก

โดยแนวคิดการออกแบบและการตั้งค่ากำหนดให้ทำเรียงเป็นลำดับขั้น โดยเริ่มจากส่วนของกลไกชอร์โนนไปถึงโครงข่ายชอร์โนนเที่ยม และแนวคิดนี้สามารถใช้กับกลไกชอร์โนนเที่ยมแบบดั้งเดิม และแบบปรับปรุง (ดังที่แสดงรูปที่ 2.20) โดยมีขั้นตอนในการออกแบบกลไกชอร์โนนเที่ยม 4 ขั้นตอน ดังนี้



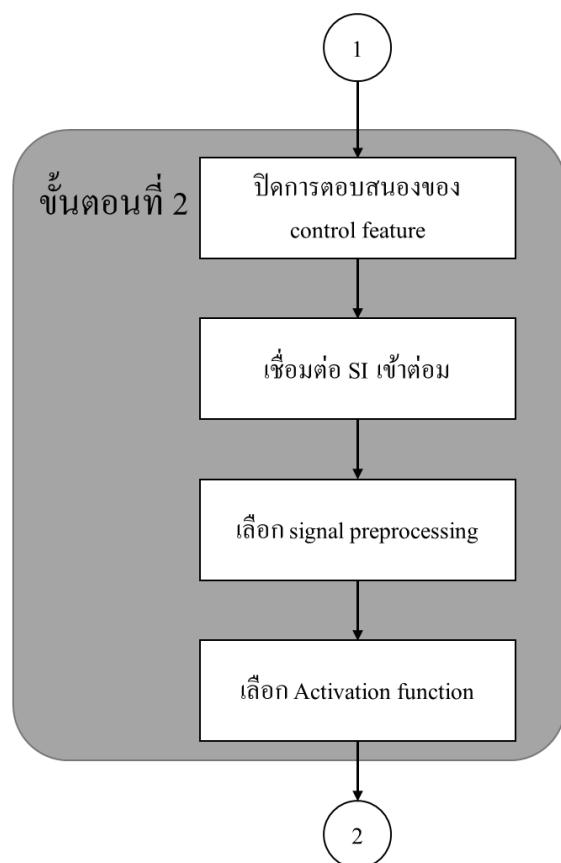
รูปที่ 2.20 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบกลไกชอร์โนน (รูป ก.) แบบดั้งเดิม และ (รูป ข.) แบบปรับปรุง

ขั้นตอนที่ 1 (ดังที่แสดงรูปที่ 2.21) เริ่มด้วยการพิจารณาระบบจากภาพรวม เพื่อกำหนดและคัดกรอง ความสัมพันธ์ของระบบ โดยกำหนดจำนวนตัวรับและเลือกเซลล์เป้าหมายสำหรับเชื่อมกับตัวรับ ชอร์โนน ซึ่งกลวิธีในการเลือกเซลล์เป้าหมาย คือ ตรวจหาตัวแปรภายในระบบควบคุมที่มี ความสัมพันธ์กับปัญหาทั้งแบบโดยตรงและทางอ้อม และพิจารณาวิธีการตั้งค่าของตัวแปรนั้น ถ้ามี การเปลี่ยนของระบบแล้วต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรตามเพื่อความเหมาะสมแสดงว่าตัวแปรนี้มี ความน่าสนใจสำหรับการเป็นเซลล์เป้าหมาย เมื่อเลือกเซลล์เป้าหมายเรียบร้อย ให้ทำการกำหนด จำนวนต่อมชอร์โนน ในกรณีสำหรับกลไกแบบปรับปรุง หากเป็นกลไกแบบดั้งเดิมไม่จำเป็นต้อง กำหนดจำนวน สุดท้ายทำการเลือกสัญญาณสำหรับเข้าต่อมชอร์โนนด้วยกลวิธีแบ่งกลุ่มข้อมูล ออกเป็นข้อมูลภายในและข้อมูลภายนอก โดยข้อมูลภายนอกหมายถึงข้อมูลที่รับจากเซนเซอร์ และ ข้อมูลภายในหมายถึงค่าตัวแปรหรือค่าสถานะต่าง ๆ ของระบบ ทำการพิจารณาความสัมพันธ์เซลล์ เป้าหมายที่ถูกเลือก โดยส่วนใหญ่ถ้าข้อมูลภายในมีความสัมพันธ์โดยตรง หากเป็นข้อมูลจาก ภายนอกมีความสัมพันธ์ทางอ้อม



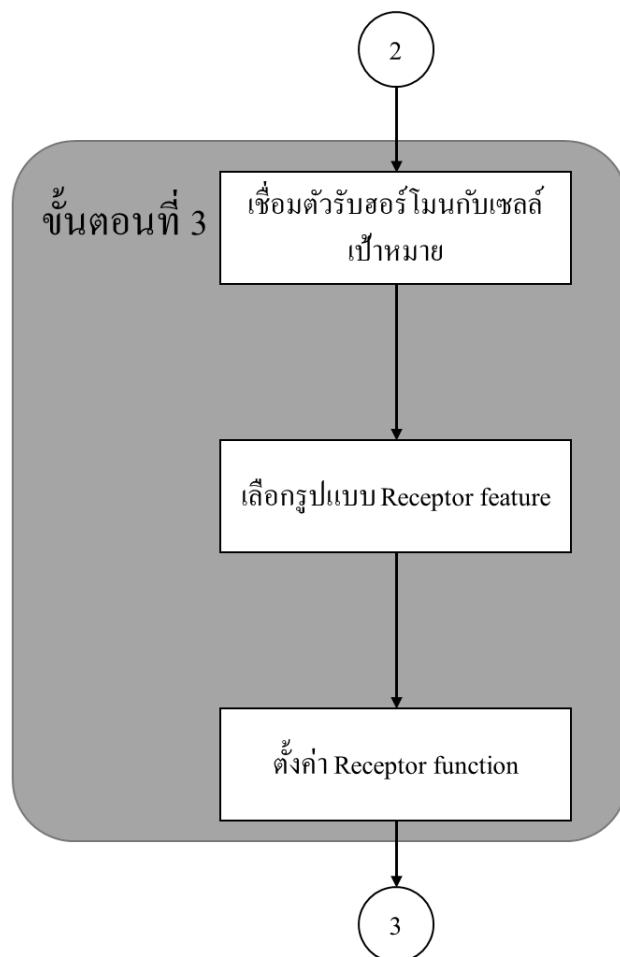
รูปที่ 2.21 แผนผังแสดงกระบวนการภายในขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 2 เป็นกระบวนการสำหรับการเลือกรูปแบบภายในต่อมหอร์โมน (ดังแสดงในรูปที่ 2.22) เริ่มต้นจากการปิดการตอบสนองค่า CI ที่ Control feature เพื่อทำให้กลไกหอร์โมนนี้ไม่ตอบสนองกลไกหอร์โมนอื่น ทำการเชื่อมต่อ SI ที่เลือกจากขั้นตอนที่ 1 เข้าต่อมหอร์โมน และทำการเลือกรูปแบบ Signal preprocessing โดยรูปแบบพื้นฐานที่นิยมใช้มี 2 รูปแบบได้แก่ รูปแบบค่าเฉลี่ย และรูปแบบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทั้งนี้หากผู้ออกแบบต้องการรูปแบบอื่น ๆ สามารถกำหนดเพิ่มเติมได้เอง เช่นกัน ซึ่งกลวิธีในการเลือกรูปแบบ Signal preprocessing หากต้องการให้ตอบสนองช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (Edge detect) ควรเลือกใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แต่หากต้องการให้ตอบสนองตามค่าที่รับเข้ามาควรใช้ค่าเฉลี่ย ในรูปแบบทั้ง 2 ต้องกำหนดขนาดของจำนวนข้อมูลที่เข้าในหนึ่งช่วงเวลา (Buffer size) โดยขนาดนี้กับช่วงเวลาของการทำงานในการประมวลผลของระบบและการหน่วงเวลา และส่วนสุดท้ายการเลือก Activation function รูปแบบที่ได้รับความนิยมคือรูปตัวแอล ข้อดีของแบบนี้คือจำกัดขอบเขตอยู่ในช่วงศูนย์ถึงหนึ่ง หากใช้รูปแบบอื่นผู้ออกแบบควรระมัดระวังเรื่องของช่วงการตอบสนอง



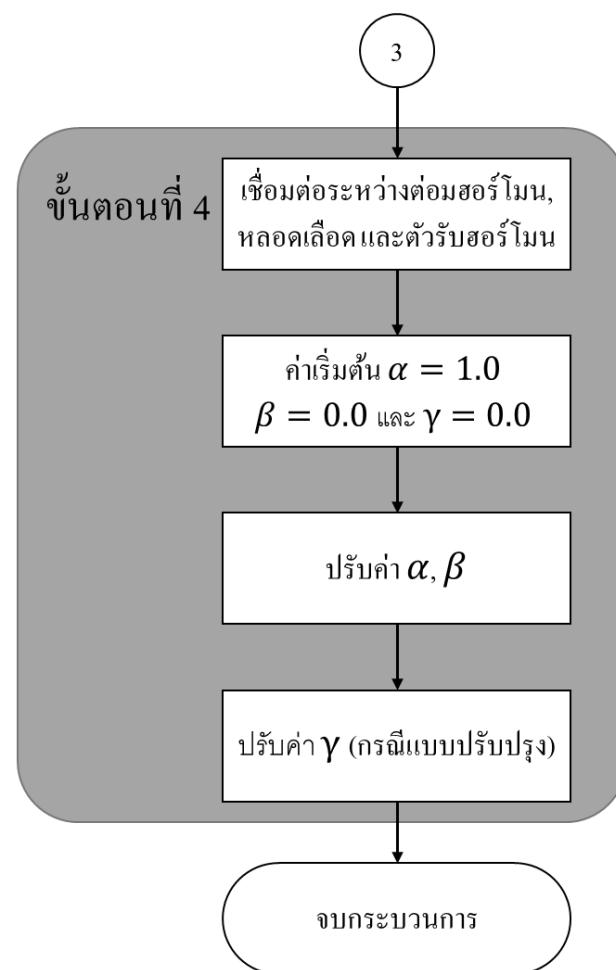
รูปที่ 2.22 แผนผังแสดงกระบวนการภายในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนที่ต้องพิจารณารูปแบบการตอบสนองของความสัมพันธ์ระหว่างตัวรับชอร์โมนกับเซลล์เป้าหมาย (ดังแสดงในรูปที่ 2.23) เพื่อกำหนด Target action โดยมีรูปแบบพื้นฐาน 2 รูปแบบ ได้แก่ การแทนค่าหรือกำหนดค่า และการขยายหรือลดthon กลวิธีในการเลือกคือผู้ออกแบบควรพิจารณาว่าต้องการให้ระบบที่ควบคุมมีการตอบสนองทันทีทันใดหรือมีการหน่วง หากต้องให้เป็นการตอบสนองแบบทันทีทันใดควรใช้การแทนค่าหรือกำหนดค่า เมื่อกำหนด Target action แล้ว ส่วนถัดมาคือการเลือกรูปแบบ Receptor feature โดยวิธีการเลือกคือถ้าผู้ออกแบบมีความต้องการให้มีผลจากการคำนวนเมื่อครั้งอดีตควรเลือกแบบสะสม หากไม่ต้องการควรเลือกแบบโดยตรง ส่วนสุดท้ายของขั้นตอนที่ 3 คือการกำหนด Receptor function ให้พิจารณาจากขอบเขตการรับรู้ของเซลล์เป้าหมาย และรูปแบบของ Target action ควรคู่กัน กลวิธีในการกำหนดคือ ถ้า Target action เป็นรูปแบบการแทนค่าหรือกำหนดค่า Receptor function ควรควบคุมให้ทำการกระตุ้นอยู่ในช่วงของขอบเขตการรับรู้ของเซลล์เป้าหมาย หากเป็นรูปแบบการขยาย ควรทำให้ค่าอยู่ในช่วงมากกว่าหนึ่งหรือการลดthon ควรอยู่ต่ำกว่าหนึ่ง

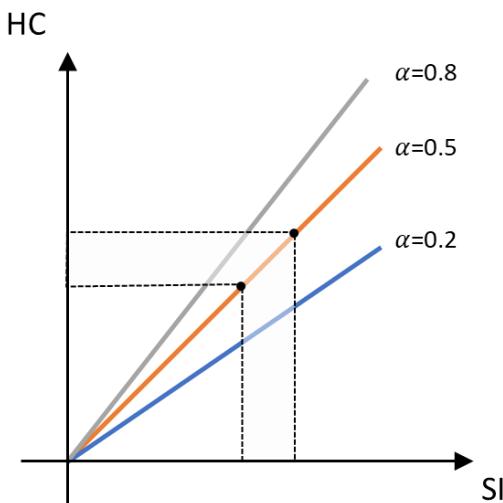


รูปที่ 2.23 แผนผังแสดงกระบวนการภายในขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนที่ให้ความสำคัญกับการตรวจสอบและปรับแต่งการทำงานของทั้งกลไกก่อนนำไปใช้งาน (ดังแสดงในรูปที่ 2.24) เริ่มด้วยการเชื่อมต่อในกรณีของแบบดั้งเดิมคือการเชื่อมระหว่างต่อมชอร์โມนเข้ากับตัวรับ หรือในกรณีของแบบปรับปรุงคือการเชื่อมต่อมและตัวรับเข้ากับหลอดเลือด และทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของ α , β เป็น 1 และ 0 ตามลำดับและในกรณีของกลไกแบบปรับปรุงค่า γ เท่ากับ 0 หากตั้งค่ามาถึงจุดนี้แล้วกลไกชอร์โມนสามารถทำงานกับระบบที่ออกแบบร่วมได้ แต่การตอบสนองจะยังไม่เหมาะสม ดังนั้นส่วนลัดไปจึงเป็นการปรับแต่งค่าการตอบสนองเริ่มจากการปรับค่า α โดยกลวิธีในการปรับ คือ เปรียบเทียบการตอบสนองของ SI ต่อ HC ณ ช่วงที่ผู้ออกแบบสนใจ ถ้าค่า HC มีค่าต่ำกว่าช่วงสนใจให้ทำการเพิ่มค่า α หากค่า HC มีค่าสูงกว่าช่วงสนใจให้ทำการปรับลดค่า α ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.25 บริเวณจุดสีดำเป็นกรอบของช่วงการตอบสนองที่สนใจ เส้นสีส้มเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างนี้เนื่องจากตัดผ่านจุดสนใจทั้ง 2 จุด ส่วนเส้นสีน้ำเงินนั้นมีค่าต่ำกว่าและเส้นสีเทาอยู่สูงกว่าจุดที่สนใจ



รูปที่ 2.24 แผนผังแสดงกระบวนการภายในขั้นตอนที่ 4

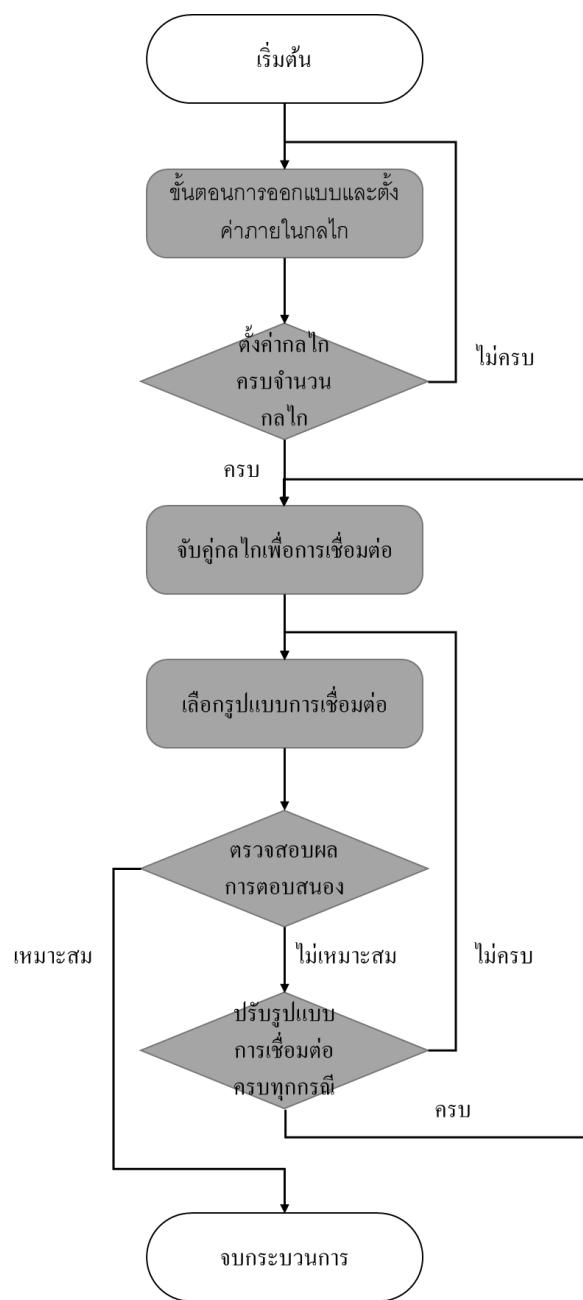


รูปที่ 2.25 กราฟแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง SI กับ HC ที่ค่า α เท่ากับ 0.8(สีเทา), 0.5(สีส้ม) และ 0.2(สีน้ำเงิน)

เมื่อปรับค่า α ให้เหมาะสมกับช่วงที่สนใจแล้ว ถ้ามาจึงทำการปรับค่า β เพื่อสร้างจุดสมดุลของกลไกโดยการพิจารณาที่จุดกึ่งกลางของช่วงการถูเข้าของค่า HC (ส่วนใหญ่มีการแก่งบี้นลง) หลังจากเกิดการถูเข้า โดยให้ค่ากึ่งกลางนั้นอยู่เหนือจุดสมดุลที่ผู้ออกแบบต้องการเล็กน้อย (ประมาณ 0.01-0.03) หลักการในการกำหนดจุดสมดุลนั้นควรอยู่ที่ 0.5 เนื่องจากเป็นจุดอยู่กึ่งกลางในช่วงศูนย์ถึงหนึ่งทำให้การแสดงผลของกรณีที่มากกว่าและน้อยกว่าจุดสมดุลเท่ากัน หากผู้ออกแบบปรับให้จุดสมดุลของค่า HC อยู่สูงกว่า 0.5 ทำให้ช่วงการตอบสนองที่ต่ำกว่าจุดสมดุลมีมากกว่าช่วงที่สูงกว่าจุดสมดุลในกรณีไม่ถูเข้าของค่า HC ที่มีลักษณะค่า HC เท่ากับศูนย์หรือหนึ่งเสมอ หากเป็นกรณีที่ HC เท่ากับหนึ่งเนื่องจากการกำหนดค่า β สูงเกินควรลดค่าลง ในกรณี HC เท่ากับศูนย์นั้นเกิดจากความผิดพลาดของผู้ออกแบบได้ 2 กรณี คือการปรับค่า α น้อยมาก และการตั้งค่ารูปแบบของต่อมอร์โไมนผิดพลาด เมื่อปรับค่า β เพื่อทำให้ HC อยู่ในจุดสมดุลที่ต้องการแล้ว ถือเป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนการออกแบบกลไกหรือโไมนเทียมแบบดั้งเดิม แต่สำหรับกลไกแบบปรับปรุงต้องทำการปรับค่า γ เพื่อเพิ่มการเสื่อมสายของอร์โไมนและเป็นการขยายการตอบสนองภายในตัวรับอร์โไมน โดยค่า γ ไม่ควรเกินค่า β และค่าที่เหมาะสมกับการใช้งานส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 10% ของค่า β

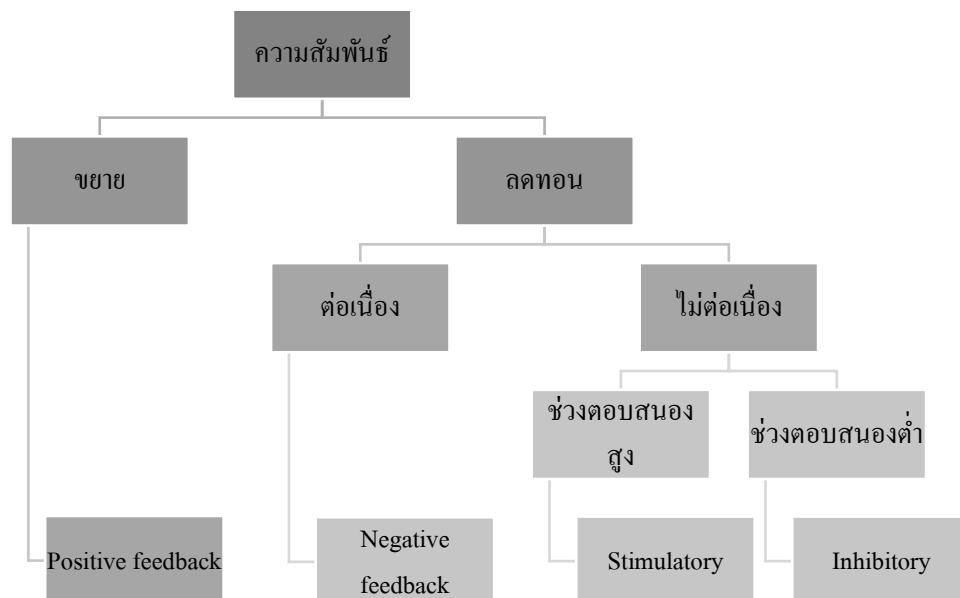
ในขั้นตอนต่อไปเป็นการออกแบบและปรับแต่งค่าของโครงข่ายอร์โไมนเทียม โดยการออกแบบสำหรับโครงข่ายอร์โไมนเทียมจะใช้ขั้นตอนของการออกแบบกลไกอร์โไมนเทียมเป็นพื้นฐานหลักในการออกแบบ ดังรูปที่ 2.26 และคงขั้นตอนสำหรับการออกแบบเป็นโครงข่ายด้วยการเริ่มจากการออกแบบและตั้งค่าของกลไกอร์โไมนเทียมทีละ 1 กลไก โดยทำการปิดการทำงานของกลไกอร์โไมนเทียมกลไกอื่น ๆ ให้เหลือเพียง 1 กลไกที่ต้องการปรับเท่านั้น ซึ่งกลไกที่ถูกปิดนั้นค่าตัวแปร α, β

และ γ ของกลไกที่ลูกปิดนั้นจะมีค่าเท่าเดิมแต่ระบบจะไม่มีการตอบสนอง ในส่วนของการปรับแต่งค่าภายในกลไกหรือโโนนเทียมที่ต้องการจะใช้หลักการในการปรับกลไกหรือโโนนเทียมเป็นไปตามหลักการที่กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 4 ของการออกแบบกลไก ออร์โนนเทียมดังรูปที่ 2.24 เมื่อตั้งค่ากลไกหรือเทียมครบทุกกลไกจึงเริ่มทำการเชื่อมต่อระหว่างกลไก กลวิธีสำหรับการเลือกการเชื่อมจุดเชื่อมต่อต้องพิจารณาความสัมพันธ์ของกลไกหรือโโนนคู่นั้นว่ามีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือไม่ ถ้ามีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นจึงเหมาะสมที่จะเชื่อมต่อ หากมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นสามารถเลือกที่จะเชื่อมต่อหรือไม่เชื่อมต่อ และเมื่อทำการเชื่อมต่อกลไกหรือโโนนเข้าด้วยกันแล้วให้ทำการปรับรูปแบบ Control feature ใหม่ด้วย



รูปที่ 2.26 แผนผังแสดงขั้นตอนการออกแบบโครงข่ายออร์โนนเทียม

ขั้นตอนในการออกแบบ โครงข่ายออร์โนนนั้น มีส่วนสำคัญในการพิจารณาในการเชื่อมต่อ กันระหว่าง สารออร์โนน กับ ต่อม ออร์โนน อื่น เพื่อทำให้เกิด การกระตุ้น และ ยับยั้ง การทำงาน โดยใช้ Control feature ที่มีอยู่ใน ต่อม ออร์โนน เป็นตัวเลือกรูปแบบ วิธีการเลือกรูปแบบนั้น จะต้อง พิจารณา เป็น เส้น ไปดัง แผนภาพที่ 2.27 ว่า ความสัมพันธ์ ของ ระหว่าง กลไก เป็น รูปแบบ ขยาย หรือ ลดทอน หาก เป็น แบบ ขยาย สามารถ ใช้ รูปแบบ Position feedback แต่ หาก เป็น การลดทอน ต้อง พิจารณา ความต่อเนื่อง ของการ ทำงาน ถ้า เป็น แบบ ต่อเนื่อง สามารถ ใช้ รูปแบบ Negative feedback ส่วน รูปแบบ ไม่ต่อเนื่องนั้น ต้อง พิจารณา ช่วง การทำงาน ของ กลไก หาก เป็น ช่วง สูง ควร ใช้ รูปแบบ Stimulatory ส่วน ช่วง การทำงาน ต่ำ ควร ใช้ รูปแบบ Inhibitory



รูปที่ 2.27 แผนภูมิแสดงเงื่อนในการออกแบบ โครงข่ายออร์โนนเทียม

แนวทาง การออกแบบ และ ตั้งค่า กลไก ออร์โนน เทียม และ โครงข่าย ออร์โนน เทียม นี้ เกิดจาก วิธี การลอง ผิด ลอง ถูก (Trial and error) ใน การทดลอง รูปแบบ ต่าง ๆ จำนวน มาก ทำ ให้ ผู้วิจัย สามารถ สังเคราะห์ ขั้นตอน การออกแบบ ดัง ที่ ก่อ ล้ำ มา ข้าง ต้น ดัง นั้น แนวทาง การออกแบบ และ ตั้งค่า นี้ อาจ ไม่ สามารถ ใช้ ได้ ใน บาง กรณี เช่น กรณี ที่ มี การ เชื่อม ต่อ กลไก ซึ่ง กัน มาก กว่า 2 ชั้น ขึ้น ไป และ ใน ส่วน ของการ ปรับ แต่ง ค่า ตัว แปร ภายใน กลไก หาก มี ขั้นตอน วิธี (Algorithm) สำหรับ การ หา ค่า ตัว แปร ที่ เหมาะสม เช่น Bisection method และ Golden-section search จะ สามารถ ทำ ให้ การออกแบบ มี ความ รวดเร็ว มาก ขึ้น และ สามารถ ทำ ให้ กระบวนการ การออกแบบ ตั้ง ค่า เป็น แบบ อัตโนมัติ ได้

ในบทคัดไปผู้วิจัยกล่าวถึงการทดลองนำกลไกชอร์โนนเที่ยมมาใช้งานร่วมกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบขา โดยใช้แนวทางการออกแบบและการตั้งค่ากลไกชอร์โนนเที่ยมตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5

บทที่ 3 การใช้กลไกออร์โนนเที่ยมร่วมกับหุ่นยนต์

บทนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาและการทดลองนำกลไกออร์โนนเที่ยมมาใช้กับหุ่นยนต์ที่มีรูปแบบการเคลื่อนที่แบบขาเนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้าพบว่าการทดลองกลไกออร์โนนเที่ยมส่วนใหญ่ใช้กับหุ่นยนต์ที่มีลักษณะเป็นล้อ ซึ่งมีความซับซ้อนเชิงโครงสร้างที่น้อยกว่าแบบขา ดังนั้นการทดลองนี้จึงต้องการศึกษาถึงความสามารถของกลไกออร์โนนเที่ยมที่นำมาใช้กับหุ่นยนต์แบบขาในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงจากทั้งภายในและภายนอก ซึ่งภายในบทนี้ประกอบด้วยการทดลองอยู่ 3 การทดลอง โดยใช้หุ่นยนต์ 6 ขาในแต่ละรูปแบบของการทดลองในสภาพการณ์ที่มีการเปลี่ยนจากภายนอก (การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิว) และการเปลี่ยนแปลงจากภายใน (การเสียหายของมอเตอร์) และทำการศึกษาเปรียบเทียบการทำงานระหว่างกลไกออร์โนนแบบเดิมและแบบใหม่จากการเสียหายของมอเตอร์

3.1 ระบบการทำงานของหุ่นยนต์

ระบบการทำงานของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนโครงสร้างของหุ่นยนต์ และส่วนระบบควบคุมการเดิน

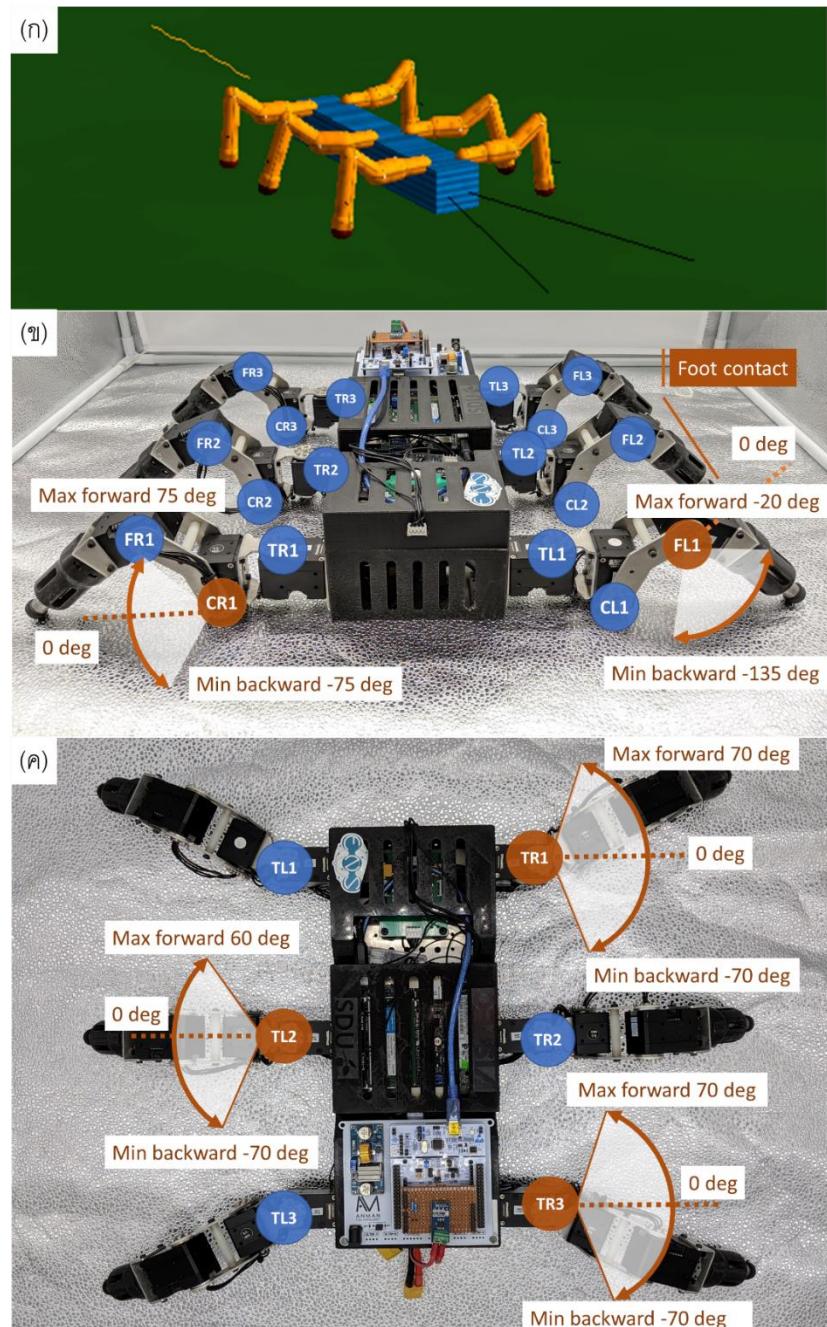
3.1.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์ 6 ขา

หุ่นยนต์ 6 ขาที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นหุ่นยนต์ที่เลียนแบบจากแมลงสาบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ที่แสดงลักษณะของหุ่นยนต์ MORF และลักษณะของหุ่นยนต์ 6 ขา ในแบบจำลองของโปรแกรม LPZrobots โดยแต่ละขาจะมีข้อต่อ 3 ข้อ ดังนี้

- ข้อต่อ thoraco-coxal (T-) ใช้สำหรับการก้าวไปข้างหน้าหรือโดยหลัง
- ข้อต่อ coxa-trochanteral (C-) ใช้สำหรับการยกตัวขึ้นหรือลง
- ข้อต่อ femur-tibia (F-) ใช้ในการยืดหรือหดขา

ปลายขาของหุ่นยนต์มีเซนเซอร์วัดการสัมผัส และมีส่วนข้อต่อกลางตัว (backbone joint) 1 ข้อต่อ มีการเลียนแบบข้อต่อกลางตัวของแมลงสาบทำให้เพิ่มความสามารถในการเกาะพื้นผิว ส่งผลให้หุ่นยนต์สามารถปีนข้ามสิ่งกีดขวางที่มีความสูงมากกว่าการยกเท้าปกติ

ส่วนประกอบของหุ่นยนต์ MORF ประกอบด้วยเซอร์วิsmoเตอร์รุ่น XM430-350 Dynamixel จำนวน 18 ตัว มีแหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ขนาด 14.8V 4Ah ส่วนการประมวลผลคือ Intel NUC i7 เป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก หุ่นยนต์มีน้ำหนัก 4.5 กิโลกรัม

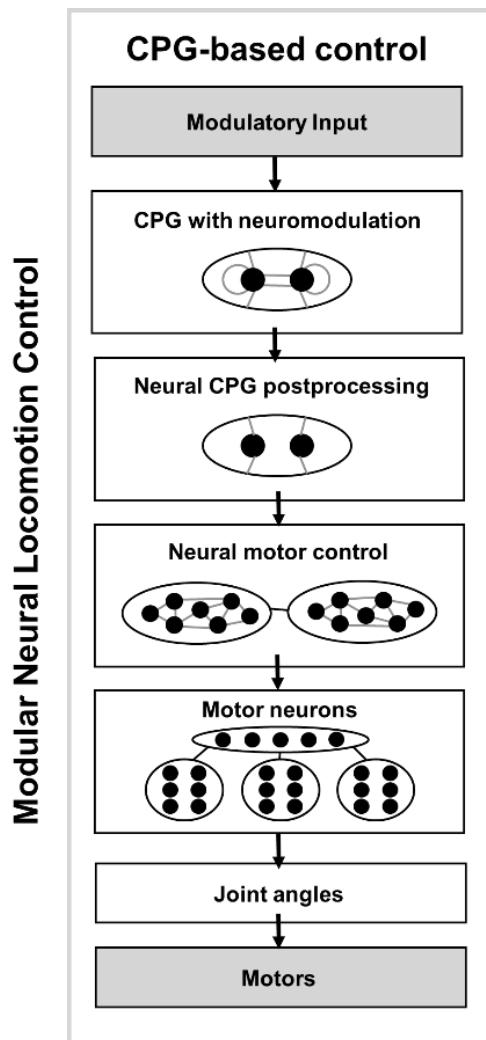


รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์ 6 ขา โดยภาพ (ก) หุ่นยนต์ด้วยโปรแกรมจำลอง LPZrobots (ข) ภาพด้านหน้าของหุ่นยนต์ MORF และ (ค) ภาพด้านบนของหุ่นยนต์ MORF

3.1.2 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ระบบควบคุมนี้เรียกว่า Modular neural locomotion control (MNLC) ซึ่งมี CPG-based control เป็นส่วนหลักในการทำงาน ซึ่งเลียนแบบจากระบบประสาทของสัมภาระที่มีการสร้างจังหวะสำหรับการ

เคลื่อนที่ MNLC ทำหน้าที่สร้างรูปแบบของท่าทางให้กับหุ่นยนต์ โดยมีส่วนประกอบอยู่ 4 ส่วน ดังรูปที่ 3.2 ประกอบด้วย



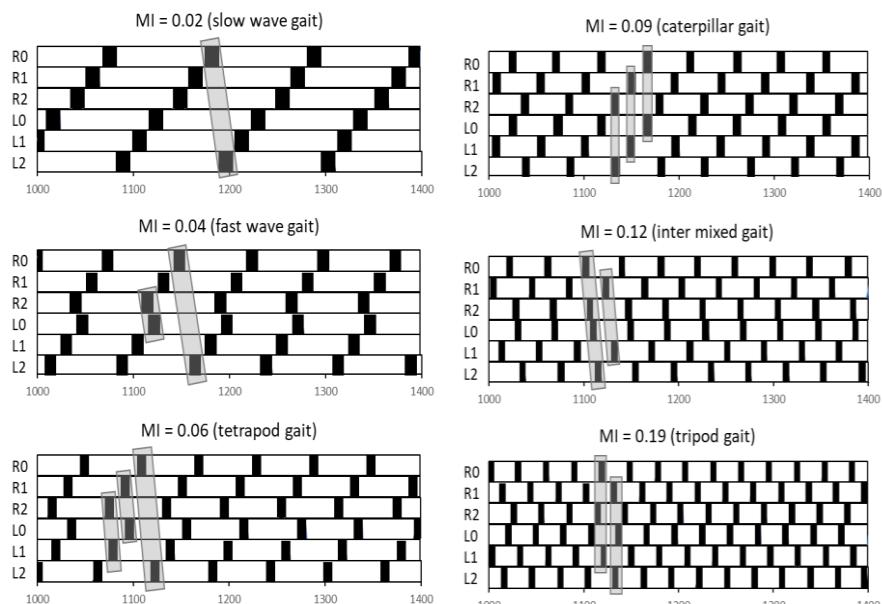
รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างภายในของระบบควบคุม MNLC ที่มี CPG-based control เป็นส่วนหลัก

ส่วนที่ 1 คือ Central pattern generator (CPG) ซึ่งทำหน้าที่ให้กำเนิดสัญญาณจากการเชื่อมต่อกันระหว่างนิวรอน 2 ตัว โดยมี Modulatory input (MI) เป็นค่าสำหรับปรับความถี่ในการก้าวขาของหุ่นยนต์ โดยเมื่อ MI มีค่าสูงจะส่งผลให้ท่าทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เปลี่ยนเนื่องจากจังหวะการก้าวขาที่ถูกสร้างขึ้นมาใหม่มีความถี่สูงขึ้น ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เพิ่มขึ้น ตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.3 แสดงจังหวะการก้าวเท้าของหุ่นยนต์โดยที่ค่า MI ที่ต่ำที่สุดคือ 0.02 ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ช้าที่สุดด้วยท่าทางแบบคลื่น (Slow wave gait) ที่มีลักษณะการยกเท้าทีละหนึ่งเท้าเรียงลำดับกันเป็นรูปคลื่น และในกรณีที่ค่า MI สูงที่สุดเท่ากับ 0.19 ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงที่สุด โดยมีลักษณะการยกเท้าพร้อมกัน 3 เท้าแบบมุมทแยงรูปสามเหลี่ยม (Tripod gait)

ส่วนที่ 2 คือ Postprocess CPG เป็นส่วนสำหรับปรับรูปสัญญาณจาก CPG ในส่วนที่ 1 เพื่อทำให้ท่าทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้หล่อelin ไม่ทำให้เกิดอาการกระดุกระหว่างการก้าวเท้า [22]

ส่วนที่ 3 คือ Neural motor control เกิดจากการเชื่อมต่อ กันของ 2 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network :ANN) ได้แก่ Phase-switching network (PSN) และ Velocity regulating network (VRN) ทั้ง 2 โครงข่ายมีหน้าที่สำหรับควบคุมพิษทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เช่น เคลื่อนที่ไปด้านหน้า, ถอยหลัง, เลี้ยวซ้าย หรือเลี้ยวขวา เป็นต้น [23]

ส่วนที่ 4 คือ Motor neuron ทำหน้าที่หน่วงสัญญาณก่อนที่จะส่งไปควบคุมมอเตอร์แต่ละข้อต่อ และสามารถช่วยปรับการหน่วงให้สัญญาณจาก MNLC สอดคล้องกับมอเตอร์ที่ใช้ภายในหุ่นยนต์



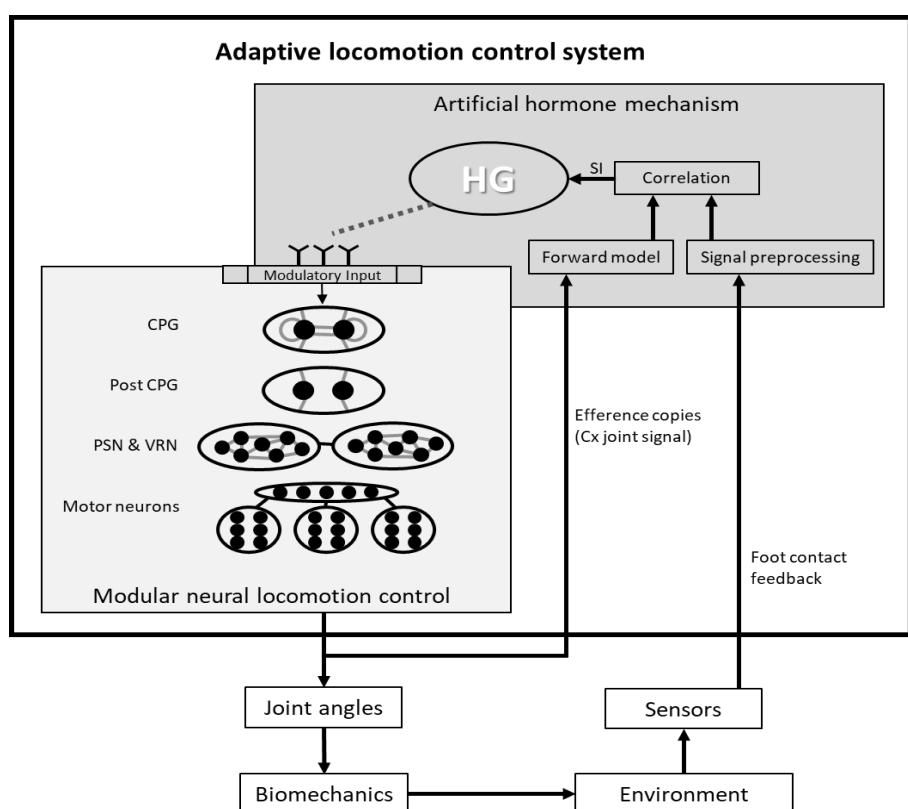
รูปที่ 3.3 แสดงรูปแบบการยกเท้าของหุ่นยนต์ที่ค่า MI ค่าต่าง ๆ โดยที่แบบสีดำคือจังหวะการยกเท้าของหุ่นยนต์ กำหนดให้ R0, R1 และ R2 คือขาด้านขวาโดยเรียงจากบนน้ำกางลงและหลังตามลำดับ ส่วน L0, L1 และ L2 คือขาด้านซ้ายเรียงลำดับเข่นเดียวกัน

3.2 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว

ระบบนี้ได้รับแรงบันดาลใจจากอร์โนนเซโร โภทนินในแมลงที่ส่งผลต่อความอิ่มอาหารในหนอนตัวกลม[24] หรือจิงหริดทองคำ (*Gryllus bimaculatus*) ที่แสดงพฤติกรรมก้าวรวมมากขึ้นเมื่อได้รับสาร์โนนเซโร โภทนิน [25] และกุ้งล็อบสเตอร์ที่มีพฤติกรรมเปลี่ยนไปคล้ายกับจิงหริดทองคำ ซึ่งพบว่าตัวรับสาร์โนนเซโร โภทนิน (5-HT) อยู่บริเวณปมประสาทตรงอก (Thoracic ganglia) และปมประสาทส่วนท้อง (Abdominal ganglia) ทำให้มีผลกระทบต่อท่าทางการเคลื่อนที่ และลักษณะการองค์ตัวเมื่อได้รับ

การนีดสารฮอร์โมนเชโรโนทิน[26] ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำแนวคิดของสารฮอร์โมนเชโรโนทินที่มีผลต่อท่าทางการเคลื่อนที่มาเป็นแรงบันดาลใจในการออกแบบกลไกฮอร์โมนเทียม เพื่อทำงานร่วมกับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่ง MNLC มีลักษณะคล้ายกับปัมประสาทของแมลง หากเปรียบกับอวัยวะภายในของกุ้งลีบอนสเตอร์คือประสาททรวงอก และเซลล์เป้าหมายสำหรับการเขื่อมต่อตัวรับสารฮอร์โมนเทียมคือค่า MI ที่อยู่ภายใน MNLC สำหรับเปลี่ยนแปลงท่าทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

จากรูปที่ 3.4 แสดงการทำงานของระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว (Adaptive locomotion control system :ALCS) ที่เกิดจากการรวมกันของระบบควบคุมการเคลื่อนที่และกลไกฮอร์โมนเทียม ซึ่งมีการเขื่อมต่อกันด้วยตัวรับสารฮอร์โมนกับ MI โดยมีการออกแบบกลไกฮอร์โมนสำหรับระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัวดังนี้



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว (ALCS)

ภายในกลไกฮอร์โมนมีต่อมฮอร์โมนเทียม 1 ต่อมและมีตัวรับสารฮอร์โมนเทียม 1 ตัว สำหรับการตั้งค่าภายในต่อมฮอร์โมน ในส่วนของ Signal preprocessing ถูกกำหนดเป็นรูปแบบค่าเบี่ยงเบน ที่มี Buffer size ขนาด 10 จังหวะ (Time step) และรูปแบบของ Activation function เป็นรูปแบบตัวอ.es ส่วนการตั้งค่าของตัวรับสารฮอร์โมน กำหนดให้ Target action เป็นการขยายและลดทอนด้วยการคูณกับค่า MI ดังสมการที่ 3.1 Receptor feature เป็นรูปแบบโดยตรง และ Receptor function เป็นรูปแบบเชิง

เส้นดังสมการที่ 3.2 และการตั้งค่า α , β และ γ มีค่าเท่ากับ 0.29, 0.017 และ 0.001 ตามลำดับ การตั้งค่ากลไกนี้สามารถเปลี่ยนเป็นสมการที่ 3.3 ดังต่อไปนี้

$$MI(t) = Receptor(t) \cdot MI(t - 1) \quad (3.1)$$

กำหนดให้

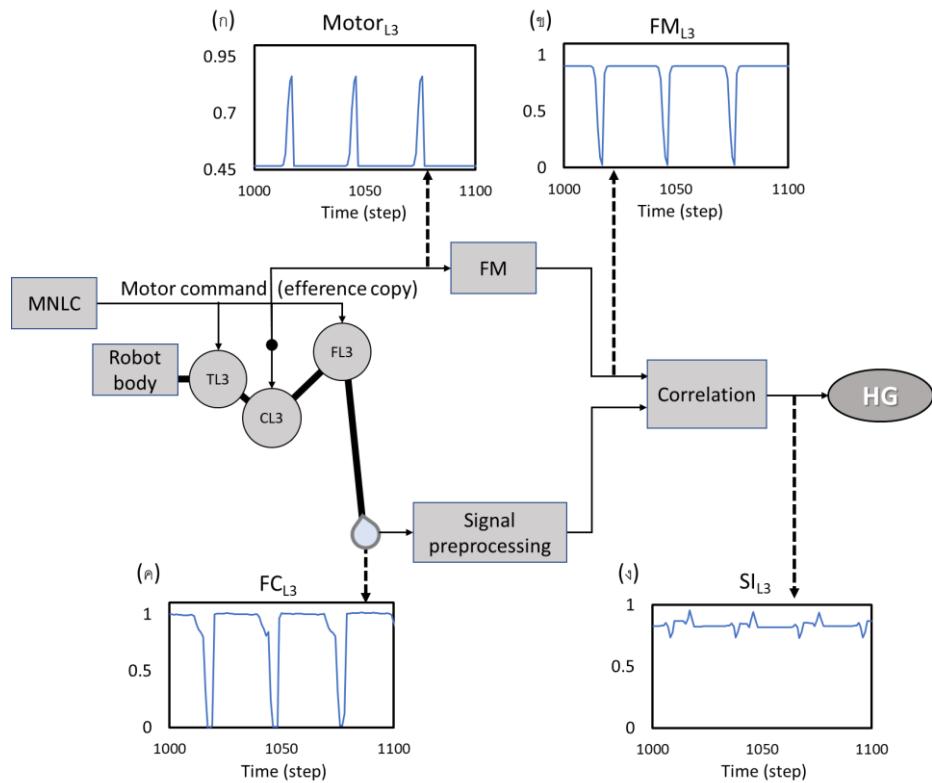
$MI(t)$ คือ ค่าสำหรับปรับความถี่ในการก้าวเดินของหุ่นยนต์ ณ เวลา t

$Receptor(t)$ คือ ค่าการกระตุ้นจากตัวรับสอร์โภต

$$Receptor(t) = (0.005 \cdot Binding(t)) + 0.995 \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} HC(t) = & 0.29 \cdot HG(t) + 0.017 \cdot HC(t - 1) \\ & - 0.001 \cdot Binding(t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

ส่วนการรับการกระตุ้นของต่อมออร์โภต (SI) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 นั้น กำหนดให้รับค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากเซนเซอร์วัดการสัมผัสบริเวณปลายเท้าของหุ่นยนต์ที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) กับค่าประมาณการสัมผัสพื้นจากคำสั่งควบคุมมอเตอร์ที่ข้อต่อ C- ทั้ง 6 ขาของหุ่นยนต์ โดยวิธีการแปลงคำสั่งควบคุมมอเตอร์ให้เป็นค่าประมาณการสัมผัสพื้นของขาปลายเท้าหุ่นยนต์(Forward model) ดังสมการที่ 3.4



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงการเตรียมสัญญาณสำหรับการกระตุ้นต่อมอร์โโนนเทียม (ก) คำสั่งมอเตอร์ (ข) ค่าประมาณการสัมผัสพื้น (ค) ค่าจากเซนเซอร์จากปลายเท้า (ง) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์และค่าประมาณการสัมผัสพื้นจากขาด้านหลังซ้ายของหุ่นยนต์สำหรับการกระตุ้นต่อมอร์โโนทาง SI

$$FM_i(t) = \mu \cdot ((1 - w) \cdot FM_i(t - 1) + w \cdot motor_i(t)) \quad (3.4)$$

กำหนดให้

$FM_i(t)$ คือ ค่าประมาณการสัมผัสจากคำสั่งมอเตอร์

μ คือ อัตราส่วนของขยาย

w คือ ค่าตัวแปรการกรองความถี่

$motor_i(t)$ คือ ค่าคำสั่งจากมอเตอร์ ณ เวลา t

ดังนี้เมื่อผลการเบริญเทียบจากค่าประมาณการสัมผัสพื้นกับเซนเซอร์สัมผัสที่ปลายเท้าของหุ่นยนต์เกิดความไม่สอดคล้องกันจะเป็นการกระตุ้นให้ต่อมอร์โโนนทำการหลบสารออร์โโนนออกมากเพิ่มขึ้น หากมีความสอดคล้องกันการหลบสารออร์โโนนจะลดลง จึงมีผลต่อความเข้มข้นของสารออร์โโนนที่ใช้ในการกระตุ้นเซลล์เป้าหมาย ซึ่งลักษณะการกระตุ้นเซลล์เป้าหมายในการทดลองนี้มีจุดสุดยอดของความเข้มข้นที่ 0.5 กล่าวคือหากมีค่าความเข้มข้นของสารออร์โโนนมากกว่า 0.5 จะเป็นการเพิ่มค่า MI

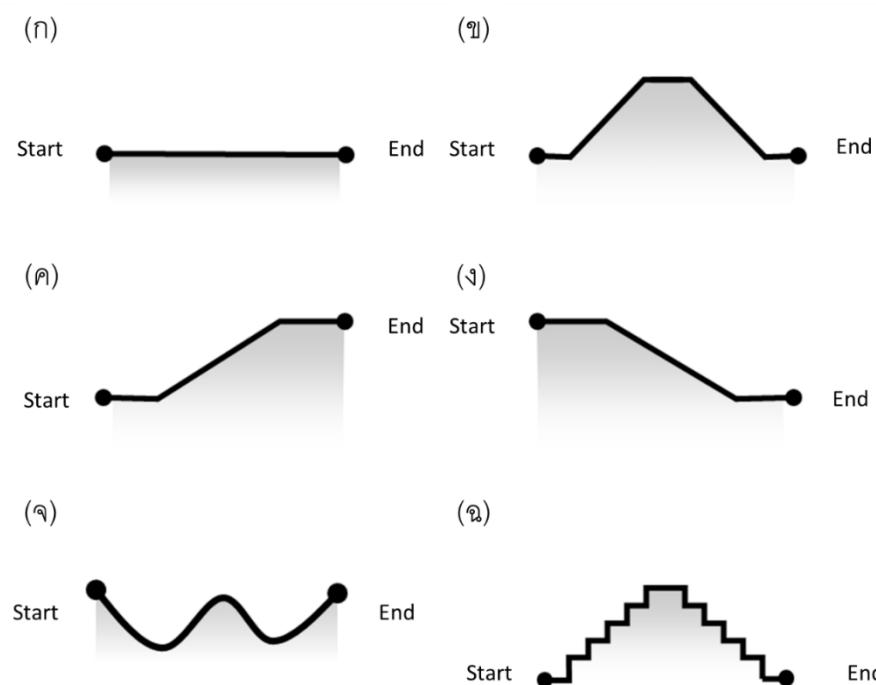
แต่ในทางกลับกันหากค่าความเข้มข้นของสารชอร์โอมน้อยกว่า 0.5 จะเป็นการลดค่า MI และผลของการปรับค่า MI นี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนจังหวะการก้าวเท้าของหุ่นยนต์ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1.2

3.3 การทดลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว ในกรณีการเปลี่ยนแปลงจากภายนอก

ในการทดลองนี้ทำการแบ่งออกเป็น 3 ประเด็น ได้แก่ การปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นผิวต่างๆ เพื่อแสดงถึงความสามารถในการปรับตัวของ ALCS, การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหุ่นยนต์ที่มีการควบคุมจาก ALCS กับ MNLC และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมจาก ALCS กับ MNLC ในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งวิธีการวัดประสิทธิภาพการเดินด้วยตัวด้านนี้ชี้วัด 3 ตัวคือ ผลของการเคลื่อนที่การรักษาสมดุลในการเคลื่อน และความสอดคล้องในการเคลื่อนที่ โดยใน 2 ประเด็นแรกเป็นการทดสอบกับหุ่นยนต์ 6 ขาในโปรแกรมจำลอง LPZrobots และในประเด็นสุดท้ายเป็นการทดสอบกับหุ่นยนต์ MORF

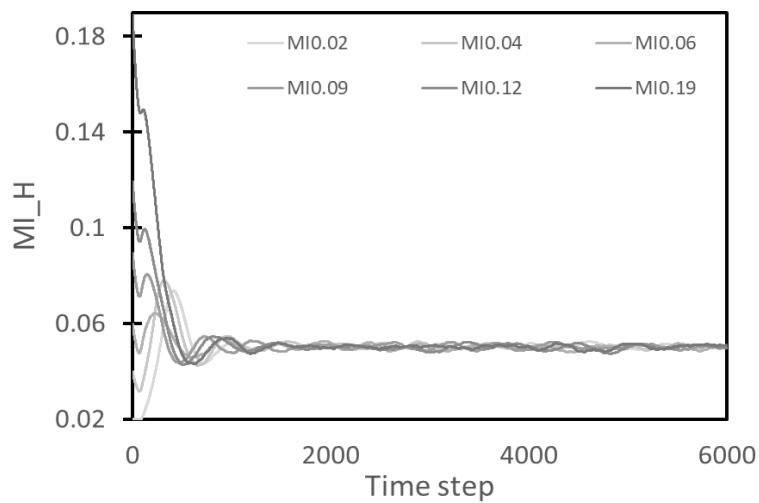
3.3.1 การทดลองการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นผิวต่างๆ

การทดลองการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นผิวต่างๆ มีการตั้งสมมุติฐานดังนี้ “กลไกชอร์โอมนเทียมสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภายนอกได้ ดังนั้นการกำหนดค่าเริ่มต้นของ MI ที่จุด ๑ ได้ เมื่อเวลาผ่านไปกลไกชอร์โอมนเทียมต้องสามารถทำการปรับค่า MI ให้ถูกเข้าสู่ช่วงที่เกิดสภาวะสมดุล ต่อการเคลื่อนที่บนพื้นผิวทุกแบบต่างๆ ได้” จากสมมุติฐานนี้นำมาสู่การตั้งค่าเริ่มต้นของ MI ดังนี้ 0.02, 0.04, 0.06, 0.09, 0.12 และ 0.19 โดยในแต่ละค่า MI เหล่านี้จะทดสอบให้หุ่นยนต์ที่ใช้ระบบ ALCS เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปด้านหน้าจนผ่านจุดเป้าหมายบนพื้นผิวทั้ง 6 แบบ (ดังรูปที่ 3.6)

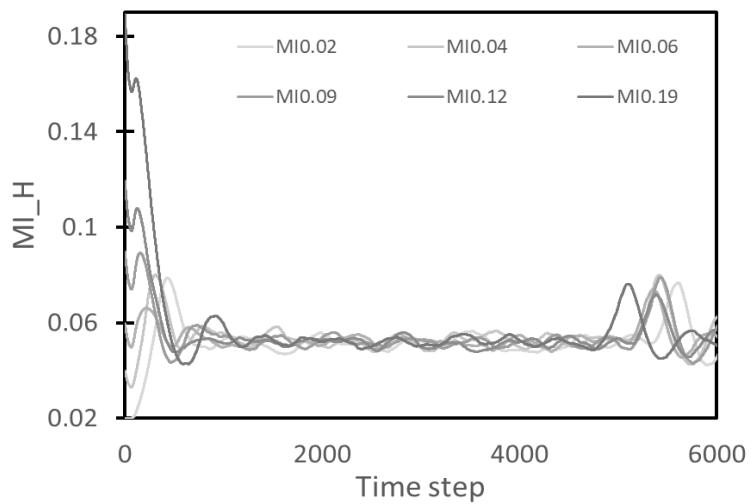


รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของพื้นผิวทั้ง 6 แบบ (ก)พื้นเรียบ, (ข)พื้นนิน, (ค)พื้นเอียงขึ้น, (ง)พื้นเอียงลง, (จ)พื้นขรุขระ และ (ฉ)พื้นขันบันได

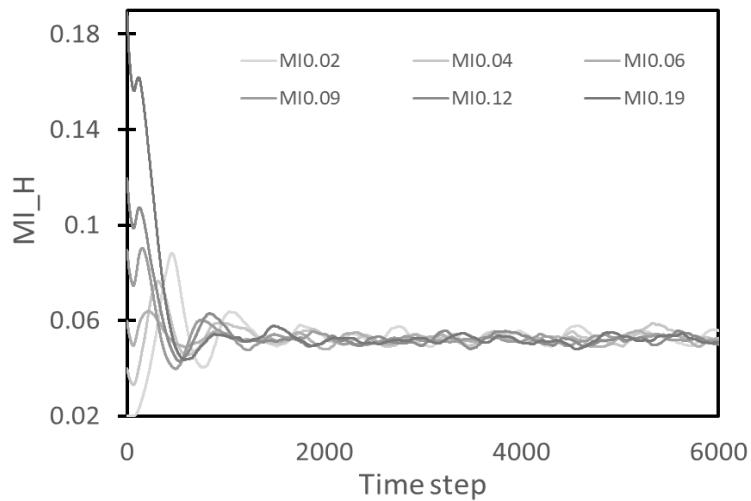
จากการทดลองที่แสดงในรูปที่ 3.7 – 3.12 แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับสมมุติฐานข้างต้นนั้นคือเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปบนรูปแบบพื้นผิว ก, ข, ค และ ง สังเกตเห็นว่าค่า MI ลู่เข้าสู่ช่วง 0.04-0.05 เนื่องด้วยพื้นผิวทั้ง 4 แบบมีลักษณะเป็นพื้นเรียบ ส่วนการเคลื่อนที่บนพื้นผิวรูปแบบ จ และ ฉ มีการแกว่งของค่า MI มากเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของพื้นผิว และรูปแบบของการแกว่งของแต่ละพื้นผิวคล้ายกัน ถึงแม้ว่าเริ่มต้นของ MI ต่างกัน จากรูปแบบการแกว่งของค่า MI นี้ เป็นผลทางอ้อมที่ทำให้สามารถคาดการณ์รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของระดับความสูงของพื้นผิว ดังกรณีพื้นผิวแบบ ฉ ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงมากทำให้ค่า MI มีการแกว่งมากตาม ดังนั้นการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์ที่ถูกควบคุมด้วย ALCS มีความสามารถในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงจากสภาพแวดล้อมภายนอกได้โดยไม่ขึ้นกับสถานะตั้งต้น



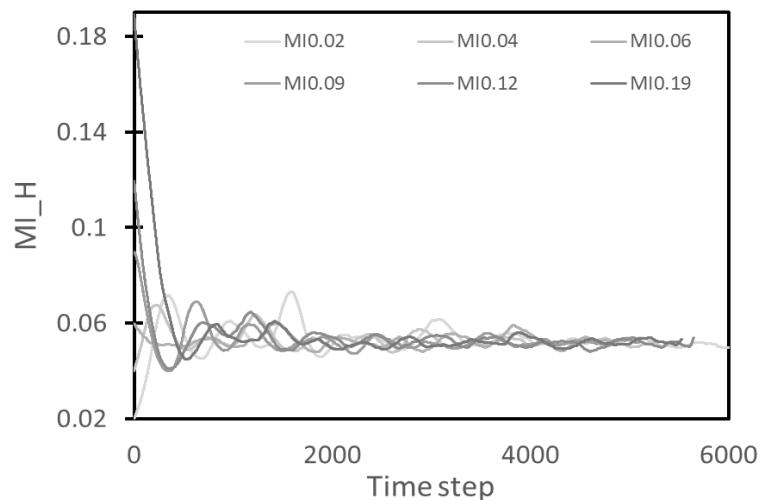
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงผลการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นเรียบ



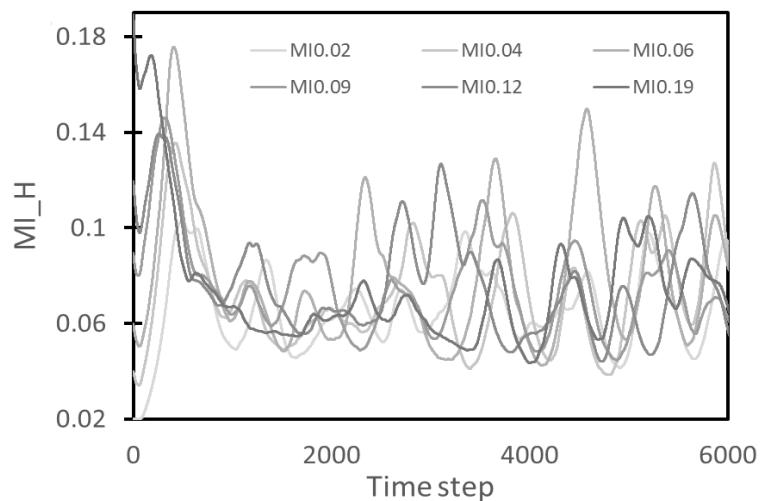
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงผลการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นเนิน



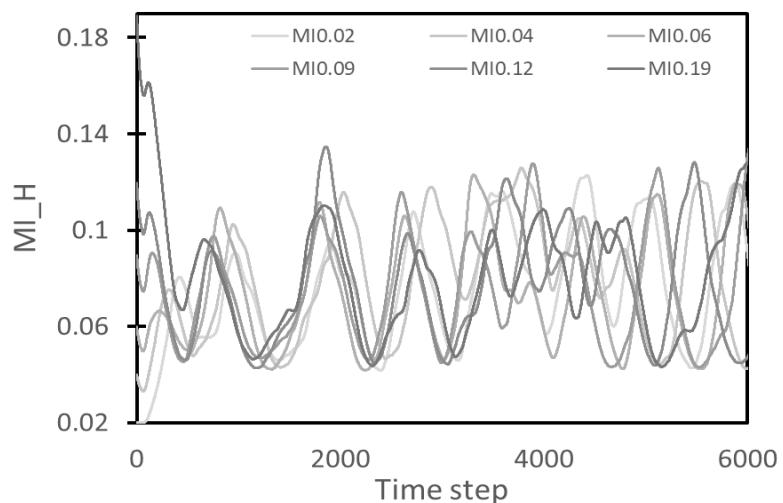
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงผลการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นเอียงขึ้น



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงผลการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นอิฐลง



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงผลการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นหินกระเบื้อง



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงผลการปรับตัวของหุ่นยนต์ต่อพื้นขี้นบันได

3.3.2 การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง MNLC กับ ALCS

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพิ่มเติมต่อจากหัวข้อ 3.3.1 เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมหุ่นยนต์แบบ ALCS (มีกลไกชอร์โนนเที่ยม) และ MNLC (ไม่มีกลไกชอร์โนนเที่ยม) โดยกำหนดค่า MI ตั้งต้นที่ 0.19 ของหุ่นยนต์ทั้ง 2 ระบบ เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด ในส่วนของการวัดประสิทธิภาพใช้ตัวชี้วัด 3 ตัว[27] ได้แก่ การรักษาสมดุลในการเคลื่อน (Stability) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงโอกาสในการล้มของหุ่นยนต์ ความสอดคล้องในการเคลื่อนที่ (Harmony) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการแกร่งตัวและอัตราการกระแทกในจังหวะก้าวเท้า ค่า Stability และ Harmony เป็นหลักการของ Iosa[28] ที่ใช้วัดประสิทธิภาพการเดินของมนุษย์ และค่า คุณภาพในการเคลื่อนที่เชิงระยะทาง (Displacement) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่เชิงระยะทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดหมาย โดยตัวชี้วัดทั้ง 3 ตัว มีค่าที่ประสิทธิภาพน้อยที่สุดคือ 0 และค่าที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 1 โดยขั้นตอนการคำนวณการวัดประเมินประสิทธิภาพทั้ง 3 ประเภท มีรายละเอียดดังนี้

- Stability เกิดจากการวัดค่าด้วยเซนเซอร์ 2 ชนิด ได้แก่ เซนเซอร์วัดความเร่ง (Acceleration sensor) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro sensor) อย่างละ 3 แกน (x, y และ z) โดยขั้นแรกนำค่าความหน่วง (Deceleration) ที่น้อยที่สุดในแต่ละแกนของเซนเซอร์วัดความเร่งตามดังสมการที่ 3.5 ซึ่ง i คือแกนของเซนเซอร์ (x, y และ z) และวิธีคำนวณค่าขนาดของความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) จากค่าที่สูงที่สุดและค่าต่ำที่สุดของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมมาลบกันดังสมการที่ 3.6 ซึ่ง i คือแกนของเซนเซอร์ (x, y และ z) และค่า A_{min} และ PP_{max} เกิดจากการเลือกค่าที่มากที่สุดของ Acc_{min_i} และ Ang_{PP_i} จาก 3 แกน จึงนำคำนวณตามสมการที่ 3.7

$$Acc_{min_i} = |min(Acc_i)| \quad (3.5)$$

$$Ang_{PP_i} = max(Ang_i) - min(Ang_i) \quad (3.6)$$

$$Stability = \frac{e^{-0.1A_{min}} + e^{-0.1PP_{max}}}{2} \quad (3.7)$$

- Harmony มีหลักการเช่นเดียวกับการหาค่า Stability โดยการนำค่าจากเซนเซอร์วัดความเร่ง และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมทั้ง 3 แกน มาคำนวณในสมการที่ 3.5 และ 3.6 ทั้งนี้สิ่งที่การคำนวณค่า Harmony ต่างจาก การคำนวณค่า Stability คือการคำนวณ

อัตราส่วนดังสมการที่ 3.8 และ 3.9 จากนั้นเลือกค่าอัตราส่วนของ RI_{A_i} และ RI_{PP_i} ที่มากที่สุดจาก 3 แกน เพื่อนำมาคำนวณหาค่า Harmony ดังสมการที่ 3.10

$$RI_{A_i} = \frac{\min(Acc_{min_i})}{\max(Acc_{min_i})} \quad (3.8)$$

$$RI_{PP_i} = \frac{\min(\text{Ang}_{PP_i})}{\max(\text{Ang}_{PP_i})} \quad (3.9)$$

$$\text{Harmony} = \frac{RI_A + RI_{PP}}{2} \quad (3.10)$$

- Displacement เป็นการพิจารณาการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นถึงจุดเป้าหมายจาก 3 อัตราส่วนได้แก่ อัตราส่วนระยะจัด, อัตราส่วนเส้นทางการเดิน และอัตราส่วนการเคลื่อนที่โดยประมาณ ดังสมการที่ 3.11 ตามลำดับ

$$\text{Displacement} = \frac{|\Delta x|}{\Delta s} \cdot \frac{|\Delta x|}{||\Delta r||} \cdot \frac{\Delta x}{T_{exp} \cdot V_{max}} \quad (3.11)$$

กำหนดให้

Δx กีระยะทางในแกน x จากจุดเริ่มต้นถึงจุดปลาย

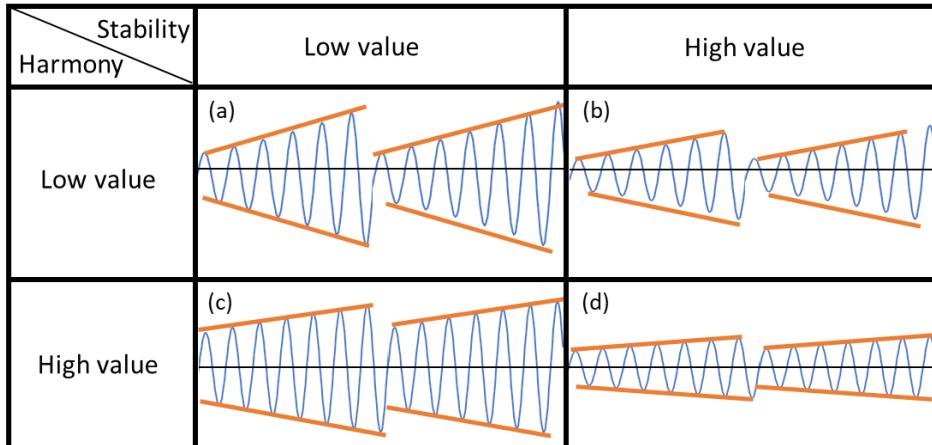
Δs กีระยะในการเดินตั้งแต่จุดเริ่มต้นถึงจุดจบ

Δr กีระยะกระจัด

T_{exp} กีเวลาที่ใช้ในการทดลอง

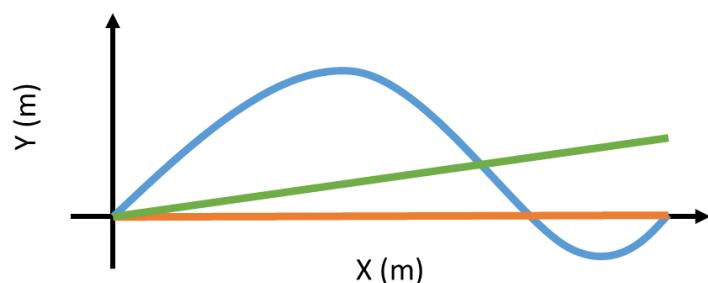
V_{max} กีความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ของการทดลอง

วิธีการวัดประดิษฐภาพเหล่านี้ สามารถแสดงรูปตัวอย่างสัญญาณจากเซนเซอร์สำหรับประเมินผลดังที่แสดงในรูปที่ 3.13 สำหรับการประเมินค่า Stability และ Harmony โดยรูปที่ 3.13 ช่อง (a) เป็นกรณีที่ leveraging ที่สุดเนื่องจากสัญญาณมีขนาดใหญ่และมีอัตราการขยายของสัญญาณมาก (สูงมาก) หากเทียบกับช่อง (d) เป็นกรณีที่ดีที่สุดคือมีขนาดของสัญญาณเล็กและมีอัตราการขยายของสัญญาจนน้อย (ขอบของสัญญาณเกือบจะบนกัน) ซึ่งขนาดของสัญญาณเป็นตัวบ่งชี้ค่า Stability และลักษณะการสู่ออกของสัญญาณเป็นตัวบ่งชี้ของค่า Harmony



รูปที่ 3.13 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของสัญญาณตัวอย่างสำหรับการประเมินค่า Stability และ Harmony

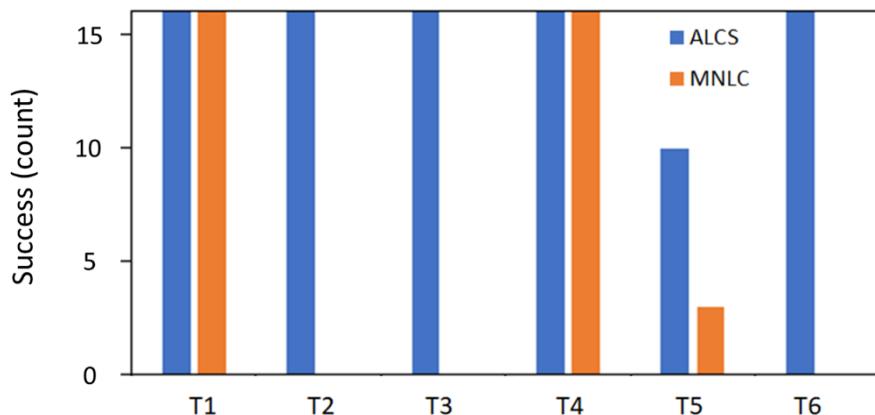
สำหรับตัวอย่างในการประเมิน Displacement ถูกแสดงในรูปที่ 3.14 โดยเส้นสีฟ้าคือเส้นที่มีค่าคุณภาพในการเคลื่อนที่สูงสุด (ค่า Displacement เท่ากับ 1) เนื่องจากเส้นทางการเคลื่อนเป็นเส้นตรงและมุ่งตรงเข้าสู่จุดเป้าหมาย หากเทียบกับเส้นสีฟ้าค่าที่ได้จะน้อยกว่า 1 ถึงแม้ว่าจะสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่จุดเป้าหมายได้ แต่ระหว่างทางเส้นทางการเคลื่อนที่มีการเดี้ยวเบนออกจากแนวตรงทำให้ระยะทางในการเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้อัตราส่วนเส้นทางการเดินน้อยกว่า 1 และเส้นสีเขียวคือรูปแบบที่เยี่ยที่สุดเนื่องจากเส้นทางการเดินเลี้ยวเบนออกไปจากจุดเป้าหมาย



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงตัวอย่างเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สำหรับประเมินค่าคุณภาพในการเคลื่อนที่

ในส่วนของขั้นตอนการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบ ALCS และ MNLC กำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปสู่จุดเป้าหมาย โดยมีรูปแบบพื้นผิวในการทดลอง 6 รูปแบบ (ดังแสดงในรูปที่ 3.6) และทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 16 ครั้ง ในการเปรียบเทียบผลการทดลองนั้น ทำการนับจำนวนครั้งที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ผ่านแนวจุดเป้าหมายได้ภายในเวลา 20 นาที หากหุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านแนวจุดเป้าหมายได้ภายในเวลา 20 นาทีจะถือว่าหุ่นยนต์ทำภารกิจไม่สำเร็จ ซึ่งมีผลสำเร็จดังแผนภูมิที่แสดงในรูปที่ 3.15 โดยระบบ ALCS สามารถทำ

การกิจสำเร็จทุกพื้นผิว ส่วนระบบ MNLC สามารถทำสำเร็จทั้ง 16 ครั้งเพียง 2 พื้นผิวได้แก่ พื้นผิวเรียบ, พื้นผิวอิ่มขัง และพื้นผิวขรุขระ โดยที่จำนวนครั้งที่สำเร็จบนพื้นผิวขรุขระของ ALCS ทำได้ 10 ครั้งจาก 16 ครั้ง ซึ่ง MNLC สามารถทำได้เพียง 3 ครั้ง

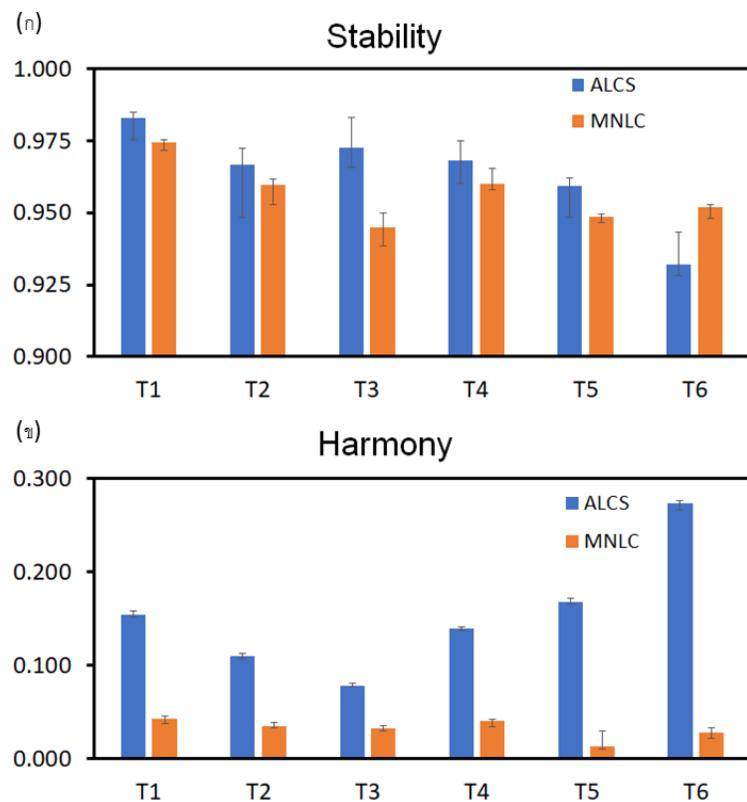


รูปที่ 3.15 แผนภูมิแสดงความสำเร็จในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นรูปแบบ T1 พื้นเรียบ, T2 พื้นเนิน, T3 พื้นอิ่มขึ้น, T4 พื้นอิ่มลง, T5 พื้นขรุขระ และ T6 พื้นขันบันได (สีน้ำเงิน คือ ระบบ ALCS และสีส้ม คือ ระบบ MNLC)

โดยการวิเคราะห์ผลจากการวัดประเมินด้วยค่าประสิทธิภาพ 3 ประเภทนั้น แบ่งการพิจารณาค่า Stability และ Harmony เนื่องจากทั้ง 2 ค่ามีความเกี่ยวข้องในการประเมิน และค่า Displacement ที่มีรายละเอียดของการตอบสนองแต่ละรูปแบบพื้นผิวที่แตกต่างกัน

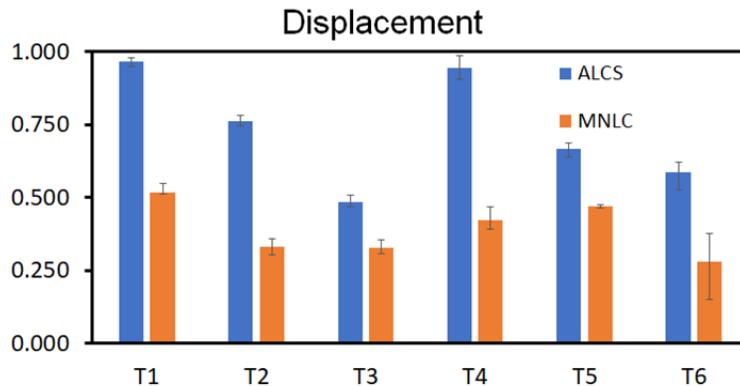
ผลการทดลองถูกนำเสนอในรูปที่ 3.16 (ก) ค่า Stability ทั้งหมดมีค่าสูงกว่า 0.9 เนื่องจากโครงสร้างของหุ่นยนต์มีลักษณะเป็น 6 ขาทำให้โอกาสล้มของหุ่นยนต์มีน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่า Stability ระหว่างระบบ ALCS กับ MNLC พบว่าไม่ต่างกันแบบมีนัยสำคัญทางสถิติด้วย การทดสอบที่ (t-test) ในส่วนค่า Harmony ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของการก้าวเท้ากับพื้นผิว มีความแตกต่างอย่างชัดเจนว่า ระบบ ALCS มีค่ามากกว่าระบบ MNLC ประมาณ 0.1 (ดังที่แสดงในรูป 3.16 (ข)) เนื่องจากค่า MI ของหุ่นยนต์ที่มีระบบ ALCS เป็นไปตามและมีค่า MI ของหุ่นยนต์ที่มีระบบ MNLC ประมาณ 0.1 (ดังที่แสดงในรูป 3.16 (ข)) เนื่องจากค่า Stability และ Harmony มากที่สุดและมีค่า Stability ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับผลของหุ่นยนต์ที่มีระบบ ALCS แบบเดียวกัน เพราะพฤติกรรมของหุ่นยนต์ที่พยายามปืนขึ้นขอบบันได แต่จังหวะการก้าวเท้าไม่พื้นของความสูงของบันได ทำให้หุ่นยนต์ไถลตกจากขอบลงมากระแทกพื้น จึงทำให้ค่า Stability ต่ำ หากนำค่า MI (ดังที่แสดงในรูปที่ 3.12) มาประกอบการพิจารณาพบว่าระบบ

ALCS มีการปรับเปลี่ยนจังหวะการก้าวเดินเป็นช่วงที่กว้างทำให้การเคลื่อนที่สอดคล้องไปกับการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว



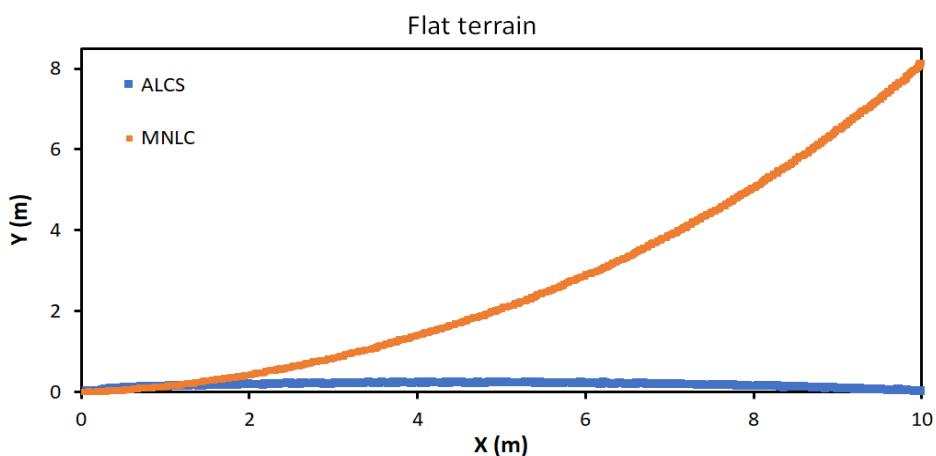
รูปที่ 3.16 แผนภูมิแสดงค่าดัชนีการวัดประสิทธิภาพของการทดสอบแต่ละพื้นผิว Rupee แบบ T1 พื้นเรียบ, T2 พื้นเนิน, T3 พื้นเอียงขึ้น, T4 พื้นเอียงลง, T5 พื้นบรุษระ และ T6 พื้นขั้นบันได (ก) ค่า Stability และ (ข) ค่า Harmony (สีน้ำเงิน คือ ระบบ ALCS และสีส้ม คือ ระบบ MNLC)

จากรูปที่ 3.17 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า Displacement ซึ่งผลของหุ่นยนต์ที่มีระบบ ALCS มีค่ามากกว่าระบบ MNLC ในทุกพื้นผิว โดยในรายละเอียดของพื้นผิวแต่ละรูปแบบนั้นมีการแสดงรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.17 แผนภูมิแสดงค่าดัชนีการวัดประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของกรดสอบแต่ละพื้นผิวบนแบบ
T1พื้นเรียบ, T2พื้นเนิน, T3พื้นอุ่งขี้น, T4พื้นอุ่งลง, T5พื้นชุขะ และ T6พื้นขันบันได
(สีน้ำเงิน คือ ระบบ ALCS และสีส้ม คือ ระบบ MNLC)

รูปแบบพื้นผิวเรียบ (ดังที่แสดงในรูป 3.6 (ก) ระบบ ALCS มีค่าสูงกว่าระบบ MNLC เพราะเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ระบบ ALCS ค่อนข้างเป็นเส้นตรงตามแนวแกน X จึงทำให้ค่า Displacement เข้าใกล้ 1 (ดังแสดงในรูปที่ 3.18) จากการเคลื่อนที่ในช่วงแรกทั้ง 2 ระบบมีค่า MI ที่เท่ากัน จึงทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่โถงไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อระบบ ALCS พยายามปรับค่า MI ให้ลุ่เข้าจุดสมดุลทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่โถงกลับเข้ามาเป็นเส้นตรง

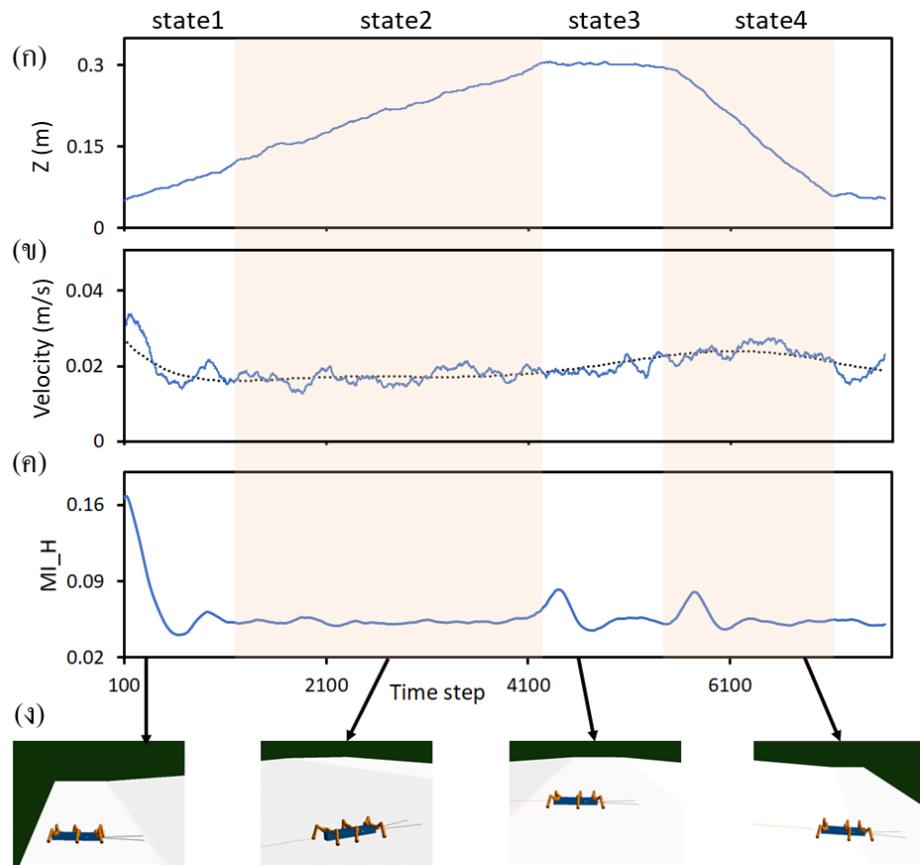


รูปที่ 3.18 กราฟแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นผิวเรียบ

รูปแบบพื้นผิวแบบเนินมีลักษณะเป็นพื้นอุ่งขี้นและลง มีพื้นเรียบอยู่ด้านบน (ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ข)) มีความยาวในแนวระนาบทองพื้นอุ่ง 3 เมตร และมีมุนอุ่งทำมุน 7.6 องศา ทั้งส่วนที่อุ่งขี้นและลง ซึ่งเป็นค่ามุนอุ่งที่หุ่นยนต์ยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ด้วยท่าทางการเดินทุกท่าทาง และส่วนที่เป็นพื้นเรียบด้านบนมีความยาว 1 เมตร (ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ข))

จากผลการทดลองที่ได้ ระบบ MNLC ไม่สามารถเคลื่อนที่ถึงจุดหมาย เนื่องจากท่า Tripod เป็นท่าที่ยกเท้าพร้อมกัน 3 เท้าเป็นสามเหลี่ยมทแยงมุม จึงทำให้มีแรงต้านทานน้อย ส่งผลให้ขบวนที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นอิ่งเกิดการไถลทำให้ทิศทางของหุ่นยนต์หันออกด้านข้างและเลี้ยวอ่อนออกสนามทดสอบ ต่างจากระบบ ALCS สามารถเคลื่อนที่ไปถึงจุดเป้าหมายได้ โดยแบ่งผลการเคลื่อนที่เป็น 3 ช่วง กือ ช่วงเคลื่อนที่บนพื้นอิ่งขึ้น, ช่วงรอยต่อของพื้นอิ่งกับพื้นเรียบ และช่วงเคลื่อนที่บนพื้นอิ่งลง

ขบวนที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นอิ่งขึ้นพบว่าค่าเฉลี่ยความเร็วของหุ่นยนต์ลดต่ำที่สุด ดังที่แสดงในกราฟรูปที่ 3.19 (ข) สาเหตุเกิดจากการเคลื่อนที่บนพื้นอิ่งมีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงข้ามกับทิศทางของแรงโน้มถ่วง เมื่อพิจารณาค่า MI ในช่วงที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นอิ่งพบว่าค่า MI อยู่ที่ช่วงใน 0.051-0.053 (ดังที่แสดงในรูปที่ 3.19 (ค)) ซึ่งเป็นท่า Tetrapod มีลักษณะการเคลื่อนที่ด้วยการยกเท้าเป็นคู่ที่แยกกัน (ดังรูปที่แสดงในรูปที่ 3.3) ทำให้เท้าของหุ่นยนต์ที่สัมผัสพื้น 4 จุด เพิ่มแรงต้านทานในการไถลลง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของระบบ ALCS มีค่ามากกว่าระบบ MNLC และในช่วงการเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของพื้นผิว ระบบ ALCS พยายามปรับค่า MI เพิ่มขึ้น เนื่องจากขาคู่หน้าไม่สัมผัสพื้นจึงเกิดความไม่สัมพันธ์ทำให้มีการกระตุนกลไกออร์โนนเพื่อหลังสารออร์โนนออกมากขึ้น ส่งผลให้ค่า MI เพิ่มขึ้น เพื่อเปลี่ยนท่าทางการเคลื่อนที่ให้เป็นแบบ Caterpillar ที่มีลักษณะการยกขาคู่ที่ขนานกัน (ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3) เพื่อทำให้ขาของหุ่นยนต์สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวและทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านขอบໄไดเร็คชันจากการดันลำตัวของหุ่นยนต์ด้วยขาคู่ ช่วงสุดท้ายการเคลื่อนที่บนพื้นอิ่งลง ลักษณะการตอบสนองของระบบ ALCS คล้ายกับช่วงการเคลื่อนที่บนพื้นอิ่งขึ้น หากแต่ทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และแรงโน้มถ่วงไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้ความเร็วของหุ่นยนต์เพิ่มขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับค่า MI ที่มีการลดลงเป็นพุ่ติกรรมคล้ายกับการชะลอของลิ้นชีวิตที่พยายามจะรักษาสมดุลของการเคลื่อนที่ลงทางลาดไว้ [27]

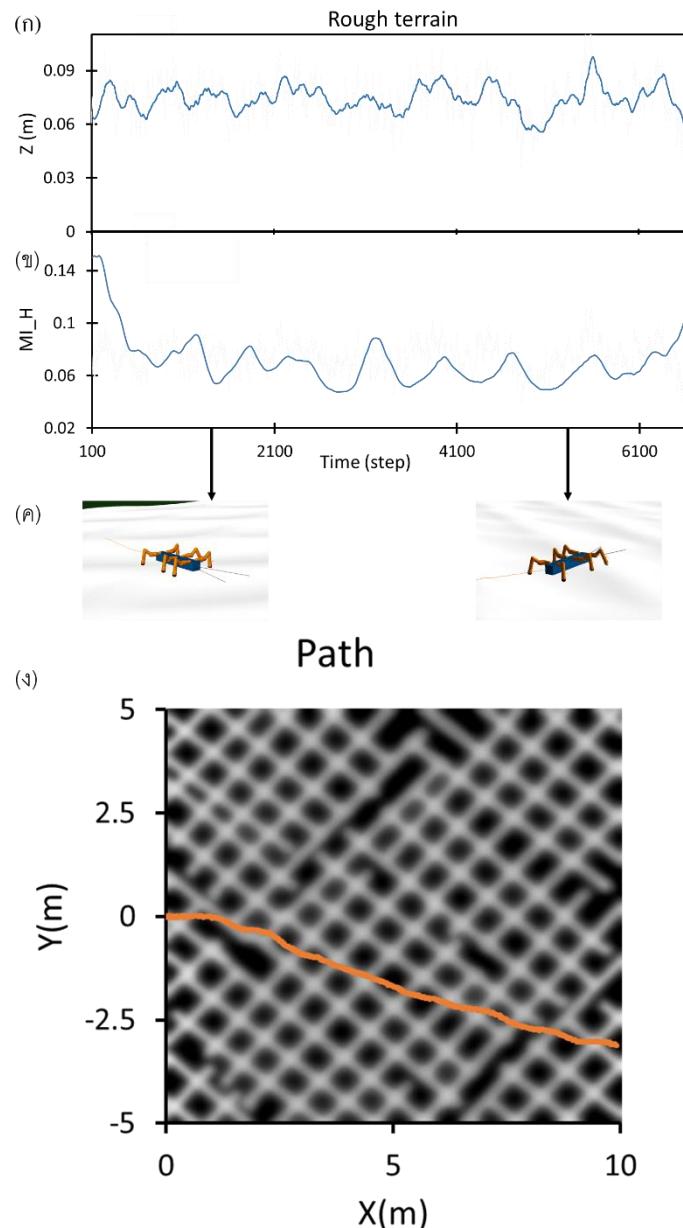


รูปที่ 3.19 แสดงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นเนิน (η) ค่าความสูงของลำตัวหุ่นยนต์, (ψ) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์, (κ) ค่า MI ที่ถูกกระตุ้นด้วยกลไกอร์โนน และ (γ) รูปแสดงสถานะของหุ่นยนต์ ณ บริเวณต่าง ๆ ของพื้นเนิน

รูปแบบพื้นอุบลรัตน์มีลักษณะของพื้นอุบลรัตน์ทำมุนอุบลรัตน์ 7.6 องศา และความยาวของพื้นอุบลรัตน์ 8 เมตร มีขอบพื้นเรียบเพื่อกำหนดเป็นจุดเริ่มต้นและจุดเป้าหมาย มีความยาว 1 เมตร จากรผลการทดลอง ระบบ ALCS สามารถเดินไปถึงเป้าหมายได้ และมีพฤติกรรมเหมือนกับการเดินบนพื้นผิวแบบเนิน สาเหตุที่ค่าคุณภาพในการเคลื่อนที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบเดียวกัน เพราะทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เลี้ยวโค้งออกจากเป้าหมายไปทางด้านข้าง เนื่องจากหุ่นยนต์มีการไถลและระบายทางในการเคลื่อนที่บนพื้นอุบลรัตน์นี้ยากกว่าพื้นผิวแบบเนิน

รูปแบบพื้นอุบลรัตน์มีลักษณะทุกอย่างคล้ายกับรูปแบบพื้นอุบลรัตน์แต่ลักษณะการอุบลรัตน์เป็นทิศทางตรงกันข้าม ระบบควบคุมทั้ง 2 ระบบสามารถเคลื่อนที่ถึงจุดเป้าหมายได้ โดยระบบ ALCS มีค่าคุณภาพการเคลื่อนที่สูงกว่าระบบ MNLC ซึ่งสอดคล้องไปกับการวิเคราะห์ในส่วนของพื้นผิวแบบเนินช่วงพื้นอุบลรัตน์ และหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ระบบ MNLC มีการเลี้ยวโค้งออกไป เพราะว่าบริเวณรอยต่อของพื้นผิวเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่มาถึงบริเวณนี้จะเกิดการกระแทกทำให้ลำตัวของหุ่นยนต์เบี้ยงออกจากเส้น ส่งผลให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์หันออกไปทางด้านข้าง เนื่องจากหุ่นยนต์

เคลื่อนที่ลงมาด้วยความเร็วโดยไม่มีการชะลอ จากค่า MI ที่มีค่าสูงและมีพิษทางการเคลื่อนที่ทางเดียวกับแรงโน้มถ่วง

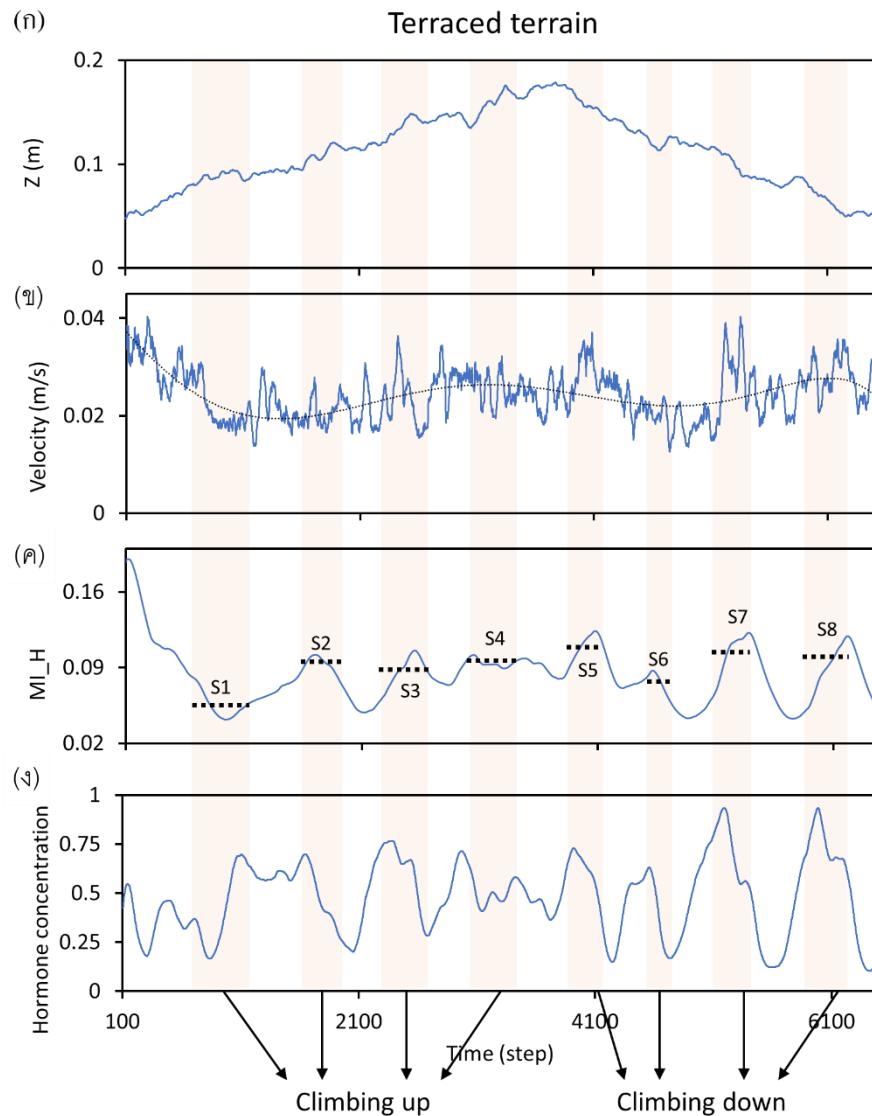


รูปที่ 3.20 แสดงประสิทธิภาพการเดินของหุ่นยนต์บนพื้นผิวรูบระ (ก)ค่าความสูงของลำด้าหุ่นยนต์, (ข) ค่า MI ที่ถูกกระตุ้นด้วยกลไกอร์โนน (ค)รูปแสดงสถานะของหุ่นยนต์ ณ บริเวณต่าง ๆ ของพื้นผิวรูบระ และ(ง)เส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนพื้นผิวรูบระ

รูปแบบพื้นผิวรูบระมีลักษณะพื้นผิวดังรูปที่ 3.20 (ง) เป็นรูปแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงตลอดพื้นที่รวมทั้งบริเวณที่เป็นหลุม จึงเป็นรูปแบบพื้นที่ยากที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นผิวอื่น ซึ่งระบบ ALCS สามารถทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปถึงจุดเป้าหมายได้เพียง 10 ครั้งจาก 16 ครั้ง ซึ่งต่างจากระบบ

MNLC ที่หุ้นยนต์สามารถเคลื่อนที่ลึกลงดูเป้าหมายได้เพียง 3 ครั้งจาก 16 ครั้ง สาเหตุที่ทำให้หุ้นยนต์ทั้ง 2 ระบบไม่สามารถเคลื่อนที่ไปสู่จุดเป้าหมายได้ เนื่องจากหุ้นยนต์ตอกลงไปในหลุมและไม่สามารถออกจากหลุมได้ แต่สำหรับระบบ ALCS นั้นสามารถทำให้หุ้นยนต์เคลื่อนที่ลึกลงหมายได้มากกว่า เนื่องจากกลไกชอร์โนนเทียมสามารถรับรู้ถึงความไม่สมพันธ์จากปลายเท้าในขณะที่กำลังจะตอกลง หลุมหรืออยู่บริเวณขอบหลุม จึงเกิดการกระตุ้นให้หลังสารชอร์โนนเทียมออกมาเพื่อรักษาสมดุล ภายในกลไก ส่งผลให้ค่า MI เกิดการเปลี่ยนดังรูปที่ 3.20 (ข) หากสังเกตที่ยอดของค่า MI จะอยู่ช่วง ของท่า Caterpillar ที่มีลักษณะขาคู่ซึ่งช่วยให้หุ้นยนต์สามารถปืนออกจากหลุมได้

พื้นรูปแบบสุดท้ายมีลักษณะเป็นขั้นบันไดขึ้นและลง ความสูงแต่ละขั้น 3.5 เซนติเมตร แต่ละขั้นมี ความยาว 1 เมตร และมีรูปแบบการขึ้นและลงอย่างละ 4 ขั้น ค่าคุณภาพในการเคลื่อนที่ของระบบ ALCS เท่ากับ 0.58 มีสาเหตุมาจากหุ้นยนต์ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ขึ้นบันไดในแต่ละขั้นนาน เพราะว่า ท่าทางในการเคลื่อนที่ของหุ้นยนต์ไม่ถูกออกแบบสำหรับการปืนข้ามสิ่งกีดขวาง แต่ด้วยลักษณะทาง โครงสร้างของหุ้นยนต์ที่สามารถปืนป้ายได้ ดังนั้นมีอุปกรณ์ชอร์โนนเทียมถูกกระตุ้นจากความไม่ สมพันธ์ของการก้าวเท้ากับพื้นผิวจึงมีการหลั่งสารชอร์โนนทำให้ค่า MI (ดังที่แสดงในรูปที่ 3.21 (ค)) มีการแก่วงขึ้นลงเพื่อทำการปรับให้เท้าของหุ้นยนต์สัมพันธ์กับพื้นผิว หากสังเกตค่าเฉลี่ยของ MI ในช่วงการปืนขอบบันไดที่จุด S1-S4 เป็นช่วงหุ้นยนต์กำลังปืนขึ้น ซึ่งค่าเฉลี่ยที่จุด S1 อยู่ต่ำที่สุดเมื่อ หุ้นยนต์สามารถข้ามผ่านแต่ละขั้นไปค่า MI จะเริ่มมีการถูเข้าสู่ช่วงใหม่ และในช่วงของ S5-S8 เป็น ช่วงการเคลื่อนที่ลงบันได หากสังเกตที่ช่วง S4-S6 จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยในช่วงการเริ่มต้น ของการเคลื่อนที่ลงบันได และเมื่อหุ้นยนต์เคลื่อนที่ลงผ่านไป 2 ขั้น จึงเกิดการถูเข้าดำเนินใหม่ที่ S7 และ S8 จากพฤติกรรมการเคลื่อนที่นี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปรับตัวของระบบที่มีกลไก ชอร์โนนเทียม และยังมีความสามารถในการปรับจุดดุลยภาพ (Equilibrium point) ได้จากการรับรู้ สภาพแวดล้อมภายนอกที่มากกระตุ้น



รูปที่ 3.21 แสดงประสิทธิภาพการเดินของหุ่นยนต์บนพื้นขั้นบันได (ก)ค่าความสูงของลำตัวหุ่นยนต์, (ข)ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์, (ค)ค่า MI ที่ถูกกระตุ้นด้วยกลไกอร์โนน และ(ง) ค่าความเข้มข้นของฮอร์โนน

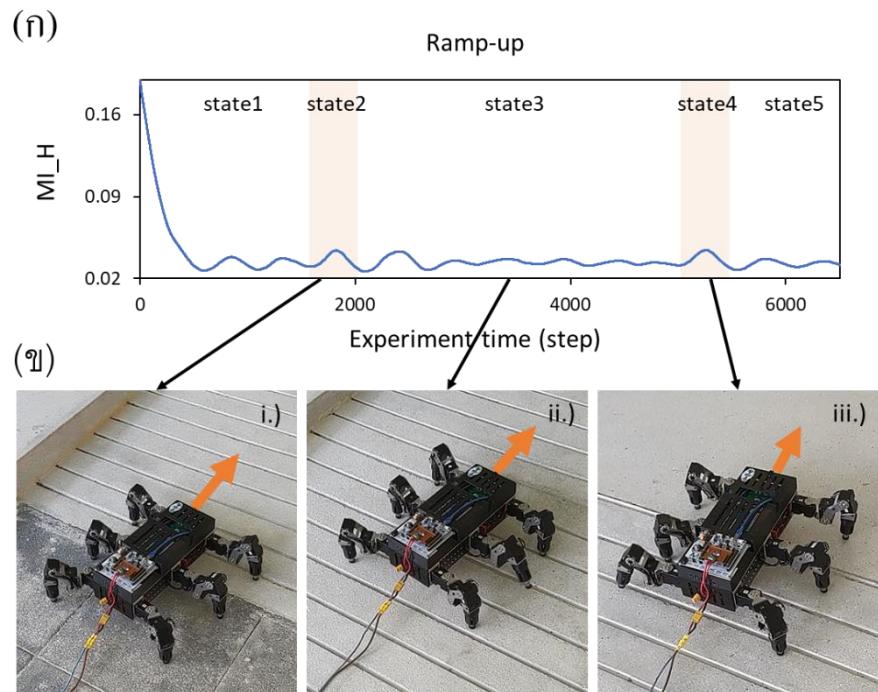
3.3.3 การทดลองระบบควบคุมหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมจริง

การทดลองนี้เป็นการนำระบบควบคุมแบบปรับตัวมาทดสอบกับหุ่นยนต์ MORF ที่มีการเปลี่ยนแปลงภายนอกตามสภาพแวดล้อมจริง โดยการเบริชเพิ่มความสามารถระหว่างระบบ ALCS, ระบบ MNLC และระบบ MNLC + Reflex ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับระบบ MNLC แต่เสริมการยึดหดขาหุ่นยนต์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่บนพื้นผิวชุอรุระ [22] โดยทั้งนี้แรกเป็นการแสดงความสามารถของการปรับตัวด้วยการนำหุ่นยนต์ MORF (ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข) และ (ค)) เคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวสำหรับการทดสอบ 4 รูปแบบ ได้แก่ พื้นเอียงขึ้น, พื้นเอียงลง, พื้นต่ำระดับ และพื้นชุอรุระที่มีหญ้าปกคลุมดังแสดงในรูปที่ 3.22

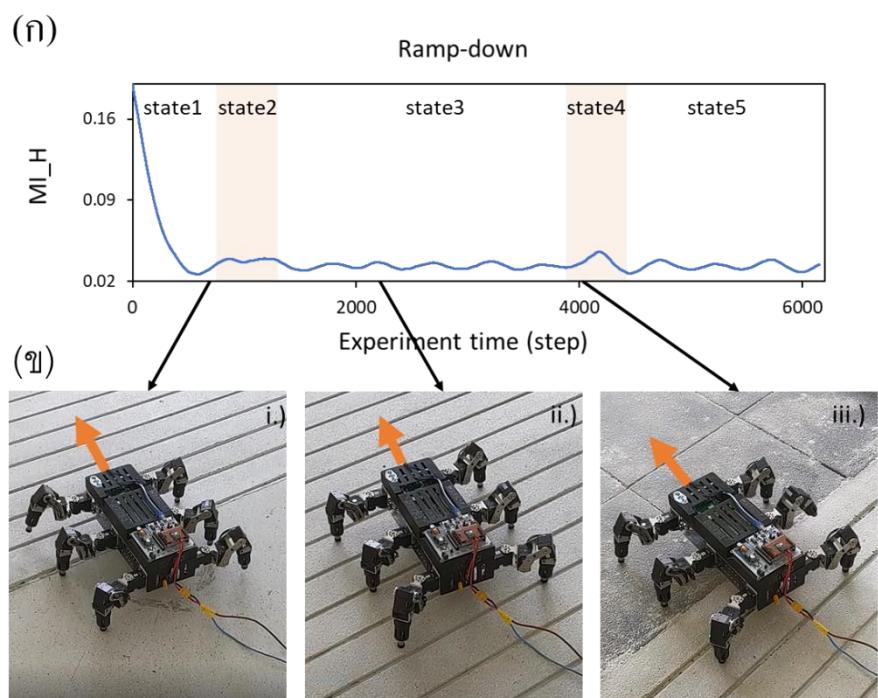


รูปที่ 3.22 แสดงพื้นผิวทั้ง 4 ที่ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (ก)พื้นเอียงขึ้น, (ข)พื้นเอียงลง, (ค)พื้นต่างระดับ และ(ง)พื้นชั้นวางที่มีหลุมปักคุณ

การทดลองการปรับตัวของหุ่นยนต์แสดงให้ทราบว่าหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่บนพื้นผิวทั้ง 4 รูปแบบจากจุดเริ่มต้นถึงจุดเป้าหมาย และแสดงการปรับท่าทางการเคลื่อนที่ เมื่อมีระดับความสูงของพื้นผิวเปลี่ยน ด้วยการปรับค่า MI ที่ถูกควบคุมจากกลไกชอร์โนนเที่ยม ดังกรณีพื้นเอียงขึ้นและพื้นเอียงลงที่บริเวณรอยต่อพื้นผิวที่เอียงและเรียบ ทำให้เกิดความไม่สัมพันธ์ของปลายเท้ากับพื้นผิว จึงเกิดการกระตุนต่อมอเตอร์โนนเที่ยมให้หลังสารชอร์โนนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า MI เพิ่มขึ้น เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านจุดรอยต่อแล้วความสัมพันธ์ของปลายเท้ากับพื้นผิวมีความสอดคล้องกัน ทำให้การหลังสารชอร์โนนลดลง ดังนั้นค่า MI บริเวณที่เป็นรอยต่อจึงมีค่ามากกว่าบริเวณที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ ขณะอยู่บนพื้นเอียง(ดังที่แสดงในรูป 3.23-3.24)

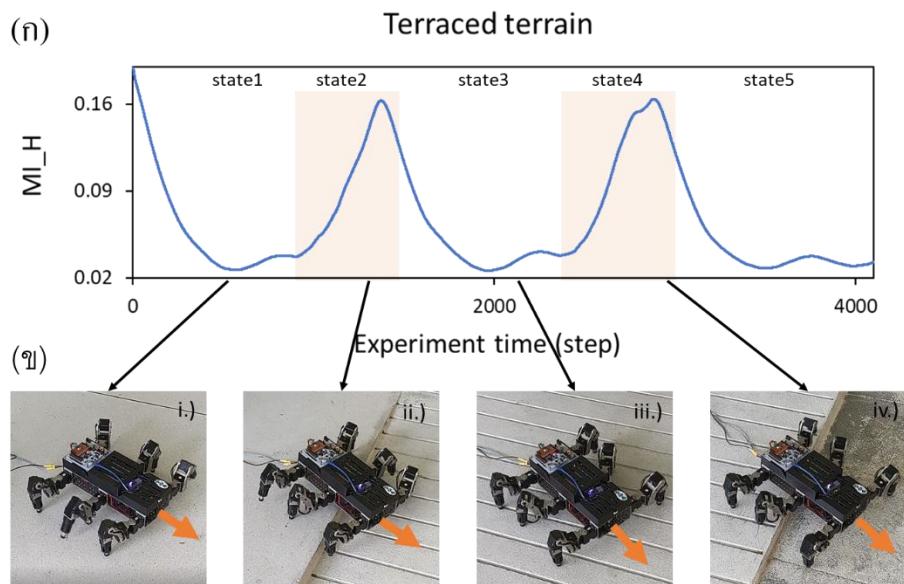


รูปที่ 3.23 แสดงผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ MORF บนพื้นอิฐบล็อก MI ที่ถูกกระตุ้นด้วยกลไกชอร์โไมน และ(ข)รูปแสดงสถานะของหุ่นยนต์ ณ บริเวณต่าง ๆ ของพื้นอิฐบล็อก



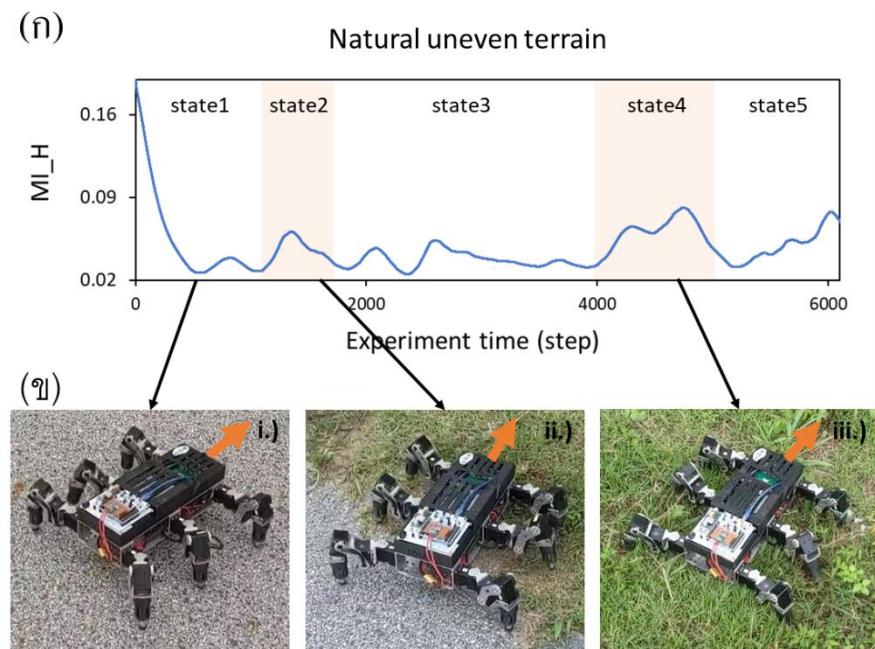
รูปที่ 3.24 แสดงผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ MORF บนพื้นอิฐบล็อก (ก) ค่า MI ที่ถูกกระตุ้นด้วยกลไกชอร์โไมน และ(ข)รูปแสดงสถานะของหุ่นยนต์ ณ บริเวณต่าง ๆ ของพื้นอิฐบล็อก

ในกรณีพื้นต่างระดับ ขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบของพื้นต่างระดับ ส่วนกลางตัวของหุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ เนื่องจากขาคู่กลางของหุ่นยนต์ติดบริเวณรอยต่อ ทำให้เกิดความไม่สัมพันธ์ระหว่างปลายเท้าและพื้นผิวจึงกระตุนให้เกิดการหลบสารออร์โนน ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า MI จนกระทั่งทั่งท่าทางการเคลื่อนที่เป็นรูปแบบ Caterpillar ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ยกขาทีละคู่ที่อยู่ตรงข้าม (ดังรูปที่แสดง 3.3) เมื่อขาคู่กลางของหุ่นยนต์ยกพร้อมกัน หุ่นยนต์จะสามารถหลุดออกจากบริเวณรอยต่อพื้นต่างระดับได้ (ดังแสดงในรูปที่ 3.25)



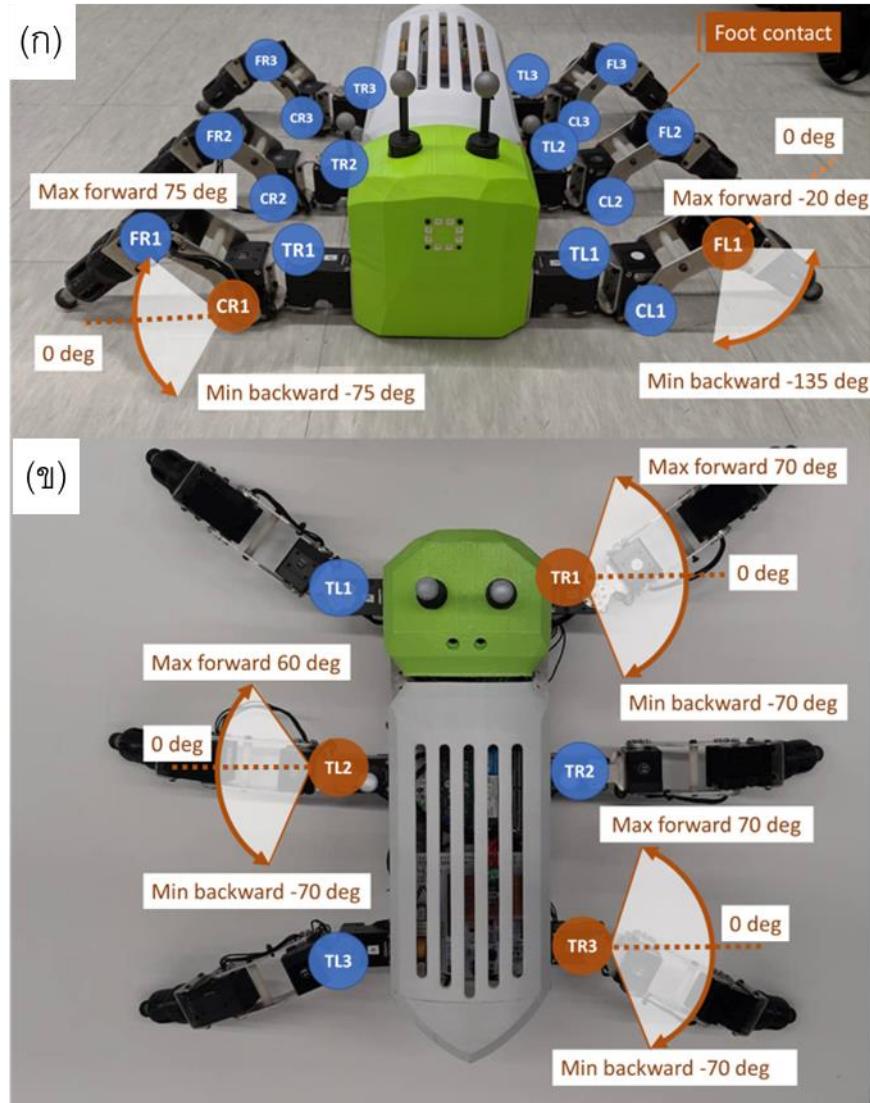
รูปที่ 3.25 แสดงผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ MORF บนพื้นต่างระดับ (ก) ค่า MI ที่ถูกกระตุ้นด้วยกลไกออร์โนน และ(ข)รูปแสดงสถานะของหุ่นยนต์ ณ บริเวณต่าง ๆ ของพื้นต่างระดับ

ในกรณีพื้นบรู๊ฟและมีหลังคาปักคลุมเป็นรูปแบบที่มีความซับซ้อนของพื้น เนื่องจากหลังคาที่ปักคลุมพื้นผิวทำให้ยากต่อการคาดการณ์ระดับความสูงของพื้นผิว ดังนั้นรูปแบบพื้นผิวนี้จึงเหมาะสมสำหรับการแสดงความสามารถของระบบ ดังรูปที่ 3.26 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่า MI เมื่อตามความสัมพันธ์ระหว่างปลายเท้ากับพื้นผิว ขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านบริเวณหลังคา เนื่องจากกอหลังคา มีความสูงทำให้บริเวณลำตัวและขาของหุ่นยนต์ติดกับหลังคา ส่งผลให้หุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าทำให้เกิดความไม่สัมพันธ์ระหว่างปลายเท้ากับพื้นผิว จึงมีการกระตุ้นให้หลบสารออร์โนนเพื่อเปลี่ยนแปลงท่าทางการเคลื่อนที่ จึงทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ผ่านออกมайд้วย



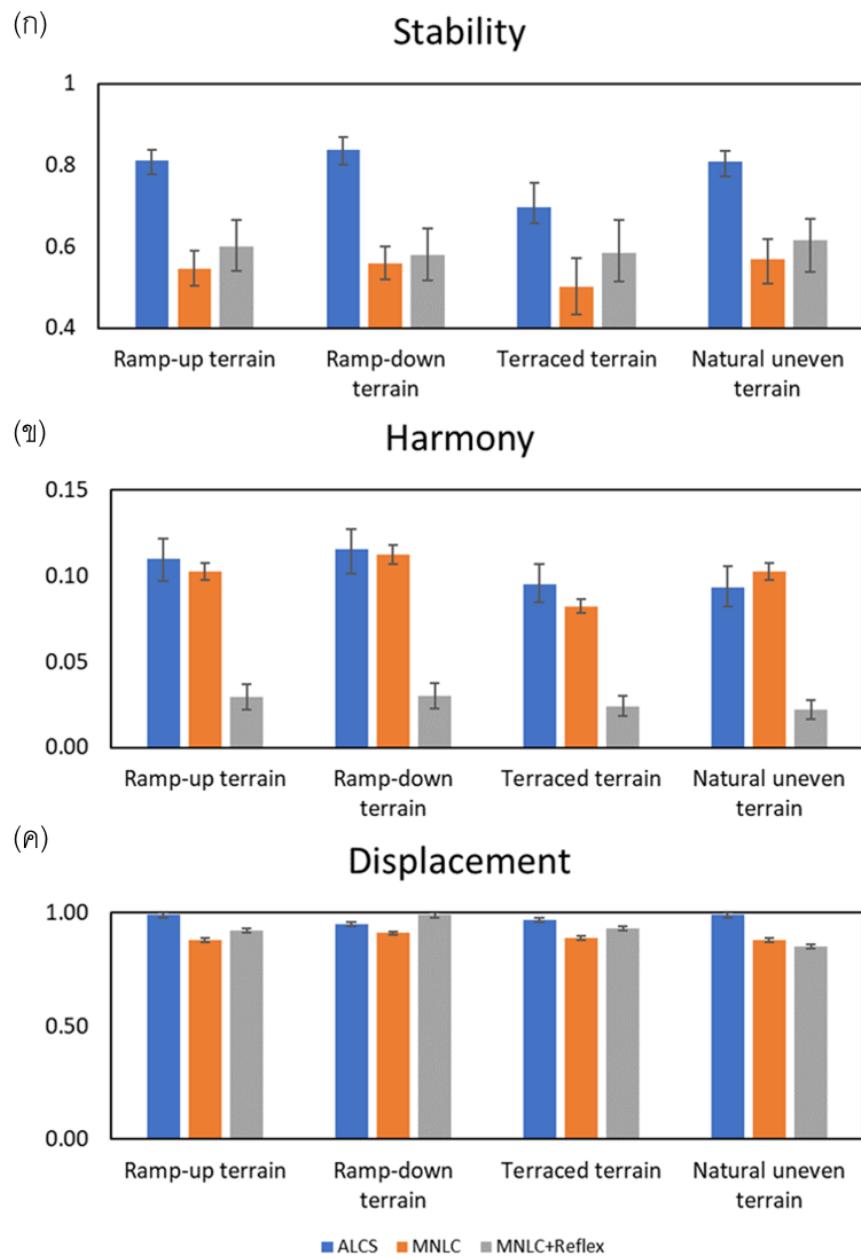
รูปที่ 3.26 แสดงผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ MORF บนพื้นที่ธรรมชาติที่มีหลุมร่องลุบ (ก) ค่า MI ที่ลูกกระตุ้นด้วยกลไกชอร์โนม และ(ข)รูปแสดงสถานะของหุ่นยนต์ ณ บริเวณต่าง ๆ ของพื้นที่ธรรมชาติที่มีหลุมร่องลุบ

จากการแสดงความสามารถในการปรับตัวของหุ่นยนต์ นำมาสู่การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้ง 3 ระบบ (MNLC, MNLC + Reflex และ ALCS) โดยวิธีการวัดประสิทธิภาพใช้หลักการเข่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2 ที่มีตัวชี้วัด 3 ค่าได้แก่ ค่า Stability, ค่า Harmony และค่าคุณภาพในการเคลื่อนที่ และมีข้อตอนในการทดลอง คือ หุ่นยนต์ต้องทำการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปสู่จุดเป้าหมาย จำนวน 5 ครั้งต่อ หนึ่งระบบ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงกรอบสำหรับครอบตัวหุ่นยนต์ MORF รูปแบบใหม่ดังที่แสดงในรูปที่ 3.27 (เนื่องจากกรอบเดิมเสียหายระหว่างการทดสอบ) ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์ถ่วงมวลแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบ



รูปที่ 3.27 แสดงลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์ MORF กรอบแบบใหม่ (ก) ภาพด้านหน้าของหุ่นยนต์ MORF และ (ข) ภาพด้านบนของหุ่นยนต์ MORF

ผลการเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมทั้ง 3 ระบบถูกแสดงโดยรูป 3.28 ระบบ ALCS มีค่า Stability ดีที่สุดในทุกการทดลอง เนื่องจากระบบ ALCS ทำการปรับค่า MI ให้อู่เข้าสู่ท่า Tetrapod ที่เป็นลักษณะการยกเท้าที่ลีลา 2 เท้าและเท้าที่ยกมีทิศทางทแยงมุมกัน (ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2) จึงทำให้หุ่นยนต์เกิดการกระแทกพื้นน้อย ส่วนระบบ MNLC + Reflex มีค่า Stability ที่ดีกว่าระบบ MNLC เพราะการยึดขาของหุ่นยนต์สามารถช่วยลดการกระแทกและเพิ่มจุดสัมผัสพื้น อย่างไรก็ตามค่า Harmony ของระบบ MNLC + Reflex มีค่าต่ำที่สุด นั้นก็เป็นผลมาจากการยึดขา เช่น กัน ที่ทำให้ลำตัวของหุ่นยนต์สูงขึ้นและทำให้เกิดการแกว่งตัวที่มาก



รูปที่ 3.28 แผนภูมิแสดงค่าดัชนีการวัดประสิทธิภาพของการทดสอบแต่ละพื้นผิว (ก) ค่า Stability (ข) ค่า Harmony และ (ก) ค่า Displacement โดยที่ (สีน้ำเงิน คือ ระบบ ALCS, สีส้ม คือ ระบบ MNLC และ สีเทา คือ ระบบ MNLC + Reflex)

จากการทดลองบนพื้นผิวชั้นในที่มีหลักฐานคลุมน้ำ มีลักษณะเป็นดินที่มีความนุ่มนวลจากการทดสอบน้ำตันไม่ซึ่งทำให้เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในครั้งแรกเกิดหลุมจากรอยเท้า และเมื่อทำการทดสอบซ้ำหุ่นยนต์จึงเคลื่อนที่ตามหลุมแนวรอยเท้าเดิม ดังนั้นค่าความแปรปรวนจึงมีค่าน้อยกว่าปกติเทียบกับการทดลองอื่น

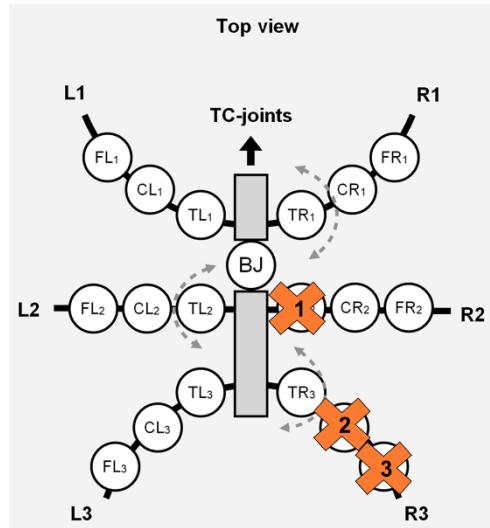
3.3.4 ข้อจำกัดของกลไกออร์โนนในการทดลอง

การทดลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัวในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากภายนอก แสดงถึงความสามารถของกลไกออร์โนนเที่ยมที่ทำงานร่วมกับระบบควบคุมการเคลื่อนที่สำหรับหุ่นยนต์ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบขา ส่งผลให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการปรับท่าทางการเคลื่อนที่ได้อย่างอัตโนมัติ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวโดยไม่ต้องติดตั้งเซนเซอร์สำหรับตรวจสอบพื้นผิว เช่น เลเซอร์[29] หรือกล้อง[30,31] และระบบ ALCS ที่มีกลไกออร์โนนเที่ยมอยู่ภายในไม่จำเป็นต้องมีการเรียนรู้สถานการณ์หรือรูปแบบพื้นผิว ก่อนล่วงหน้า[32] หรือไม่จำเป็นต้องย้ำเท้าอยู่กับที่ตลอดเวลา เพื่อทำการรักษาสมดุลของตัวหุ่นยนต์ [33] และประโยชน์ทางอ้อมที่ทำให้ทราบถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงจุดคุลียภาพของระบบเพื่อรักษาสมดุลภายในกลไกออร์โนนเที่ยม ที่แสดงในการทดลองหัวข้อ 3.2 ขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ขึ้นและลงพื้นผิวแบบขั้นบันได ถึงแม้ผลที่แสดงต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนจุดคุลียภาพและต้องอาศัยรูปแบบการกระตุ้นที่เข้าเดิมจากสภาพแวดล้อมภายนอกจึงถูกเข้าจุดคุลียภาพที่ตำแหน่งใหม่ รวมถึงข้อจำกัดของระบบ ALCS คือ ไม่สามารถตอบสนองการลื่นไถล หรือพื้นผิวที่มีแรงเสียดทานต่ำ

จากข้อกำหนดนี้ นำมาสู่การทดลองในหัวข้อถัดไปที่เกิดจากสมมุติฐานในข้อจำกัดของระบบที่มีกลไกออร์โนนเที่ยม โดยมีสมมุติฐาน “ถ้าหากหุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลงภายใน เช่น เกิดความเสียหาย หุ่นยนต์บางจุด โดยไม่สามารถระบุได้ หรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป กลไกออร์โนนเที่ยมจะสามารถปรับจุดคุลียภาพไปสู่จุดที่ช่วยให้หุ่นยนต์ทำการกิจกรรมการเคลื่อนที่สำเร็จได้หรือไม่”

3.4 การทดลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว ในกรณีการเปลี่ยนแปลงภายใน

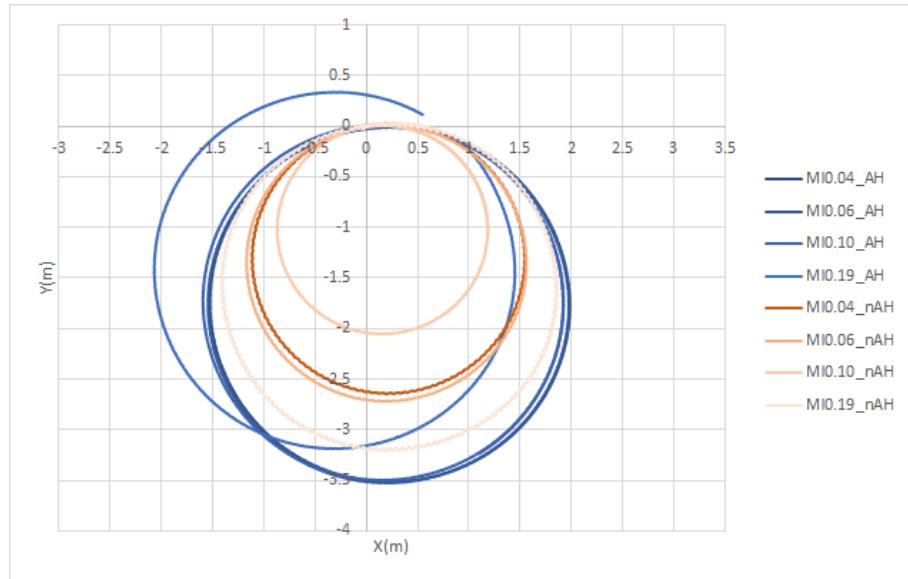
การเปลี่ยนแปลงภายใน สำหรับการทดลองนี้ หมายถึงการที่ค่าของข้อมูลภายในระบบหุ่นยนต์ไม่เป็นไปในสภาพปกติรวมถึงกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ที่อยู่บนตัวหุ่นยนต์ เช่น กรณีเกิดความเสียหายที่ทางโครงสร้างของหุ่นยนต์ การขัดข้องของเซนเซอร์ หรือความเสียหายที่มอเตอร์ เป็นต้น ซึ่งทำให้การทดลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัวสำหรับกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนั้น เป็นการจำลองความเสียหายของมอเตอร์ด้วยวิธีการปิดการทำงานมอเตอร์ โดยที่ระบบไม่ได้รับข้อมูลรูปแบบและลักษณะความเสียหาย การทดลองจะทำการปิดการทำงานของมอเตอร์ครั้งละ 1 มอเตอร์ มี 3 รูปแบบดังรูปที่ 3.29



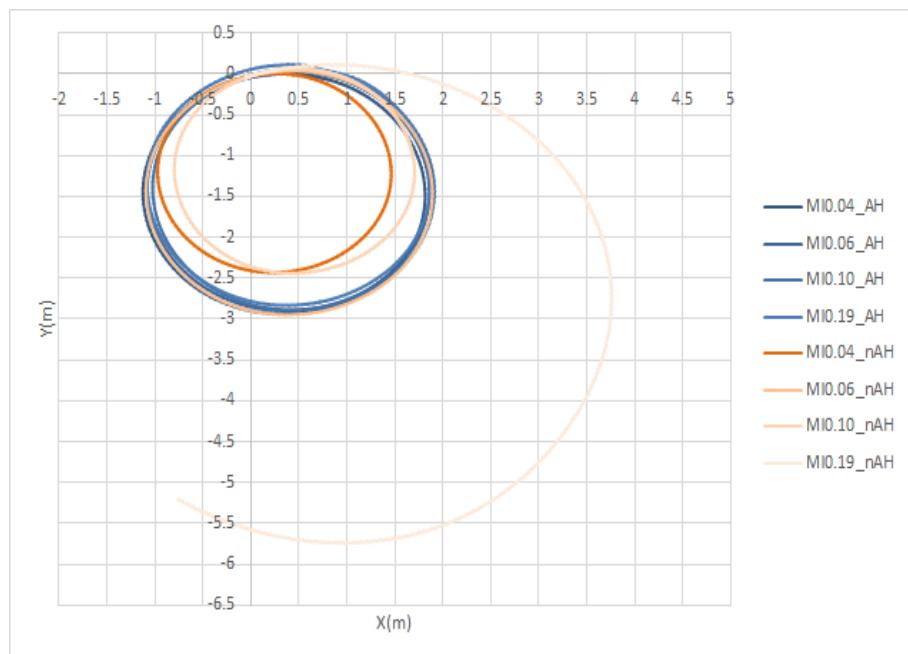
รูปที่ 3.29 แสดงตำแหน่งการปิดการทำงานของมอเตอร์

สมมุติฐานสำหรับการทดลองนี้ “หุ่นยนต์ที่มีกลไกชอร์โนนเทียมจะต้องสามารถปรับทิศทางการเคลื่อนที่ให้เป็นเส้นตรง เมื่อปิดการทำงานของมอเตอร์ และกลไกชอร์โนนเทียมทำการปรับจุดสมดุลใหม่” ดังนั้นวิธีการทดลองนี้กระทำในโปรแกรมจำลองด้วยหุ่นยนต์ 6 ขา โดยกำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปด้านหน้าและทำการปิดการทำงานมอเตอร์ นำข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มาเปรียบเทียบระหว่างระบบ ALCS กับ MNLC

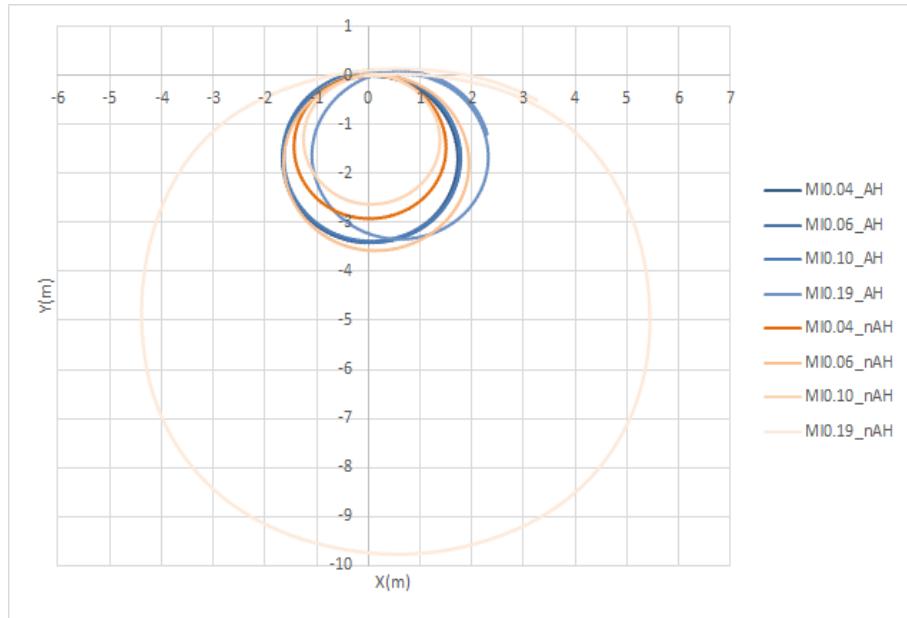
จากการเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบควบคุมทั้ง 2 ระบบ มีรูปแบบการเคลื่อนที่ลักษณะวงกลมทั้ง 2 ระบบ และไม่พบการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของระบบควบคุมที่มีกลไกชอร์โนน (ดังแสดงในรูปที่ 3.30-3.32) ซึ่งไม่สอดคล้องตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ เมื่อพิจารณาในรายละเอียดของค่าความเข้มข้นของสารออร์โนนร่วมกับค่า MI ทำให้ทราบว่ากลไกชอร์โนนเทียมพยายามทำการปรับจุดสมดุลใหม่ (ดังที่แสดงในรูปที่ 3.33) เนื่องจากค่าความเข้มข้นของสารออร์โนนเทียมลู่เข้าจุดสมดุลตามที่ออกแบบ (มีค่าเท่ากับ 0.5) แต่ค่า MI มีค่าอยู่ในช่วงที่ $0.057 - 0.060$ ซึ่งสูงกว่าสถานะปกติที่อยู่ในช่วง $0.043 - 0.051$ (จากหัวข้อ 3.3.1 การทดลองพื้นเรียบ)



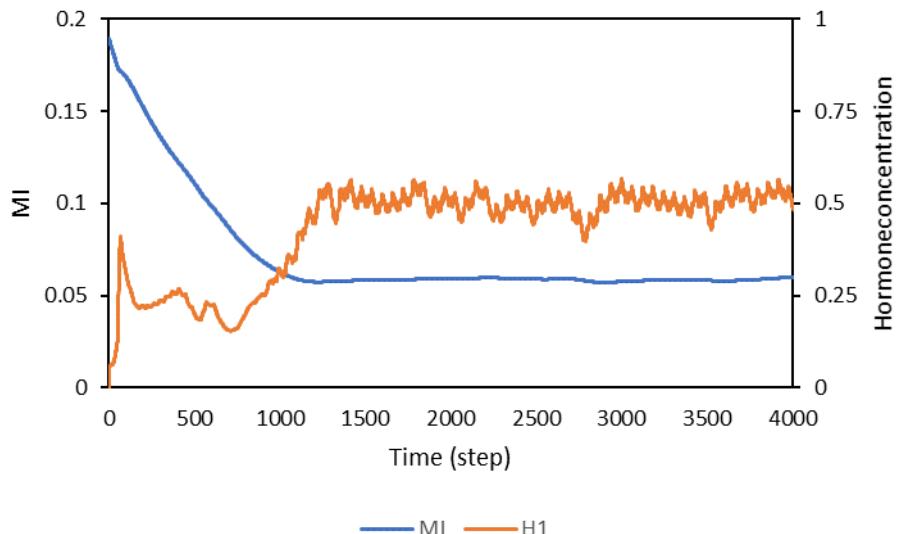
รูปที่ 3.30 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ถูกปิดการทำงานมอเตอร์ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 3.31 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ถูกปิดการทำงานมอเตอร์ที่ตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 3.32 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ถูกปิดการทำงานมอเตอร์ที่ตำแหน่งที่ 3



รูปที่ 3.33 กราฟแสดงค่า MI และค่าความเข้มข้นของสารฮอร์โมนจากทางทดลอง การเปลี่ยนแปลงภายใน

ดังนั้นการทดลองนี้ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดและขอบเขตความสามารถของการนำกลไกชอร์โอมน์ที่ยึมมาใช้งาน ในอีกประเด็นหนึ่ง นั่นคือ ความสามารถในการรับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงภายในเมื่อเกิดการเดิยสมดุลของระบบ เช่นในกรณีที่หุ่นยนต์เกิดความเสียหาย อย่างไรก็ตามการตอบสนองของกลไกชอร์โอมนนี้ ไม่สามารถตอบสนองให้หุ่นยนต์สามารถปรับการทำงานให้กลับสู่สมดุลได้ในบางกรณี ดังที่แสดงในการทดลองนี้ ซึ่งต้องพิจารณาเบริ่งเป็นล้วนของกลไกชอร์โอมนกับล้วนของระบบควบคุมที่นำมาใช้งานร่วม สำหรับในกรณีนี้กลไกชอร์โอมนเที่ยมพยาบาลตอบสนองแต่ระบบควบคุมไม่

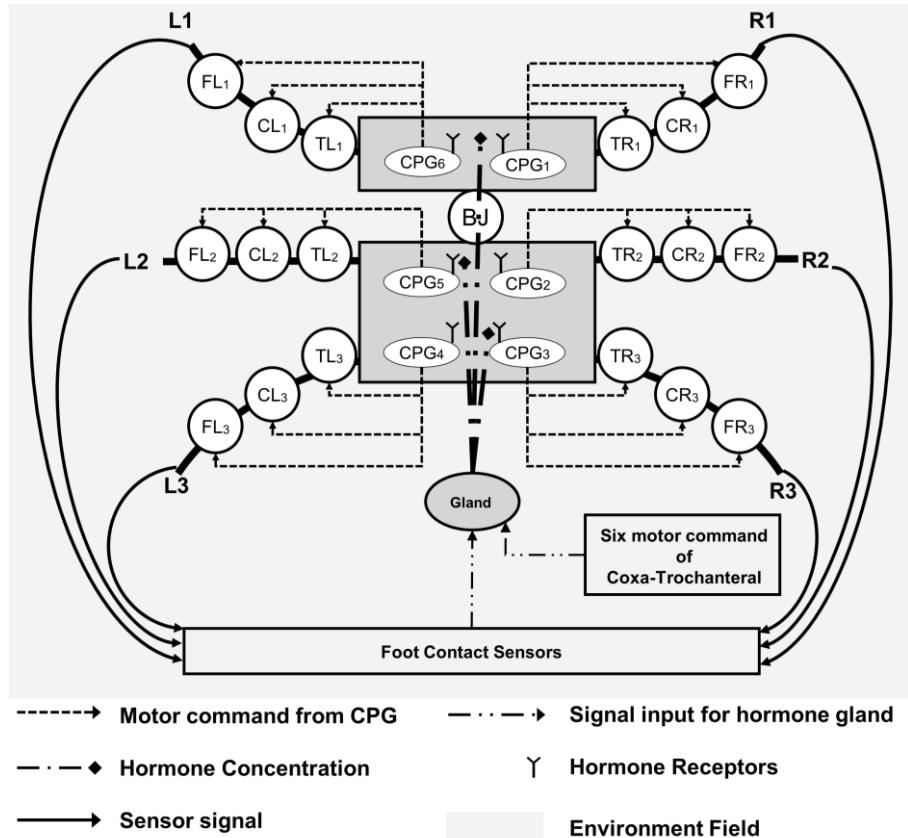
สามารถเปลี่ยนแปลงท่าทางการเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากมีการกำหนดท่าทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2) จึงควรปรับเปลี่ยนระบบควบคุมการเคลื่อนที่ใหม่ จากข้อจำกัดของระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบที่ใช้ CPG เพียง 1 ตัวในการกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ ส่งผลให้กลไกไอกอร์โนนเที่ยมไม่สามารถแสดงการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงภายใน จึงนำมาสู่แนวทางในการพัฒนาด้วยการนำระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบที่ใช้ CPG หลายตัว สำหรับกำหนดความสามารถในการสร้างท่าทางการเคลื่อนที่ได้

โดยการทดลองในหัวข้อดังไปตั้งสมมุติฐานว่า “ระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบ ใช้ CPG หลายตัวที่ทำงานร่วมกับกลไกไอกอร์โนนเที่ยมควรที่จะสร้างท่าทางการเคลื่อนที่ให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงภายใน”

3.5 การทดลองเปรียบเทียบระหว่างกลไกไอกอร์โนนแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุง

ในการทดลองนี้มีจุดประสงค์ในการพิจารณาอยู่ 2 ประเด็น ได้แก่ การตอบสนองของกลไกไอกอร์โนน เที่ยมต่อการเปลี่ยนแปลงภายในของระบบหุ่นยนต์ และการเปรียบเทียบกลไกไอกอร์โนนแบบดั้งเดิม และแบบปรับปรุง โดยมีการเปลี่ยนระบบควบคุมจากการเคลื่อนที่เดิมแบบ CPG เป็นจากข้อจำกัดในรูปแบบการเคลื่อนที่ เป็นระบบควบคุมจากการเคลื่อนที่เดิมแบบหลาย CPG มีลักษณะเป็นแบบแยก การควบคุมแต่ละขา ส่งผลให้การควบคุมการทำงานของแต่ขาเป็นอิสระจากกัน โดยทั่วไประบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบหลาย CPG สามารถสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่ได้จากการรับคำแนะนำเชอร์ โดยตรงเพื่อทำการปรับความถี่ภายใน CPG และปรับเฟสระหว่าง CPG ด้วยกัน [34]

วิธีการทดลองนี้จะกระทำภายในโปรแกรมจำลอง LPZrobots ด้วยหุ่นยนต์ 6 ขา โดยกำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปด้านหน้า เมื่อเวลาผ่าน 1.5 นาที (900 time steps) ทำการปิดการทำงานของมอเตอร์เพื่อพิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และในส่วนของการออกแบบระบบควบคุมการปรับตัว สำหรับหลาย CPG ได้ใช้แนวคิดและการตั้งค่าเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2 โดยมีส่วนที่ต่างไปจากเดิม คือจำนวนตัวรับชอร์โนนที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนของ CPG ดังรูปที่ 3.34 ซึ่งรายละเอียดการติดตั้งกลไกไอกอร์โนนเที่ยมอธิบายในหัวข้อ 3.5.1



รูปที่ 3.34 แผนผังแสดงระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว

การทดลองนี้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบการตอบสนองของกลไกชอร์โนนเทียมแบบดึงเดิมและแบบปรับปรุง ในการสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่ในสถานะปกติ และในขณะที่ได้รับความเสียหาย จึงแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบระหว่างที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปทางด้านหน้า และส่วนที่ 2 เพื่อทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภายในด้วยการปิดการทำงานของมอเตอร์ในขณะที่หุ่นยนต์กำลังเคลื่อนที่ โดยมีรายละเอียดการติดตั้งกลไกชอร์โนนเทียมดังนี้

3.5.1 การติดตั้งกลไกชอร์โนนเทียม

เนื่องด้วยการทดลองเป็นการเปรียบเทียบกลไกชอร์โนนเทียมแบบดึงเดิมและแบบปรับปรุง จึงแยกการตั้งค่าของห้องทั้ง 2 แบบออกจากกัน โดยใช้หลักการในการออกแบบและการปรับค่าในกลไกตามบทที่ 2 หัวข้อการออกแบบและตั้งการกลไกชอร์โนนเทียม ผลของการออกแบบดังนี้

- กลไกชอร์โนนเทียมแบบปรับปรุง มีจำนวนของต่อมชอร์โนน 1 ต่อม และตัวรับชอร์โนน 6 ตัว (ดังรูปที่ 3.34) โดยที่รูปแบบตั้งค่าเป็นเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2 ที่การรับสัญญาณกระตุ้น(SI) ค่าการสหสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์ปลายเท้ากับค่าคาดการณ์จากคำสั่งมอเตอร์ รูปแบบการทำงานภายในต่อม Signal preprocessing เป็นความเรียงเบนของค่าสหสัมพันธ์ทั้ง 6 ขาในช่วงเวลา 10 จังหวะ (step) และ Activation function เป็นแบบตัว

เอกสาร Control feature เป็นรูปแบบไม่ตอบสนอง ในส่วนของตัวรับสารโอมนิเทียมทั้ง 6 ตัว มีการเปลี่ยนรูปแบบของ Target action เป็นดังสมการที่ 3.12 Receptor feature เป็นแบบ โดยตรง และ Receptor function เป็นแบบเชิงเส้นดังสมการที่ 3.13 และการตั้งค่า α , β และ γ มีค่าเท่ากับ 0.219, 0.2185 และ 0.0005 ตามลำดับ จากการตั้งค่ากลไกนี้สามารถเขียนเป็นสมการที่ 3.14

$$MI = (0.17 \cdot \text{Receptor}(t)) + 0.02 \quad (3.12)$$

$$\text{Receptor}(t) = 200 \cdot \text{Binding}(t) \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} HC(t) = & 0.219 \cdot HG(t) + 0.2185 \cdot HC(t-1) \\ & - (\sum_{m=1}^6 0.005 \cdot \text{Binding}_m(t)) \end{aligned} \quad (3.14)$$

- กลไกสารโอมนิเทียมแบบดั้งเดิม รูปแบบภายในกลไกแบบดั้งเดิมใช้เหมือนกับแบบปรับปรุงทั้งหมด ส่วนของการตั้งค่า α และ β มีค่าเท่ากับ 0.219 และ 0.218 ตามลำดับ สาเหตุที่ค่า β ลดลงเป็นการคำนวณจากสมการที่ 3.14 โดยมีเงื่อนไขการทำงานของ $\text{Binding}_m(t)$ ที่ในแต่ละเวลา t จะทำงานทีละ 1 ตัว ดังนั้นสามารถเขียนสมการของกลไกสารโอมนิเทียมแบบดั้งเดิมได้ดังสมการที่ 3.15

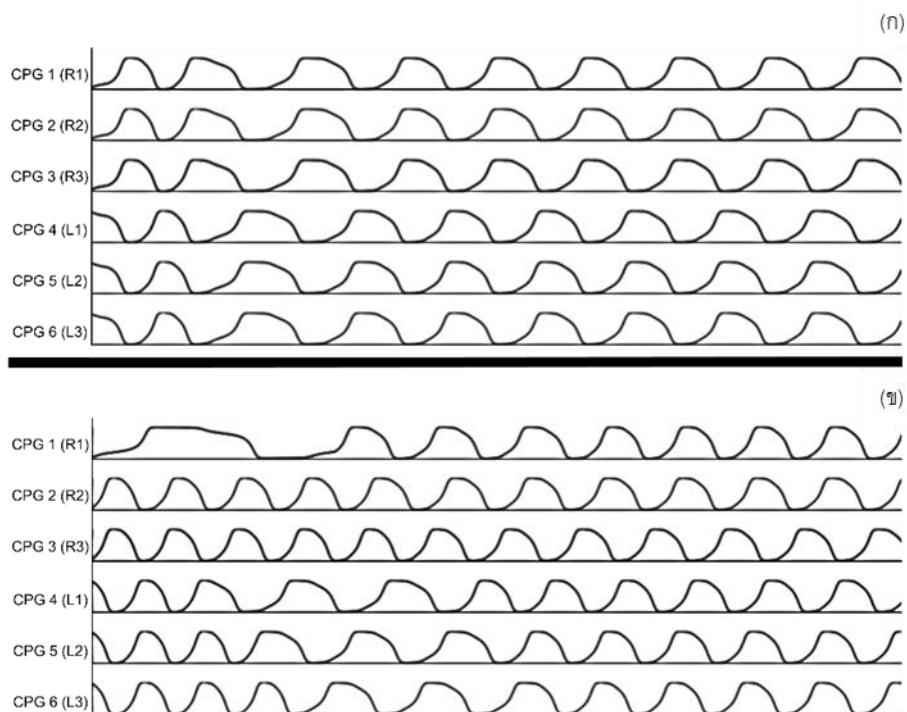
$$HC(t) = 0.219 \cdot HG(t) + 0.218 \cdot HC(t-1) \quad (3.15)$$

3.5.2 การทดลองประสิทธิภาพการเคลื่อนที่และการสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่

ขั้นตอนสำหรับการทดลองประสิทธิภาพการเคลื่อนที่และการสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่ กำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปด้านหน้าเป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อทำการวัดระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นถึงจุดปลาย และวัดระยะความสูงจากพื้นบืนถึงจุดกึ่งกลางลำตัวตามแนวตั้ง เพื่อนำมาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนสำหรับอัตราถึงการวัดการแก่วงตัวของหุ่นยนต์ โดยทำการทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง

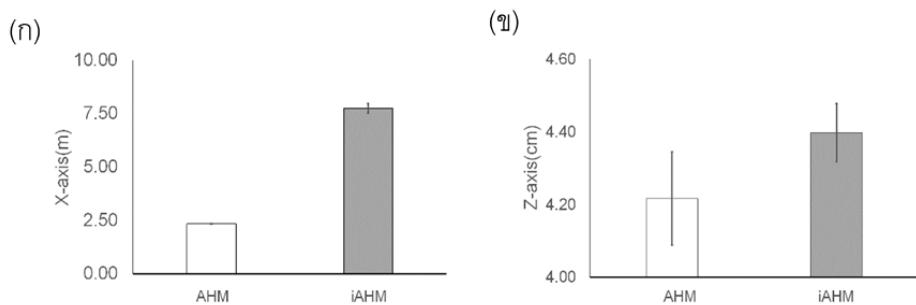
จากราฟที่แสดงในรูปที่ 3.35 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างกลไกแบบดั้งเดิมกับกลไกแบบปรับปรุงด้วยผลความถี่ของทั้ง 6 ขาที่แกน x เป็นเวลาและแกน y เป็นค่าสัญญาณจาก CPG แต่ละขาที่เรียงด้วยขาขวาด้านหน้า(R1), ขาขวาตรงกลาง(R2), ขาขวาด้านหลัง(R3), ขาซ้ายด้านหน้า(L1), ขาซ้ายตรงกลาง(L2) และขาซ้ายด้านหลัง(L3) โดยที่รูป 3.35 (ก) เป็นกลไกสารโอมนแบบดั้งเดิม พบว่ามีการเปลี่ยนความถี่แต่ไม่สามารถทำการปรับเฟส (Phase) ของแต่ละขาจึงมีขาข้างเดียวกันยกพร้อมกันและ

ปรับความเร็วในการยกตามการกระตุ้นของกลไกชอร์โนน จึงทำให้ลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เป็นคล้ายกับการว่าขึ้น ในส่วนของรูปที่ 3.35 (ข) จะมีการเปลี่ยนความถี่และเฟสตามการทำงานของ แต่ละตัวรับชอร์โนน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แต่ไม่สามารถเบริญเทียนรูปแบบการทำทางกับสิ่งมีชีวิต ซึ่งคล้ายกับรูปแบบ Inter mixed มีการเปลี่ยนแปลงลำดับการยกขาไปมาไม่แน่นอน



รูปที่ 3.35 กราฟแสดงความถี่ของการก้าวขาแต่ละขา โดย (ก)เป็นกลไกชอร์โนนแบบดั้งเดิม และ (ข)เป็นกลไกชอร์โนนแบบปรับปรุง ซึ่งมีลักษณะการเรียงดังนี้ ขาขวาด้านหน้า(R1), ขา ขวาตรงกลาง(R2), ขาขวาด้านหลัง(R3), ขาซ้ายด้านหน้า(L1), ขาซ้ายตรงกลาง(L2) และ ขาซ้ายด้านหลัง(L3)

เมื่อนำระบบการเคลื่อนที่ไปด้านหน้าของหุ่นยนต์ (แนวแกน x) และค่าเบี้ยงเบนของระดับความสูง ของลำตัวหุ่นยนต์ (แนวแกน z) มาพิจารณาพบว่ากลไกชอร์โนนเทียนรูปแบบปรับปรุงสามารถเคลื่อนที่ ได้ระยะ 7.5 เมตร ซึ่งมากกว่ากลไกชอร์โนนแบบดั้งเดิมที่สามารถเคลื่อนที่ได้ระยะเพียง 2.5 เมตร ส่วนค่าความเบี้ยงเบนที่แสดงถึงการการแกกว่างตัวของลำตัวหุ่นยนต์ พนกกว่ากลไกชอร์โนนแบบ ปรับปรุงมีค่าความเบี้ยงเบนที่น้อยกว่า (ดังที่แสดงในรูปที่ 3.36)



รูปที่ 3.36 แผนภูมิแท่งแสดงผลการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยที่ (ก)คือระยะทางตามแนวแกน X และ(ข)คือระยะทางตามแนวแกน Z ซึ่งกลไกออร์โนนแบบดั้งเดิม (AHM) และกลไกออร์โนนแบบปรับปรุง (iAHM)

ดังนั้นการทดลองนี้แสดงถึงความสามารถของกลไกออร์โนนที่ยอมแบบปรับปรุงที่แยกการทำงานของตัวรับสอร์โนน จึงทำให้การตอบสนองเป็นอิสระกว่ากลไกออร์โนนแบบดั้งเดิม ซึ่งหากต้องการออกแบบกลไกให้เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ด้วยกลไกแบบดั้งเดิม ควรทำการแยกเป็น 6 กลไก ซึ่งจะทำให้ระบบมีความซับซ้อนในการคำนวณเพิ่มขึ้น และอีกหนึ่งประเด็นคือ กลไกออร์โนนที่ยอมสามารถช่วยในการสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่ให้กับระบบควบคุมแบบหลาย CPG นำไปสู่การทดลองถัดไป

3.5.3 การทดลองการปรับตัวในกรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงภายใน

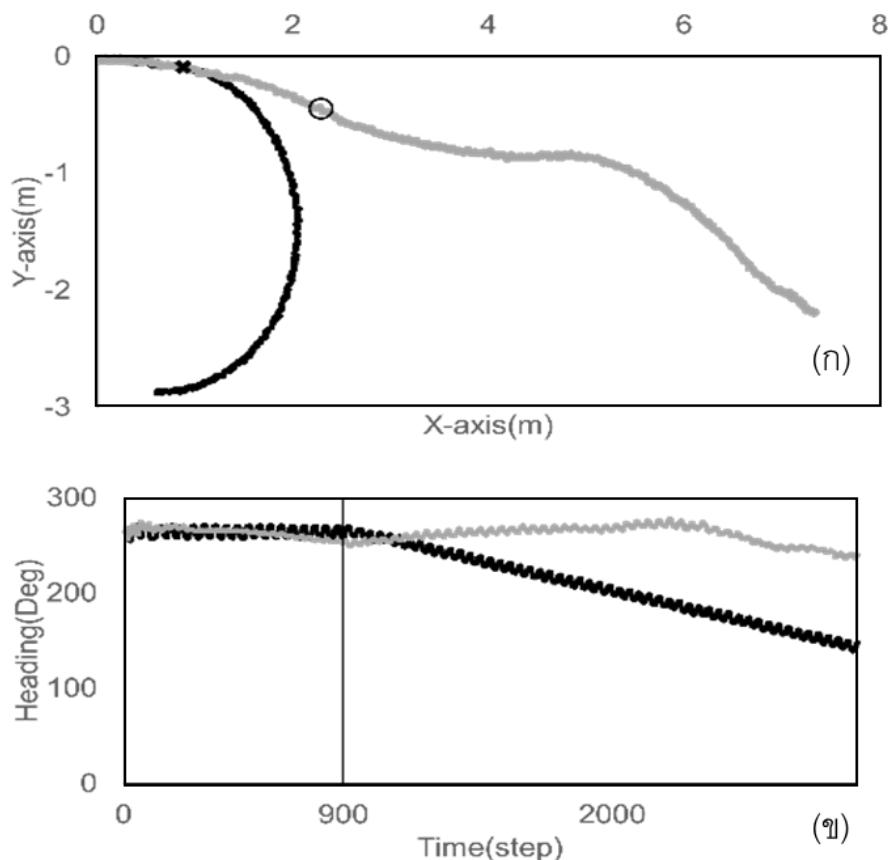
การเปลี่ยนแปลงภายในของหุ่นยนต์นั้นมีได้หลายความหมาย ซึ่งในการทดลองนี้สนใจในกรณีการเกิดความเสียหายกับหุ่นยนต์โดยไม่ทราบรูปแบบความเสีย ด้วยการจำลองในลักษณะของการปิดการทำงานของมอเตอร์ จากวิธีการจำลองนี้คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหุ่นยนต์ที่จำนวนขากองหุ่นยนต์ลดลงเมื่อมอเตอร์ไม่ทำงาน โดยกำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปด้านหน้าแบบปกติเป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที (900 steps) แล้วจึงทำการปิดการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งมีรูปแบบปิดการทำงานของมอเตอร์ 2 รูปแบบดังที่แสดงในรูปที่ 3.37 และเก็บข้อมูลเดือนทางการเคลื่อนที่และทิศทางของหุ่นยนต์ เพื่อพิจารณาความสามารถในการปรับตัว



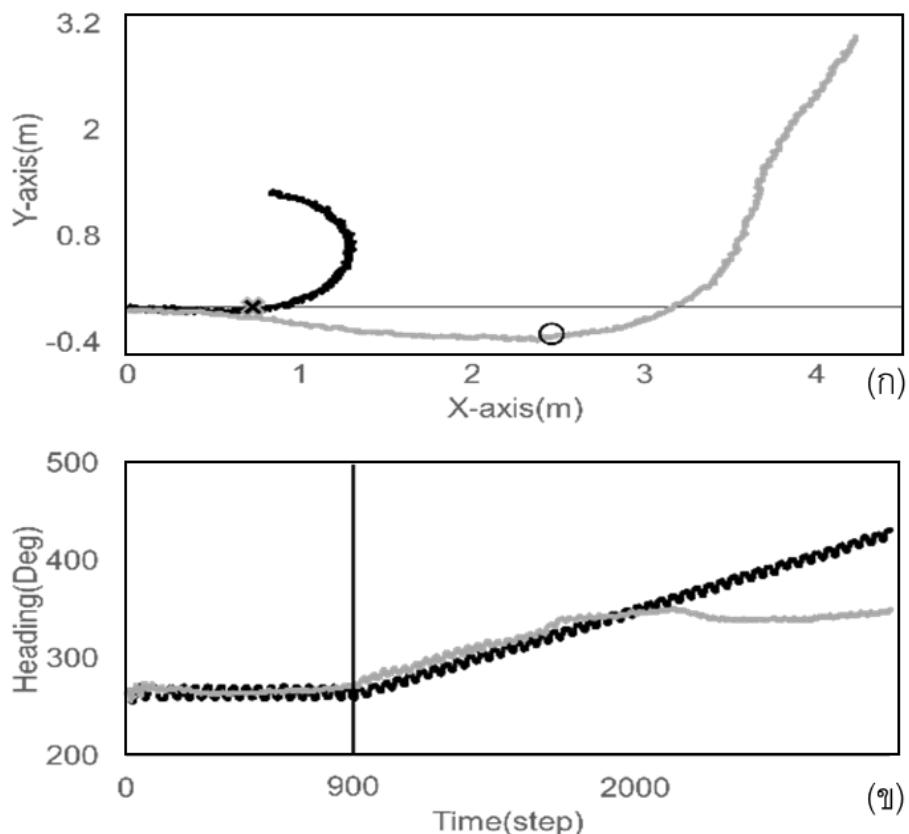
รูปที่ 3.37 แสดงตำแหน่งการปิดการทำงานของมอเตอร์

รูปที่ 3.38 และ 3.39 แสดงผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของกลไกชอร์โภนแบบดึงเดิมและแบบปรับปรุงที่ทำการปิดการทำงานของมอเตอร์ในรูปแบบ 3.37 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยเส้นกราฟสีดำเข้มเป็นผลจากกลไกแบบดึงเดิม ส่วนเส้นกราฟสีเทาเป็นผลจากกลไกชอร์โภนแบบปรับปรุง และจุดกาคนาทเป็นตำแหน่งที่เริ่มปิดการทำงานของมอเตอร์ในกลไกแบบดึงเดิมและจุดวงกลมเป็นจุดที่เริ่มปิดการทำงานของมอเตอร์ในกลไกแบบปรับปรุง

หากทำการพิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่และทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ กลไกชอร์โภนเทียบแบบดึงเดิมมีการตอบสนองคล้ายกับการทดลองที่ 3.4 นั้นคือการเคลื่อนที่ไป ซึ่งต่างจากกลไกชอร์โภนเทียบแบบปรับปรุงที่มีเส้นทางการเคลื่อนที่ใกล้เคียงเส้นตรง (ดังรูปที่ 3.33 (ก) และ 3.34(ก)) เนื่องจากกลไกชอร์โภนเทียบแบบปรับปรุงพยายามปรับความถี่และเฟสของแต่ละขา เพื่อให้เกิดความสมดุลของเซนเซอร์จากปลายเท้ากับพื้นผิว จึงทำให้เกิดการปรับรูปแบบการเคลื่อนที่ใหม่ให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงภายใน

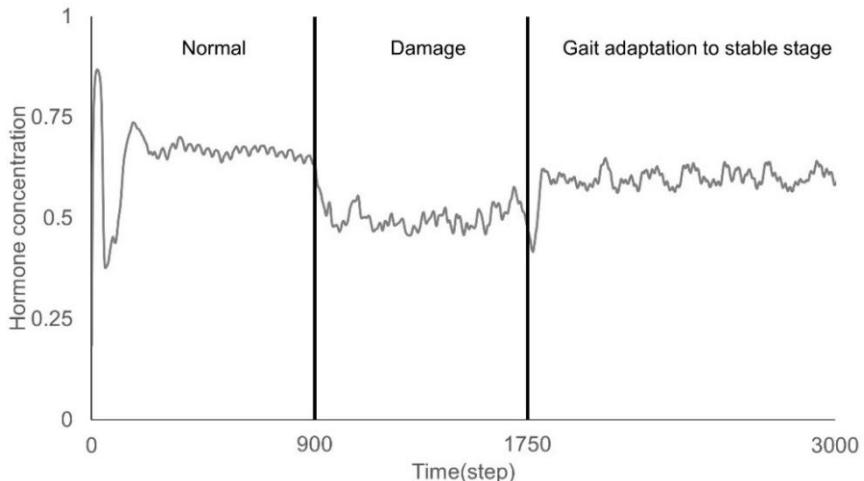


รูปที่ 3.38 แสดงจุดเสียหายและเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์รูปแบบ ก



รูปที่ 3.39 แสดงจุดเดียวและเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ รูปแบบ ข

เมื่อนำค่าความเข้มข้นของสารออร์โนนมาพิจารณาทำให้ทราบถึงประโยชน์ทางอ้อมของกลไกชอร์โนนจากการปรับจุดดูดภายใน ที่แสดงในค่าความเข้มข้นของสารออร์โนนสำหรับการคาดการณ์ของระดับความเสียหายภายใน และบอกถึงสถานการณ์การปรับตัวเมื่อเกิดความเสียหาย ดังรูปที่ 3.40 ที่แสดงค่าความเข้มข้นของสารออร์โนนขณะปกติมีค่าอยู่ช่วงประมาณ 0.7 - 0.73 ในขณะที่เมื่อเกิดความเสียและยังไม่สามารถปรับรูปแบบการเคลื่อนที่ให้เหมาะสมได้ ค่าความเข้มข้นของสารออร์โนนมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 - 0.6 และขณะที่เกิดความเสียหายและสามารถปรับท่าทางการเคลื่อนไหวให้เหมาะสมได้ ค่าความเข้มข้นของสารออร์โนนอยู่ในช่วง 0.64 - 0.7 หากสังเกตจากค่าการลู้เข้าจุดสมดุลของแต่ละสถานการณ์นั้น หากมีความเสียหายเกิดขึ้นค่าความเข้มข้นจะมีค่าน้อยกว่าปกติ และในกรณีที่สามารถปรับท่าทางการเคลื่อนที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีรูปแบบการแกว่งของความเข้มข้นมากกว่าแบบปกติ



รูปที่ 3.40 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของฮอร์โมนที่สภาวะปกติ, เสียหาย และเมื่อปรับตัว

ดังนั้นการทดลองนี้แสดงถึงความสามารถในการตอบสนองของกลไกฮอร์โมนเทียมแบบปรับปรุงที่สามารถสร้างและปรับเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ในสถานะปกติ และรับความเสียหายได้ ซึ่งการปรับตัวในกรณีที่ได้รับความเสียหายนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของเวลาในการปรับตัวของหุ่นยนต์ที่ไม่มีความแน่นอน หากมีจำนวนกลไกฮอร์โมนที่มากกว่า 1 กลไก หรือมีรูปแบบเป็นโครงข่ายฮอร์โมนเทียม มีโอกาสที่ช่วยในการปรับกลไกให้กลับเข้าสู่สมดุลของการทำงานได้เร็วขึ้น

3.6 สรุปผลการทดลองและแนวทางพัฒนา

การทดลองภายใต้บทที่ 3 นี้ แสดงให้เห็นถึงการนำกลไกฮอร์โมนเทียมมาใช้งานกับหุ่นยนต์ที่มีความซับซ้อนในรูปแบบขา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถแสดงผลการปรับเปลี่ยนการทำงานให้เหมาะสมกับสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนจากภายนอก (การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิว) และการเปลี่ยนแปลงจากภายใน (การเสียหายของมอเตอร์) และทราบถึงข้อจำกัดในการนำกลไกฮอร์โมนเทียมมาใช้กับหุ่นยนต์ลักษณะการเคลื่อนที่แบบขา เพื่อนำไปสู่การพัฒนากลไกฮอร์โมนเป็นโครงข่ายฮอร์โมน เพื่อเพิ่มความสามารถในการตอบสนองที่มีความหลากหลาย

ดังนั้นบทต่อไปจึงเป็นการนำเสนอการนำกลไกฮอร์โมนเทียมมาเชื่อมต่อเป็นโครงข่าย ด้วยการนำไปใช้งานกับหุ่นยนต์ 4 ขา ซึ่งโจทย์ที่มีความซับซ้อน เนื่องจากระบบควบคุมจะต้องควบคุมการเคลื่อนที่พร้อมกับรักษาสมดุลของลำตัวระหว่างการเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน

บทที่ 4 การสร้างโครงข่ายฮอร์โมนเทียม

โครงข่ายฮอร์โมนเทียมเป็นระบบที่มีความซับซ้อน เนื่องจากจำนวนของกลไกฮอร์โมนเทียมที่ทำงานร่วมกันมีมากกว่าหนึ่งกลไก โดยที่แต่ละกลไกสามารถปรับจุดสมดุลภายในของแต่ละกลไกได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ยากต่อการคาดการณ์ เพื่อตั้งค่าและปรับแต่งกลไก ถึงแม้ว่าการออกแบบและกำหนดค่าแต่ละกลไกภายในโครงข่ายฮอร์โมนเป็นเรื่องยากและซับซ้อน แต่โครงข่ายฮอร์โมนมีประโยชน์อย่างสูงสำหรับช่วยการทำงานในด้านการปรับตัวให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมทั้งภายในและภายนอก

จากการทดลองที่ผ่านมาในบทที่ 3 ที่ใช้กลไกฮอร์โมนเพียงกลไกเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดในการปรับการทำงานของหุ่นยนต์ หากมีการเพิ่มจำนวนกลไกฮอร์โมนเทียมให้มากขึ้น สามารถเพิ่มการตอบสนองได้หลากหลายรูปแบบ เช่นงานวิจัยของเจตనันท์และคณะ [เล่มจบเบริด] ได้ทำการออกแบบระบบการปรับยืดหยุ่น หรือ heckle ค่าของกลไกฮอร์โมนเทียมจำนวน 6 กลไก โดยกลไกฮอร์โมนทั้ง 6 กลไกไม่มีการเชื่อมกันระหว่างกลไก จึงไม่เป็นการทำงานแบบโครงข่ายฮอร์โมนเทียม และกลไกฮอร์โมนที่ออกแบบนี้เป็นระบบกลไกแบบไม่มีศูนย์กลาง (distributed system) ซึ่งช่วยให้ลดความซับซ้อนในการออกแบบ ซึ่งผลการใช้งานกลไกฮอร์โมนดังกล่าว สามารถลดพลังงานในการเคลื่อนที่เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นผิวรูปแบบต่าง ๆ ได้อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบกับการใช้กลไกฮอร์โมนเดียวความสามารถที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนกลไกเดียวเป็น 6 กลไก มีเพียงรูปแบบเดียวคือพื้นผิวชุ่มชื้น

ซึ่งในสิ่งมีชีวิตการทำงานร่วมกันของสารฮอร์โมนเป็นโครงข่ายเพื่อเสริมการกระตุ้นและรักษาสมดุลของระบบภายในร่างกาย เช่นงานวิจัยของ Haidar [35] ทำการเปรียบเทียบผลการควบคุมสารอินซูลินด้วยตัวอ่อนเทียนระหว่างสารฮอร์โมนเดียว (ฮอร์โมนอินซูลิน) และสารฮอร์โมนคู่ (ฮอร์โมนอินซูลินและฮอร์โมนกลูคากอน) ผลของการทดลองนี้พบว่าการทำงานของฮอร์โมนคู่ปริมาณของฮอร์โมนอินซูลินแบบคู่ มีค่าน้อยกว่าเดือน้อย (ไม่ต่างกันในเชิงสถิติ) แต่สามารถรักษาความสมดุลของปริมาณฮอร์โมนอินซูลินได้ดีกว่าในกรณีที่ผู้ป่วยรับประทานอาหาร

ดังนั้นบทที่ 4 จึงนำแนวคิดการมีหลายฮอร์โมนมาช่วยในการปรับระบบที่มีความซับซ้อนสูง เช่น หุ่นยนต์ 4 ขา เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่ไม่มีกลไกฮอร์โมนเทียม (No hormone), ระบบควบคุมที่มีกลไกฮอร์โมนเทียมมากกว่าหนึ่งกลไก (Multiple hormone), ระบบควบคุมที่มีโครงข่ายฮอร์โมนเทียม (Hormone network) เพื่อเปรียบเทียบความสามารถของกลไกฮอร์โมนและโครงข่ายฮอร์โมน รวมถึงเปรียบเทียบรูปแบบการเชื่อมต่อ โครงข่ายฮอร์โมน

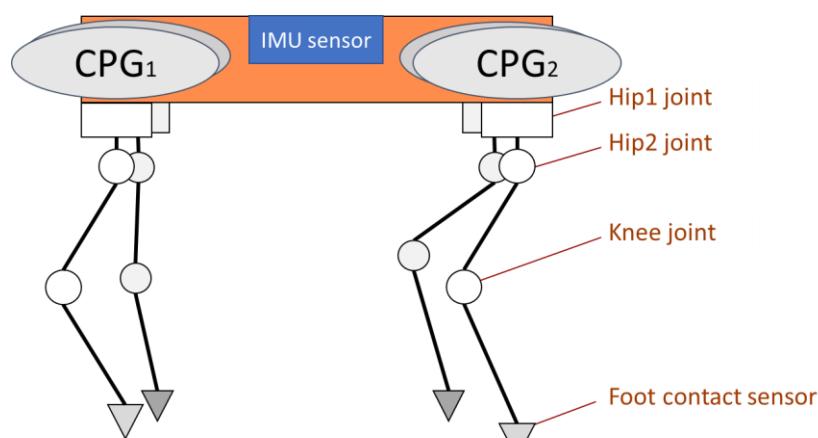
โดยที่แนวคิดการออกแบบโครงข่ายหอร์โมนเทียมให้เป็นแบบแยกประจำแต่ละขาไม่มีการรวมศูนย์กลางสำหรับการควบคุม ผลดีของระบบควบคุมแบบนี้ คือ สามารถนำไปใช้กับหุ่นยนต์ที่มีจำนวนขาที่มากกว่า 4 ขาขึ้นไปได้ ซึ่งโครงข่ายหอร์โมนเทียมต้องทำงานร่วมกับระบบควบคุมที่สร้างรูปแบบการเคลื่อนที่ด้วย CPG รายละเอียดของระบบควบคุมและขั้นตอนในการทดลองแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อดังนี้

4.1 ระบบการทำงานของหุ่นยนต์

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงรายละเอียดการทำงานของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นการทดลองในโปรแกรมจำลองของ V-rep ที่รับคำสั่งการทำงานจาก Robot Operating System (ROS) โดยส่วนแรกเป็นการอธิบายลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์ที่มี 4 ขาและชนิดของเซนเซอร์ ในส่วนต่อมาคือระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ใช้ CPG ในกระบวนการจังหวะการเคลื่อนที่

4.1.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์ 4 ขา

หุ่นยนต์ 4 ขา แต่ละขา มี 3 ข้อต่อ (ดังแสดงในรูปที่ 4.1) โดยที่ข้อต่อ Hip1 เป็นข้อต่อสำหรับการข้ามอกค้านข้างลำตัว ข้อต่อ Hip2 และ Knee มีลักษณะการเคลื่อนที่ไปด้านหน้าหรือด้านหลังของตัวหุ่นยนต์ สำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ 4 ขา นั้น 2 ข้อต่อนี้เป็นส่วนสำคัญในการเคลื่อนที่ เพราะมีผลต่อการรักษาสมดุลของลำตัวด้วยการยืดหรือหดขาเพื่อสัมผัสพื้น ระบบเซนเซอร์ภายในหุ่นยนต์ 4 ขา ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดการสัมผัสที่บริเวณปลายเท้า และเซนเซอร์วัดความเร็ว (Inertial measurement unit: IMU) เพื่อใช้สำหรับการวัดมุมเอียงของลำตัวหุ่นยนต์



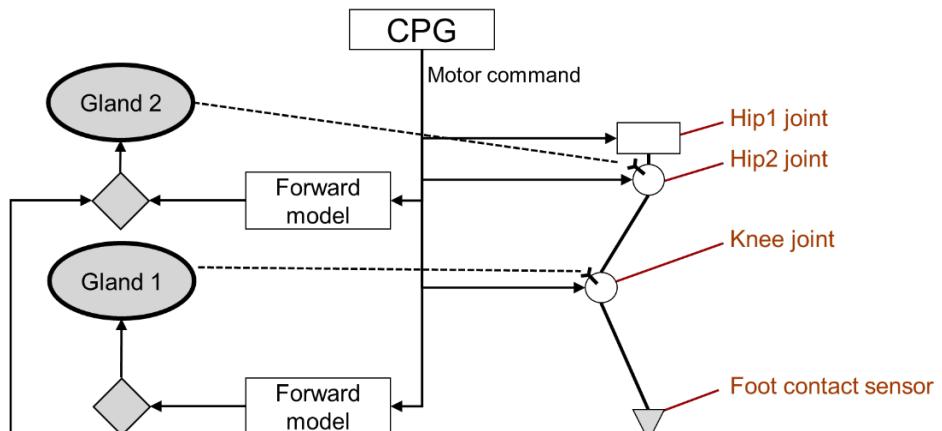
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์ 4 ขา

4.1.2 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คือ CPG-based ที่มีรูปแบบการทำงานเช่นเดียวกับการทดลองในบทที่ 3 ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าภายในระบบให้เหมาะสมกับรูปแบบขาของหุ่นยนต์ โดยให้มี CPG ประจำแต่ละขา เพื่อให้แต่ละขามีการควบคุมที่อิสระต่อ กัน รวมถึงการกำหนดค่าการเฟสระหว่างขา ทั้ง 4 เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่แบบ Trot ซึ่งเป็นลักษณะการเคลื่อนที่แบบยก 2 ขาพร้อมกันในแนวทแยง และค่า MI เท่ากับ 0.3 จากการปรับเปลี่ยนภายใน CPG ทำให้ค่า Motor neuron (MN) สามารถปรับจุดกึ่งกลางของแต่ละข้อต่อได้

4.2 การออกแบบควบคุมแบบโครงข่ายซอฟต์โน้ตเทียม

การออกแบบระบบควบคุมแบบโครงข่ายซอฟต์โน้ตเทียมเป็นไปตามกระบวนการออกแบบที่กล่าวไว้ภายในบทที่ 2 ดังนี้ กำหนดให้จำนวนกลไกซอฟต์โน้ตเทียม 2 กลไก โดยที่กลไกซอฟต์โน้ตเทียมที่ 1 มีตัวรับซอฟต์โน้ตเทียมที่ข้อต่อ Knee กลไกที่ 2 มีตัวรับซอฟต์โน้ตเทียมที่ข้อต่อ Hip2 ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงระบบควบคุมแบบกลไกซอฟต์โน้ตเทียมคู่

ชั้งการตั้งค่าภายในต่อมซอฟต์โน้ตของทั้ง 2 กลไก ในส่วนของ Signal preprocessing ถูกกำหนดเป็นรูปแบบค่าเฉลี่ย ที่มี Buffer size ขนาด 50 จังหวะ (Time step) และรูปแบบของ Activation function เป็นรูปแบบตัวอ่อน ส่วนการตั้งค่าของตัวรับซอฟต์โน้ต กำหนดให้ Target action เป็นการขยายและลดทอนด้วยการคูณกับค่า MN ดังสมการที่ 4.1 เพื่อทำให้เกิดการยืดและหดขาของหุ่นยนต์ Receptor feature เป็นรูปแบบโดยตรง และ Receptor function เป็นรูปแบบแบบเชิงเส้นดังสมการที่ 4.2 และการตั้งค่า α , β และ γ ของทั้งสองกลไกมีค่าเท่ากับ 0.5, 0.5 และ 0.05 ตามลำดับ การตั้งค่ากลไกนี้แสดงดังสมการที่ 4.3

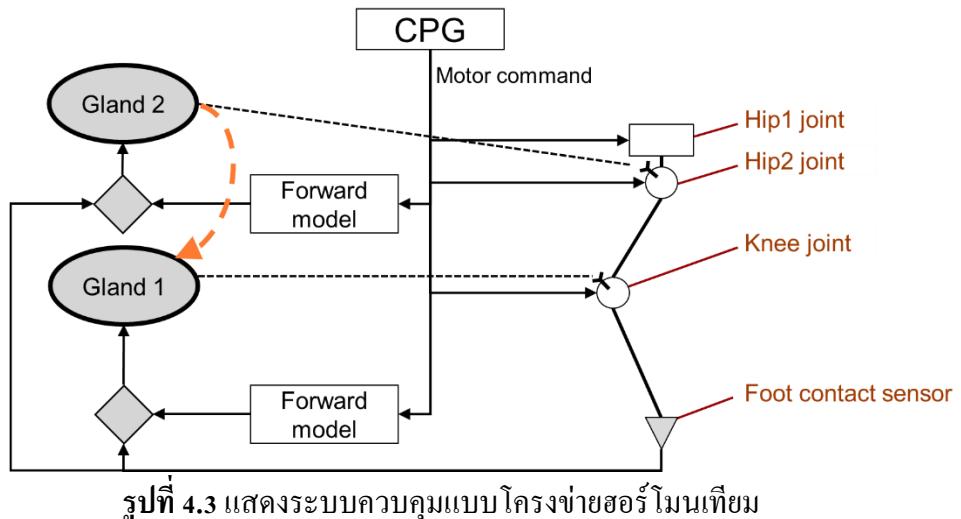
$$MN_i(t) = \text{Receptor}_i(t) + MN_i(t - 1) \quad (4.1)$$

$$\text{Receptor}_i(t) = (0.05 \cdot \text{Binding}_i(t)) + 0.995 \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \text{HC}_i(t) = & 0.5 \cdot \text{HG}_i(t) + 0.5 \cdot \text{HC}_i(t-1) \\ & - 0.05 \cdot \text{Binding}_i(t) \end{aligned} \quad (4.3)$$

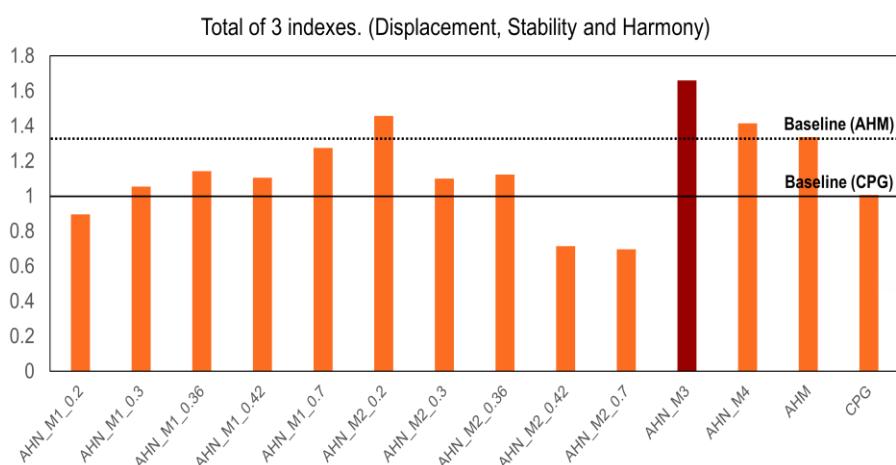
โดยที่ i คือตำแหน่งของกลไกฮอร์โมนที่ยึดซึ่งตำแหน่งที่ 1 คือตำแหน่งข้อต่อ Knee และตำแหน่งที่ 2 คือข้อต่อ Hip2 ซึ่งการทำงานของกลไกของทั้ง 2 ไม่มีการเชื่อมต่อระบบของต่อมเข้าด้วยกัน ซึ่งแสดงถึงระบบควบคุมแบบ Multiple hormone

ในส่วนของ Hormone network นี้ การเชื่อมต่อต่อมฮอร์โมนที่ 2 เข้ากับต่อมฮอร์โมนที่ 1 ผ่านทาง Control feature ของต่อมฮอร์โมนที่ 1 (ดังรูปที่ 4.3) ซึ่งรูปแบบของ Control feature ทั้ง 4 รูปแบบจะทำการเทียบการทำงาน เพื่อแสดงถึงผลการเลือกรูปแบบและตั้งค่าที่แบบต่าง ๆ โดยมีการทดลองที่เป็น Hormone network ทั้งหมด 12 แบบ ซึ่งรูปแบบการยับยั้งและการกระตุ้นทำการตั้งค่าจากช่วงความเข้มข้นของสารฮอร์โมนที่ 2 ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ช่วง คือ ช่วงที่ไม่ทำงาน, ช่วงของการทำงานที่น้อยที่สุด, ช่วงกึ่งกลางของการทำงาน, ช่วงของการทำงานที่มากที่สุด, ช่วงที่มากกว่าการทำงานสามารถกำหนดค่าเป็น 0.2, 0.3, 0.36, 0.42 และ 0.7 ตามลำดับ ยังมีอีก 2 รูปแบบคือ positive feedback และ negative feedback



4.3 การทดลองเปรียบเทียบระบบควบคุมทั้ง 3 รูปแบบ

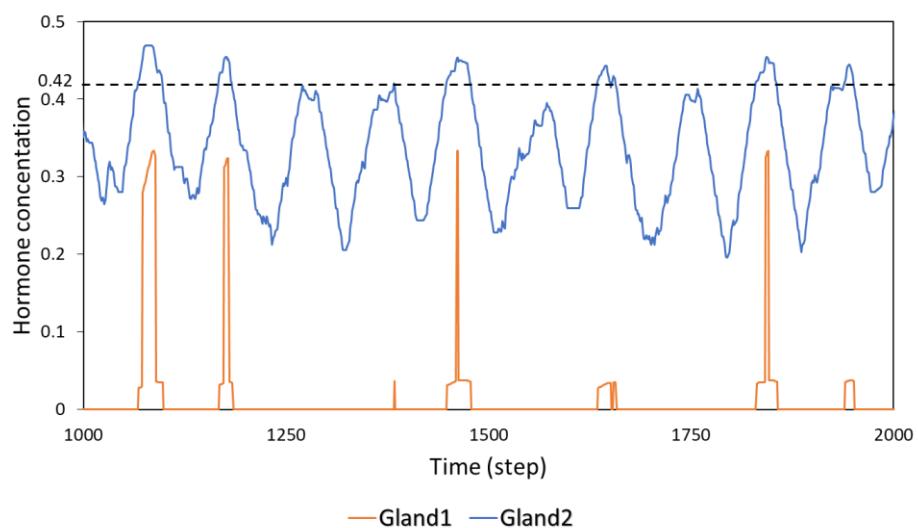
กระบวนการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบระบบควบคุมไม่มีซอฟต์แวร์โภน, ระบบควบคุมกลไกซอฟต์แวร์โภนเทียมคู่ และระบบโครงข่ายซอฟต์แวร์โภน โดยการทดลองนี้เป็นการจำลองด้วยโปรแกรมจำลอง V-rep ซึ่งกำหนดให้หุ่นยนต์ 4 ขาเคลื่อนที่เป็นสิ่นตรงระยะทาง 5 เมตร และการวัดประสิทธิภาพใช้ตัวชี้วัด 3 ตัว ได้แก่ Stability, Harmony และ Displacement ซึ่งเป็นวิธีการทดลองเดียวที่มีผลลัพธ์ที่สุดตามหลักการของ André [36] ที่นำผลรวมของตัวชี้วัดทั้ง 3 ตัวมาเป็นค่าคะแนนให้กับระบบการเดินขึ้นเนินของหุ่นยนต์ 2 ขา ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้กับการวัดประเมินในการทดลองนี้



รูปที่ 4.4 แผนภูมิแท่งแสดงผลรวมการวัดประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ โดยที่เส้นปะ กือ เส้นมาตรฐานในการเปรียบเทียบทะรังบบที่มีกลไกซอฟต์แวร์โภน และเส้นทึบ กือ เส้นมาตรฐานในการเปรียบเทียบทะรังบที่ไม่มีกลไกซอฟต์แวร์โภน

จากรูปที่ 4.4 ค่าของระบบควบคุมกลไกซอฟต์แวร์โภนเทียมคู่ถูกกำหนดเป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบทะรังบที่มีกลไกซอฟต์แวร์โภน (Baseline AHM) และระบบควบคุมที่ไม่มีกลไกซอฟต์แวร์โภนกำหนดเป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบทะรังบที่ไม่มีกลไกซอฟต์แวร์โภน (Baseline CPG) จากเส้นมาตรฐานทั้ง 2 แสดงถึงระบบควบคุมกลไกซอฟต์แวร์โภนเทียมคู่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเคลื่อนที่ให้สูงขึ้นได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบโครงข่ายซอฟต์แวร์โภนเทียมกับระบบควบคุมกลไกซอฟต์แวร์โภนเทียมคู่ พบว่ามีเพียง 3 รูปแบบของโครงข่ายซอฟต์แวร์โภนเทียมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าระบบควบคุมกลไกซอฟต์แวร์โภนเทียมคู่ ได้แก่ รูปแบบการกระตุ้นที่มากกว่า 0.2 (AHN_M2_0.2), แบบ positive feedback (AHN_M3) และแบบ negative feedback (AHN_M4) โดยที่ค่าสูงสุดคือ AHN_M3 ซึ่งสอดคล้องตามหลักการออกแบบ โครงข่ายซอฟต์แวร์โภนเทียมที่กล่าวไว้ภายใต้บทที่ 2 ที่ให้พิจารณาตามเงื่อนไขจากความสัมพันธ์ของแต่ละกลไกเป็นขั้นๆ

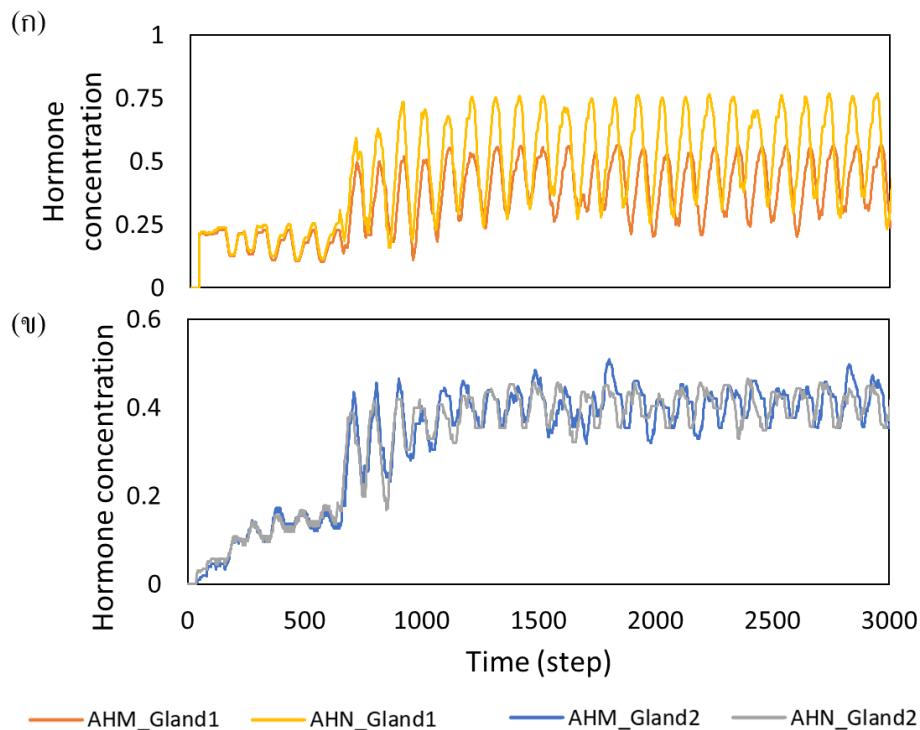
เมื่อพิจารณาผลที่มีค่าต่ำกว่า Baseline CPG ซึ่งหมายถึงบางรูปแบบของระบบ โครงข่ายชอร์โนน มีประสิทธิภาพดีอยกว่าระบบพื้นฐาน พบว่ามี 3 รูปแบบได้แก่ รูปแบบการขับยั้งที่มากกว่า 0.2 (AHN_M1_0.2) และรูปแบบการกระตุ้นที่มากกว่า 0.42 (AHN_M2_0.42) และ 0.7 (AHN_M2_0.7) ดังแสดงรูปที่ 4.4 โดยที่สาเหตุช่วงการทำงานของความเข้มข้นของกลไกชอร์โนนที่ 2 ไม่อยู่ในช่วงการทำงานตามเงื่อนไขของ Control feature ส่งผลให้กลไกชอร์โนนที่ 1 ถูกขับยั้งการหลัง จึงมีความเข้มข้นของสารกลไกชอร์โนนที่ 1 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (ดังรูปที่ 4.5) เมื่อค่าความเข้มข้นต่ำทำให้เกิดการปัดข้อต่อ Knee ตลอดเวลาเป็นผลให้ช่วงการยกและก้าวเท้าสั้นลง ส่งผลเสียให้เท้าของหุ่นยนต์ติดพื้น และเกิดการแกว่งตัวอยู่กับที่ ซึ่ง AHN_M1_0.2 และ AHN_M2_0.7 มีลักษณะคล้ายกัน เพราะเป็นช่วงที่ไม่ในขอบเขตของค่าความเข้มข้นของกลไกชอร์โนนที่ 2 ทั้งคู่ ในส่วนของ AHN_M2_0.42 เป็นช่วงที่ค่าความเข้มข้นของกลไกชอร์โนนที่ 2 ทำงานแต่มีผลคล้ายคลึงกับ AHN_M2_0.7 นั้นเกิดจากกลไกชอร์โนนที่ 2 มีหลังสารชอร์โนนลดลงทำให้ช่วงการทำลดต่ำกว่าระบบควบคุมกลไกชอร์โนนเที่ยมคู่ ดังนั้นกลไกชอร์โนนที่ 1 จึงสามารถหลังสารชอร์โนนได้เพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.5 ที่ค่าความเข้มข้นของกลไกที่ 2 (เส้นสีน้ำเงิน) ที่มากกว่าบริเวณเส้นประนั้นจะทำให้เกิดการหลังสารชอร์โนนของกลไกที่ 1 (เส้นสีส้ม)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของกลไกชอร์โนนที่ 1 (เส้นสีส้ม) และกลไกชอร์โนนที่ 2 (เส้นสีน้ำเงิน) โดยเส้นประแสดงถึงจุดที่กลไกชอร์โนนที่ 2 สามารถกระตุ้นการทำงานของกลไกชอร์โนนที่ 1

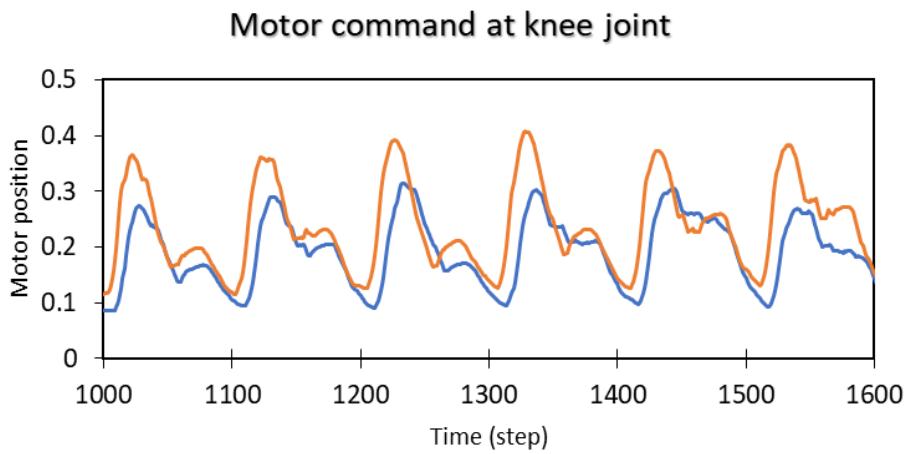
หากพิจารณาด้วยการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มข้นของสารชอร์โนนแต่ละต่อมของระบบควบคุมกลไกชอร์โนนเที่ยมคู่กับระบบโครงข่ายชอร์โนนในรูปแบบ Positive feedback ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ว่าค่าความเข้มข้นของกลไกชอร์โนนที่ 1 มีการตอบสนองที่มากขึ้นเมื่อได้รับการกระตุ้นจาก

ความเข้มข้นของกลไกที่ 2 ซึ่งเป็นไปดังตามรูปแบบของ Positive feedback ในส่วนของค่าความเข้มข้นของกลไกฮอร์โมนที่ 2 มีการตอบสนองที่ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับระบบควบคุมกลไกฮอร์โมนที่ยิ่งคู่ จากค่าความเข้มข้นของสารฮอร์โมนกลไกที่ 1 มีการแกว่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยจุดสมดุลมีค่าสูงกว่าระบบควบคุมกลไกฮอร์โมนเทียมคู่



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของกลไกฮอร์โมนที่ 1 (เส้นสีส้ม) และกลไกฮอร์โมนที่ 2 (เส้นสีน้ำเงิน) โดยเส้นประแสดงถึงจุดที่กลไกฮอร์โมนที่ 2 สามารถกระตุ้นการทำงานของกลไกฮอร์โมนที่ 1

เมื่อเปรียบเทียบค่าสั่งควบคุมมอเตอร์ด้วยระบบควบคุมกลไกฮอร์โมนเทียมคู่กับระบบโกรงข่ายฮอร์โมนที่แสดงรูปที่ 4.7 เป็นผล ณ ข้อต่อ Knee โดยที่ทั้ง 2 ระบบมีข้อแตกต่าง 3 ประเด็น ได้แก่ ประเด็นที่ 1 ขนาดของสัญญาณกว้างขึ้นส่งผลต่อจังหวะในการยืดและหดของแต่ละขาที่เพิ่มขึ้น, ประเด็นที่ 2 การเฟสของสัญญาณส่งผลต่อการปรับความสัมพันธ์ระหว่างขาด้วยกัน และประเด็นสุดท้ายการเลื่อนขึ้นของสัญญาณทำให้ข้อต่อ Knee จากความต่างทั้ง 3 ประเด็นนี้เป็นเหตุให้จังหวะการก้าวเท้าของหุ่นยนต์มีการปรับยืดหดมากกว่าระบบควบคุมกลไกฮอร์โมนเทียมคู่ และมีผลโดยอ้อมที่ทำให้ปลายเท้าของหุ่นยนต์สามารถปรับการยืดและหดให้เหมาะสมกับการสัมผัสกับพื้นได้รวดเร็วและไวหลีก ดังนั้นระบบโกรงข่ายฮอร์โมนจึงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นกว่าระบบควบคุมกลไกฮอร์โมนเทียมคู่



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมกลไกออร์โนนเที่ยมคู่ (เส้นสีน้ำเงิน) กับระบบ
โกรงข่ายออร์โนน (เส้นสีส้ม) ด้วยชุดคำสั่งมอเตอร์ที่ข้อต่อ Knee

อย่างไรก็ตามการออกแบบโกรงข่ายออร์โนนตามขั้นตอนในบทที่ 2 เป็นส่วนสำคัญอย่างมากต่อ
ความสามารถในการทำงานของหุ่นยนต์ การตั้งค่าระบบที่เหมาะสมสามารถลดโอกาสผิดพลาดที่มีผล
ต่อประสิทธิภาพของโกรงข่ายออร์โนน แต่ในทางกลับกัน สามารถทำให้ผลการทำงานแย่ลงมาก หาก
ตั้งค่าไม่เหมาะสม จึงเป็นสาเหตุหลักส่วนหนึ่งของความแปรปรวนที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้อย่าง
ระบบเชิงเส้น เป็นผลให้การใช้วิธีการตั้งค่ากลไกออร์โนนแบบบลองผิดลองถูกใช้เวลาในการทดลอง
นาน

4.4 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองนี้สามารถแบ่งออกเป็นส่วนของผลโดยตรงและผลทางอ้อม กล่าวคือผลโดยตรง
สามารถทราบถึงประสิทธิภาพของระบบโกรงข่ายออร์โนนเที่ยมรูปแบบ Positive feedback ที่
นำมาใช้กับหุ่นยนต์ 4 ขา ส่วนผลให้หุ่นยนต์สามารถปรับยืดหรือหดขาและทำให้จังหวะการก้าว
เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ และในส่วนของผลทางอ้อมหากไม่มีหลักการออกแบบโกรงข่ายออร์โนน
เที่ยม จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบในกรณีที่ lever ร้ายที่สุดคือทำให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบที่
ไม่มีกลไกออร์โนน และอีกหนึ่งประโยชน์ที่เกิดจากผลทางอ้อม คือ ระบบโกรงข่ายออร์โนนเที่ยมที่
ผลต่อการปรับชุดสมดุลของแต่ละกลไก ซึ่งนำมาสู่การเลือกใช้งานระบบโกรงข่ายออร์โนนควรมี
เงื่อนไขที่มีความเฉพาะเจาะจงกับปัญหาที่ระบบควบคุมกลไกออร์โนนเที่ยมคู่ไม่สามารถทำได้

บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของหุ่นยนต์อัตโนมัติโดยใช้โครงข่ายสร้อยโนนเทียมมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนานวัตกรรม 4 หัวข้อซึ่งสอดคล้องไปกับการศึกษาและทดลองในแต่ละหัวข้อนี้

1. จากวัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อปรับปรุงกลไกของรูปแบบการตอบสนองความเข้มข้นของชอร์ตโนม เนื่องจากจำนวนตัวรับชอร์ตโนมเปลี่ยนแปลง สอดคล้องกับบทที่ 2 ที่ทำการศึกษาพัฒนาการของกลไกของรูปแบบการตอบสนองจากอคิตสุปัจจุบันเพื่อให้มีความเข้าใจถึงลักษณะการทำงานและข้อจำกัด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปัญหาของโครงสร้างภายในต่อมชอร์ตโนมที่ไม่สามารถตอบสนองเมื่อจำนวนตัวรับชอร์ตโนมเปลี่ยนแปลง ในหัวข้อที่ 2.4 การปรับปรุงกลไกของรูปแบบการตอบสนองให้ดีขึ้นโดยการปรับปรุงกลไกของรูปแบบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวรับชอร์ตโนม และสามารถเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อได้รับความเสียหายได้ดีขึ้น
 2. จากวัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อศึกษาการนำกลไกของรูปแบบการตอบสนองมาใช้สำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบขา ในการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายในและภายนอก ฉุกเฉินของภัยในบทที่ 3 ที่แสดงถึงผลกระทบของการนำกลไกของรูปแบบการตอบสนองมาใช้งานร่วมกับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ สำหรับหุ่นยนต์ 6 ขา โดยที่หัวข้อที่ 3.2 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว เป็นการอธิบายถึงหลักการและแนวคิดในการออกแบบเพื่อนำกลไกของรูปแบบการตอบสนองมาใช้งาน และในหัวข้อที่ 3.3 การทดลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัวในกรณีการเปลี่ยนแปลงจากภัยในภายนอก ที่มีการทดลองกับโปรแกรมจำลองและหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมจริง และในหัวข้อที่ 3.4 การทดลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับตัว ในกรณีการเปลี่ยนแปลงจากภัยในภายนอก สามารถแสดงถึงข้อจำกัดในการใช้งานกลไกของรูปแบบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภายในและภายนอก ที่มีการทดลองกับโปรแกรมจำลองและหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมจริง และในหัวข้อที่ 3.5 การทดลองเบริญเทียบระหว่างกลไกของรูปแบบการตอบสนองด้วยเดิมและแบบปรับปรุง ได้ทำการเปลี่ยนระบบควบคุมเพื่อแก้ไขข้อจำกัด ซึ่งทำให้หุ่นยนต์สามารถสร้างท่าทางการเคลื่อนที่ได้เองและเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในกลไกของรูปแบบการตอบสนองสามารถช่วยปรับท่าทางใหม่ได้
 3. จากวัตถุประสงค์ที่ 3 เพื่อเบริญเทียบความสามารถในการปรับตัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบขา ระหว่างระบบที่ไม่มีกลไกของรูปแบบการตอบสนองแบบเดิม แบบกลไกของรูปแบบการตอบสนองแบบใหม่ ที่อธิบายถึงการออกแบบและ

กระบวนการเบรี่ยบเทียบ ซึ่งทำให้ทราบถึงการนำโครงข่ายอร์โนนเทียบมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ ดังผลที่แสดงในหัวข้อที่ 4.3 การทดลองเบรี่ยบเทียบระบบควบคุมทั้ง 3 รูปแบบ

4. จากวัตถุประสงค์ที่ 4 เพื่อสังเคราะห์หลักการออกแบบโครงข่ายอร์โนนเทียบ ได้มีการนำเสนอแนวคิดในการออกแบบกลไกอร์โนนเทียบและโครงข่ายอร์โนนเทียบอยู่ในหัวข้อที่ 2.5 แนวคิดการออกแบบและตั้งค่ากลไกอร์โนนเทียบภายในบทที่ 2 ซึ่งได้นำแนวคิดนี้มาใช้กับทุกการทดลองของงานวิจัยนี้ และเป็นในบทที่ 4 ที่เป็นการเบรี่ยบเทียบระบบที่ไม่มีกลไกอร์โนนเทียบ แบบกลไกอร์โนนคู่ และแบบโครงข่ายอร์โนนเทียบ ในหัวข้อที่ 4.2 การออกแบบควบคุมแบบโครงข่ายอร์โนนเทียบ ยึดตามหลักของการออกแบบที่สังเคราะห์ขึ้น และทำการตรวจสอบด้วยการทดลอง ในหัวข้อที่ 4.3 การทดลองเบรี่ยบเทียบระบบควบคุมทั้ง 3 รูปแบบ ใน การเบรี่ยบเทียบนี้ได้มีการเบรี่ยบเทียบผลกับการตั้งค่าของโครงข่ายอร์โนนในรูปแบบต่าง ๆ ด้วย ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องไปกับแนวคิดการออกแบบที่นำเสนอไว้ในบทที่ 2

อย่างไรก็ตามจากการศึกษางานวิจัยทำให้ทราบถึงข้อจำกัดของการใช้งานกลไกอร์โนนเทียบ ถึงแม้สามารถเพิ่มขอบเขตความสามารถของกลไกอร์โนนเทียบและโครงข่ายอร์โนนเทียบ ได้ แต่ยังมีข้อจำกัดในการนำกลไกอร์โนนหรือโครงข่ายอร์โนนไปใช้งานโดยมีประเด็นดังนี้

1. กลไกอร์โนนเทียบที่ทำการปรับปรุงสามารถแก้ไขปัญหาการตอบสนองเมื่อมีการเพิ่มหรือลดจำนวนตัวรับชอร์โนน และส่งผลทางอ้อมที่ทำให้การออกแบบกลไกมีความหลากหลาย กว่าแบบเดิม แต่ข้อจำกัดของรูปแบบการทำงานภายในตัวรับชอร์โนนที่ส่งผลโดยตรงกับค่าความเข้มข้น ณ ขณะนั้น จึงทำให้ไม่สามารถคงสถานะการกระตุ้นเซลล์เป้าหมายต่อไปอีก ระยะหนึ่งเมื่อสารออร์โนนเกิดการเปลี่ยนแปลง และการรักษาจุดสมดุลของกลไกที่ไม่เคลื่อนย้ายไม่สามารถออกแบบเส้นดุลยภาพของกลไกได้ ดังเช่น รูปที่ 3.21 ที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวขั้นบันไดในหัวข้อที่ 3.3.2 การทดลองเบรี่ยบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง MNLC กับ ALCS
2. กลไกอร์โนนเทียบไม่สามารถเป็นระบบควบคุมหลัก ได้ จะต้องมีการทำางร่วมกับระบบควบคุมอื่น และระบบควบคุมที่ถูกนำมาร่วมจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการทำงาน ดังเช่นในการทดลองการเปลี่ยนแปลงภายในที่กลไกอร์โนนเทียบสามารถรับรู้และพยายามตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภายใน แต่ไม่สามารถปรับท่าทางการเคลื่อนที่ได้ เพราะระบบควบคุมการเคลื่อนที่ถูกกำหนดครุภูมิแบบท่าทางการเคลื่อนที่ เมื่อทำการเปลี่ยนระบบควบคุม การเคลื่อนที่เป็นแบบulatory CPG ซึ่งตัวระบบสามารถสร้างท่าทางการเคลื่อนที่ได้ ผลลัพธ์จึง

สามารถทำให้หุ่นยนต์สามารถปรับการเคลื่อนที่ได้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงภายใน ดังหัวข้อที่ 3.5 การทดลองเบริกที่ขึ้นระหว่างกลไกฮอร์โมนแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุง

3. รูปแบบการใช้งานกลไกฮอร์โมนเทียมแบบ Multiple hormone และ Hormone network เหมาะสมกับระบบควบคุมที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น เช่นกรณีที่ 4 พบว่าการยืดหรือหดของหุ่นยนต์มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่าง 2 มอเตอร์ ดังรูปที่ 4.1 ในหัวข้อที่ 4.1.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์ 4 ขา ซึ่งต้องแลกมาด้วยการออกแบบที่มีความซับซ้อนของระบบ และเป็นเรื่องยากต่อการวิเคราะห์หาจุดสมดุลของแต่ละกลไก เนื่องจากทุกกลไกมีความสามารถปรับจุดสมดุลใหม่กันหมดทำให้เมื่อกลไกหนึ่งมีปัญหาเกิดการเสียสมดุล กลไกอื่นจะทำการชดเชยให้หากกลไกเหล่านั้นสัมพันธ์กัน ดังรูปที่ 4.5 ที่แสดงถึงการปรับความเข้มข้นของสารฮอร์โมน
4. กลไกฮอร์โมนเทียมสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภายในและภายนอกได้อย่างดี ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นที่เซลล์เป้าหมายทำให้ระบบควบคุมมีการปรับค่า อย่างไรก็ตามกลไกฮอร์โมนเทียมทำได้เพียงการปรับตามการกระตุ้นไม่สามารถจัดจำรูปแบบได้ เช่นกรณีที่ได้รับการกระตุ้นจากรูปแบบที่หนึ่ง กลไกฮอร์โมนจะใช้เวลาสักระยะหนึ่งในการปรับให้ถูก เข้าจุดสมดุล เมื่อทำการเปลี่ยนการกระตุ้นจากรูปแบบที่หนึ่งเป็นรูปแบบที่สอง กลไกฮอร์โมนก็จะใช้เวลาสักระยะหนึ่งในการปรับให้ถูกเข้าจุดสมดุลใหม่ หากกลับมากระตุ้นด้วยรูปแบบที่หนึ่งเช่นเดิม กลไกจะใช้เวลาสักระยะเพื่อปรับให้ถูกเข้าจุดสมดุลที่จุดแรก ดังรูปที่ 3.26 ที่พื้นผิวมีหยาบคลุมมากน้อยเปลี่ยนแปลงไปแต่จะพบว่าหุ่นยนต์ติดอยู่กับก่อหยาบ และต้องรอให้ค่า MI ถูกปรับ ดังนั้นหากสามารถเพิ่มระบบส่วนของความจำรูปแบบของปัญหาจะสามารถทำให้ระบบมีการตอบสนองได้เร็วขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนรูปแบบการกระตุ้นแบบเดิม
5. หลักการออกแบบโครงข่ายฮอร์โมนเทียมที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 เป็นกระบวนการที่สามารถนำไปใช้กับระบบต่าง ๆ ได้อย่างไรก็ตามการปรับแต่งค่าภายในกลไกฮอร์โมนเทียมจะต้องทำการทดลองเพื่อปรับค่าต่าง ๆ ให้เหมาะสม รวมไปถึงการเชื่อมต่อระหว่างต่อมฮอร์โมน จะต้องพิจารณาเทียบไปกับระบบที่ใช้ร่วมกัน ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะกำหนดเงื่อนไขที่จะลงสำหรับการออกแบบให้ครบถ้วน

จากการปัญหาและข้อจำกัดที่พนักงานจากการศึกษา จึงมีข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนาต่อของงานวิจัยดังนี้

1. การพัฒนาโมเดลภายในตัวรับฮอร์โมน ด้วยการศึกษาตัวรับฮอร์โมนในสิ่งมีชีวิตที่เป็นส่วนสำคัญในการกระตุ้นการทำงานและทำให้เกิดการหน่วงเพื่อการกระตุ้นที่มีระยะเวลานานขึ้น ซึ่งตัวรับฮอร์โมนในธรรมชาติมีหลายรูปแบบ เช่นแบบประตุเปิดปิดการแพร่ของสาร

ซอร์โนนด้วยการดึงสารซอร์โนนเข้ามาเก็บไว้ในเซลล์ หากนำรูปแบบการทำงานเหล่านี้มาสร้างเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์จะสามารถทำให้เกิดการหน่วงการกระตุ้น และการกระตุ้นซ้ำโดยที่ไม่ต้องเพิ่มสารซอร์โนนหรือในกรณีที่สารซอร์โนนลดลงแล้วแต่ยังรักษาระดับการทำงานต่อไป

2. ควรมีหลักการในการเลือกรอบที่ถูกนำมาใช้งานร่วมกับกลไกซอร์โนน เพื่อการนำสักภาพในการปรับตัวของกลไกซอร์โนนออกมายใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. จากการปรับปรุงกลไกซอร์โนนเที่ยม และการนำกลไกซอร์โนนมาใช้งานมากกว่าหนึ่งกลไกทำให้การปรับค่า α , β และ γ เป็นเรื่องยากและต้องใช้เวลาในการปรับที่นาน ดังนั้นควรพิจารณาการนำอัลกอริทึมในการหาค่า α , β และ γ ที่เหมาะสม เช่นวิธีการสัดส่วนทองคำ (Golden section search), วิธีการแบ่งครึ่ง (Bisection) และวิธีการของพอลเวลล์ (Powell's method) มาประยุกต์ใช้ในการปรับค่า
4. ควรนำหลักการหรือเทคนิคที่มาใช้ร่วมกับกลไกซอร์โนนเที่ยม เพื่อเพิ่มความสามารถในการจดจำข้อมูล ได้ช่วงเวลาหนึ่งมาประยุกต์ใช้ เช่น ระบบความจำระยะสั้นและระยะยาว หรือการนำ Synaptic plasticity (SP) เพื่อช่วยในการปรับการทำงานควบคู่ไปกับกลไกซอร์โนน โดยที่กลไกซอร์โนนมีหน้าที่รับรู้สภาพแวดล้อมจากภายนอก เพื่อเป็นเลขอ้างอิงสำหรับการหาค่า weight ภายใน SP มาเก็บในความจำ เมื่อมีกลไกซอร์โนนรับรู้สภาพแวดล้อมที่ตรงกับที่มีอยู่ความจำ จะนำค่า weight นั้นมาแทนค่าลงใน SP เพื่อทำให้มีการปรับตัวที่เร็วขึ้น
5. เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การออกแบบกลไกซอร์โนนเที่ยมและโครงข่ายซอร์โนนเที่ยม จึงไม่ได้มีการวิเคราะห์ผลทางอ้อมของระบบการเคลื่อนที่ที่นำกลไกซอร์โนนมาใช้งาน เช่น การวิเคราะห์เบริกบทีบทพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กับการเคลื่อนที่ของสิ่งมีชีวิต จริง การนำระบบควบคุมไปใช้กับหุ่นยนต์ที่มีลักษณะแบบเดียวกันแต่ความยาวของขาไม่เท่ากันหรือตำแหน่งของขาไม่สมมาตร รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์กลาง มวลระหว่างการเคลื่อนที่ ซึ่งการศึกษาในประเด็นเหล่านี้จะเป็นการช่วยพัฒนาด้านระบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงได้ เช่นการพัฒนาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนส่วนของเหลว หรือการพัฒนาการทำงานร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์

ເອກສາຣອ້າງອີງ

1. A. Bauer, D. Wollherr, and M. Buss, 2008, “**Human–Robot Collaboration: A Survey,**” International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 5, No. 01, pp. 47–66.
2. H. Robinson, B. Macdonald, and E. Broadbent, 2014, “**The Role of Healthcare Robots for Older People at Home: A Review,**” International Journal of Social Robotics, Vol. 6, No. 4, pp. 575–591.
3. A. Martinelli, D. Scaramuzza, and R. Siegwart, 2006, “**Automatic self-calibration of a vision system during robot motion,**” Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. p. 43-48.
4. D. S. Wettergreen, 1995, "**Robotic Walking on Natural Terrain: Gait planning and behavior-based control for statically-stable walking robots**" Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
5. K. Chatzilygeroudis, V. Vassiliades, and J.-B. Mouret, 2018, “**Reset-free Trial-and-Error Learning for Robot Damage Recovery,**” Robotics and Autonomous Systems, Vol. 100, pp. 236–250.
6. A. C. Guyton and J. E. Hall, **Textbook of Medical Physiology** ,11th Eleventh Edition, Elsevier Inc.
7. C. Sauzé and M. Neal, 2010, “**A neuro-endocrine inspired approach to long term energy autonomy in sailing robots.,**” Proceedings of TAROS (Towards Autonomous Robotic Systems), pp. 255-262.
8. R. C. Moioli, P. A. Vargas and H. Phil, 2009, “**A Multiple Hormone Approach to the Homeostatic Control of Conflicting Behaviours in an Autonomous Mobile Robot,**” 2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 47-54.
9. P. Teerakittikul, T. Gianluca and M. T. Andy, 2012, “**Artificial hormone network for adaptive robot in a dynamic environment,**” 2012 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS), pp. 129-136.
10. P. Teerakittikul, 2013, “**Artificial hormone network for adaptable robots,**” Doctoral dissertation, University of York.

11. R. Khalique, 1983, “**Autonomous robotic model based on human endocrine system,**” University of Karachi, Karachi.
12. O. Sporns and H. A. William, 2002, “**Dopamine, Reward Conditioning, and Robot Behavior,**” Proceedings 2nd International Conference on Development and Learning, pp. 265-270.
13. S. Hooman and S. Elham, 2012, “**A Multidisciplinary Artificial Intelligence Model of an Affective Robot,**” International Journal of Advanced Robotic Systems.
14. E. A. D. Paolo, “**Homeostasis adaptation to inversion of the visual field and other sensorimotor disruptions**”.
15. C. M. Renan, V. A., J. Fernando, Z. Von and H. Phil, “**Towards the Evolution of an Artificial Homeostatic System**”.
16. D. Moser, T. Ronald and S. T., 2016, “**First Investigations into Artificial Emotions in Cognitive Robotics,**” International Workshop on Medical and Service Robots, pp. 213-227.
17. M. Neal and J. Timmis, 2003, “**Timidity: a useful mechanism for robot control?**,” Informatica, pp. 197-204.
18. K. Lars, H. Nick, D. Tom, H. Marc and K. Tomáš, 2018, “**Artificial Intelligence for Long-Term Robot Autonomy: A Survey,**” IEEE Robotics and Automation Letters, pp. 4023-4030.
19. L. Pitonakova, 2013, “**Ultrastable neuroendocrine robot controller,**” Adaptive Behavior, pp. 47-63.
20. J. Lones, M. Lewis, & L. Cañamero, 2017, “**A hormone-driven epigenetic mechanism for adaptation in autonomous robots.**” IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, Vol.10, No. 2, pp. 445-454.
21. L. Hickton, M. Lewis, & L. Cañamero, 2017, “**A flexible component-based robot control architecture for hormonal modulation of behaviour and affect.**” In Annual Conference Towards Autonomous Robotic Systems, Springer, Cham., pp. 464-474.
22. P. Manoonpong, U. Parlitz and F. Wörgötter, 2013, “**Neural control and adaptive neural forward models for insect-like, energy-efficient, and adaptable locomotion of walking machines,**” Front Neural Circuits, Vol. 7, p. 12.

23. P. Manoonpong, F. Pasemann, and F. Woergoetter, 2008, “**Sensor-driven neural control for omnidirectional locomotion and versatile reactive behaviors of walking machines,**” Robot. Auton. Syst., Mar. 2008, Vol. 56, No. 3, pp. 265--288.
24. T. Niacaris and L. Avery, 2003, ” **Serotonin regulates repolarization of the C. elegans pharyngeal muscle,**” Journal of Experimental Biology, Vol. 206, No. 2, pp. 223-231.
25. J. Rillich and P. A. Stevenson, 2018, “**Serotonin mediates depression of aggression after acute and chronic social defeat stress in a model insect,**” Frontiers in Behavioral Neuroscience , Vol. 12.
26. E. Kravitz, 2000, “**Serotonin and aggression: insights gained from a lobster model system and speculations on the role of amine neurons in a complex behavior,**” Journal of Comparative Physiology A, Vol. 186, No. 13, pp. 221-238.
27. C. Ferreira and C. P. Santos, 2017, “**A sensory-driven controller for quadruped locomotion,**” Biological Cybernetics, Vol. 111, No. 1, pp. 49–67.
28. M. Iosa, T. Marro, S. Paolucci, and D. Morelli, 2012, “**Stability and harmony of gait in children with cerebral palsy,**” Research in Developmental Disabilities, Vol. 33, No. 1, pp. 129–135.
29. M. Pragr, P. Cizek, and J. Faigl, 2018, “**Cost of Transport Estimation for Legged Robot Based on Terrain Features Inference from Aerial Scan,**” 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 1745-1750.
30. M. Bjelonic, T. Homberger, N. Kottege, P. Borges, M. Chli, and P. Beckerle, 2017, “**Autonomous navigation of hexapod robots with vision-based controller adaptation,**” 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 5561-5568.
31. M. Bjelonic, N. Kottege, T. Homberger, P. Borges, P. Beckerle, and M. Chli, 2018, “**Weaver: Hexapod robot for autonomous navigation on unstructured terrain,**” Journal of Field Robotics, Vol. 35, No. 7, pp. 1063–1079.
32. E. Arena, P. Arena, R. Strauss, and L. Patané, 2017, “**Motor-Skill Learning in an Insect Inspired Neuro-Computational Control System,**” Frontiers in Neurorobotics, Vol. 11, No.12.
33. J. D. Carlo, P. M. Wensing, B. Katz, G. Bledt, and S. Kim, 2018, “**Dynamic Locomotion in the MIT Cheetah 3 Through Convex Model-Predictive Control,**” 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.1-9.

34. S. S. Barikhan, F. Wörgötter, and P. Manoonpong, 2014, “**Multiple Decoupled CPGs with Local Sensory Feedback for Adaptive Locomotion Behaviors of Bio-inspired Walking Robots,**” From Animals to Animats 13 Lecture Notes in Computer Science, pp. 65–75.
35. A. Haidar, L. Legault, V. Messier, T. M. Mitre, C. Leroux, and R. Rabasa-Lhoret, 2015, “**Comparison of dual-hormone artificial pancreas, single-hormone artificial pancreas, and conventional insulin pump therapy for glycaemic control in patients with type 1 diabetes: an open-label randomised controlled crossover trial,**” The Lancet Diabetes & Endocrinology, Vol. 3, No. 1, pp. 17–26.
36. J. André, C. Teixeira, C. P. Santos, and L. Costa, 2015, “**Adapting Biped Locomotion to Sloped Environments,**” Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol. 80.3 No.4, pp. 625-640.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ — สกุล

นายโพธิ์วัฒน์ งามจรรยาภรณ์

วัน เดือน ปีเกิด

26 เมษายน 2530

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา

มัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนอัสสัมชัญสมุทรปราการ

ปีการศึกษา 2548

ระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2551

ระดับปริญญาโท

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2555

ระดับปริญญาเอก

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2562

ทุนการศึกษา หรือทุนวิจัย

ทุนผู้ช่วยวิจัย

ประวัติการทำงาน

วิศวกร

บริษัท ดิจิตอล รีสอร์ช แอนด์ คอนซัลทิ่ง จำกัด พ.ศ. 2555-2556

บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ. 2556

ผู้ร่วมก่อตั้ง

กลุ่มวิจัย Freak Lab คลัสเตอร์วิจัยนวัตกรรมอนาคต ณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าชัชนาท พ.ศ. 2559

บริษัท สเปช แซฟต์ จำกัด พ.ศ. 2559

บริษัท ออโต้ม่า จำกัด พ.ศ. 2560

นักวิจัย

ห้องปฏิบัติการ NEUTRON ณ มหาวิทยาลัยการบินและอวกาศ

หนานจิง พ.ศ. 2561

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

Ngamkajornwiwat, P. and Teerakittikul, P., 2015, "Toward adaptability for autonomous robots: A new model of artificial hormones", **International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology**.

Ngamkajornwiwat, P., Teerakittikul, P., & Manoonpong, P., 2018, "Online Gait Adaptation of a Hexapod Robot Using an Improved Artificial Hormone Mechanism", **International Conference on Simulation of Adaptive Behavior**, pp. 212-222, Springer.

Ngamkajornwiwat, P., Homchanthanakul, J., Teerakittikul, P. and Manoonpong, P., "Bio-inspired Adaptive Locomotion Control System for Online Adaptation of a Walking Robot on Complex Terrains," **IEEE Access**, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2992794.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาของนักศึกษาดับบล็อกศึกษา

วันที่.....27.....เดือน..สิงหาคม..... พ.ศ..2563.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)..นายโพธิ์วัฒน์ งานชรริวัฒน์.....

รหัสประจำตัว....5734080003..... เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับ ○ ประกาศนียบัตรบัณฑิต ○ ปริญญาโท ○ ปริญญาเอก หลักสูตร...ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต.. สาขาวิชา...วิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ..... คณะ.....สถาบันวิทยาหุ่นยนต์ภาคสนาม..... อายุบ้านเลขที่.....51/2.....หมู่.....-..... ตรอก/ซอย.....-.....ถนน....เทศบาล 4.....
ตำบล/แขวง.....ปากน้ำ.....อำเภอ/เขต...เมือง.....
จังหวัด...สมุทรปราการ..... รหัสไปรษณีย์...10270.....เป็น “ผู้ร้อน”
ขอโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาให้ไวกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี.....รศ. ดร.สยาม เจริญเสียง.....ตำแหน่งผู้อำนวยการ.....
เป็นตัวแทน “ผู้ร้อน” สิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาและมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง..การปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของหุ่นยนต์อัตโนมัติ โดยใช้โครงข่ายออร์บอนเทียม.....
ซึ่งอยู่ในความคุ้มครองของ...ดร.ปิติวุฒิ รีกิตติกุล..... อาจารย์ที่ปรึกษา และ/หรือ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุญาติโกรงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกครั้ง ที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรือให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือคัดแปลง หรือเผยแพร่ต่อสาธารณะหรือกระทำการอื่นใด ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมี

ค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีก่อน

5. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ไปประดิษฐ์หรือพัฒนาต่อยอดเป็นสิ่งประดิษฐ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาประเภทอื่น ภายในระยะเวลาสิบ (10) ปีนับจากวันลงนามในข้อตกลงฉบับนี้ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีมีสิทธิในทรัพย์สินทางปัญหานั้น พร้อมกับได้รับชำระค่าตอบแทนการอนุญาตให้ใช้สิทธิดังกล่าว รวมถึงการจัดสรรงบประมาณอันเพิ่มเกิดขึ้นจากส่วนได้ส่วนหักหรือทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ในอนาคต โดยให้เป็นไปตามระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

6. ในกรณีที่มีผลประโยชน์เกิดขึ้นจากการอนุญาตให้ใช้สิทธิในทรัพย์สินทางปัญหานั้นที่ข้าพเจ้าทำขึ้นโดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นเจ้าของ ข้าพเจ้าจะมีสิทธิได้รับการจัดสรรงบประมาณอันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญหาดังกล่าวตามอัตราที่กำหนดไว้ในระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ.

2538

ลงชื่อ.....กฤษรรษา งามวงศ์วานิช ผู้อนุมัติ
(.....นายโพธิ์วัฒน์ งามวงศ์วานิช.....)

นักศึกษา

ลงชื่อ.....ผู้รับอนุมัติ
.....รศ. ดร. สยาม เจริญเสียง.....

ผู้อำนวยการ

ลงชื่อ.....ปิติวุฒิ ธีรกิตติกุล พยาน
(.....ดร.ปิติวุฒิ ธีรกิตติกุล.....)

ลงชื่อ.....สุริยา นฤสุภกพวงศ์ พยาน
(.....คร.สุริยา นฤสุภกพวงศ์.....)