



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ชุดเล่นเรียนรู้กับวิศวกรรมอลวนสำหรับเศรษฐกิจสร้างสรรค์
Learn and play with chaos engineering construction kit
for creative economy

กฤตดากร กล่อมการ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

๖๐๐๒๖๐๔๑๖

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) ชุดเล่นเรียนรู้กับวิศวกรรมอลวนสำหรับเศรษฐกิจสร้างสรรค์

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปี งบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 420,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558 - 30 กันยายน 2559

หัวหน้าโครงการ นาย กฤตากร กล่อมการ ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างสร้างตัวต้นแบบชุดเล่นเรียนรู้กับวิศวกรรมอลวนที่ประกอบด้วยบล็อกทาง
วงจรรีเลย์ทรอนิกส์ต่างๆ ที่สามารถให้ผู้เรียนประกอบเพื่อสร้าง(construction kit) เป็นโครงการเช่น หุ่นยนต์
เครื่องเล่นดนตรี ตัวตรวจจับ พร้อมชุดต่อเชื่อมคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์เพื่อแสดงผลของภาพและเสียงหรือ
ปรากฏการณ์ของพฤติกรรมอลวน

คำสำคัญ :วิศวกรรมอลวน, นวัตกรรมการเรียนรู้, ของเล่นแบบอลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Learn and play with chaos engineering construction kit for creative economics

Researcher Mr. Kitdakorn Klomkarn

Faculty Engineering, Department of Computer Engineering

ABSTRACT

This research project presents a construction of chaos engineering construction kit for creative economics. This education kits consists of electronic circuit blocks which can be assembly into mini-scientific project such as robot, music synthesizer and chemical sensor. In each experiment of the projects, chaos phenomenon also study and display in image and sound via simple equipment.

Keyword Chaos engineering, Learning innovation, Educational toy



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 ทฤษฎี	8
2.3 การสร้างตัวดึงดูดแบบต่างๆ	9
2.3.1 ตัวดึงดูดแบบ Lorenz	9
2.3.2 ตัวดึงดูดของ Chen	11
2.3.3 ตัวดึงดูดแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen แบบง่าย	14
2.3.4 วงจร Chua	16
2.3.5 ระบบอลวนแบบ autonomous อันดับ 2	19
2.3.6 ระบบอลวนแบบ autonomous อันดับ 3	20
2.2.7 ระบบอลวนแบบ nonautonomous อันดับสอง 2	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย	20
3.1 ตัวดึงดูดแบบวงจร Chua	24
3.2 ตัวดึงดูดที่ปรับปรุงใหม่แบบวงจร Chua ปรับปรุงใหม่	32
3.3 ตัวดึงดูดที่ออกแบบจากลูปอินทีเกรทเตอร์สองตัว	37
3.4 วงจรอลวนแบบ Wien bridge	41
3.5 วงจรตัวดึงดูดแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen แบบง่าย	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง	47

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

56

5.2 ข้อเสนอแนะ

56

เอกสารอ้างอิง

57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างรูปภาพผลงานศิลปะจากการจำลองค่าสมการของ Chua..	5
2.2 ตัวดึงดูดแบบ Lorenz	11
2.3 ตัวดึงดูดแบบ Lorenz ในแกนเวลา	11
2.4 ตัวดึงดูดแบบ Chen	13
2.5 ตัวดึงดูดแบบ Chen ในแกนเวลา	13
2.6. ตัวดึงดูดแบบ Wang และ Chen เมื่อปรับ r	15
2.7 วงจร Chua	16
2.8 $i-v$ characteristic ของ Chua ไดโอด	17
2.9 ตัวดึงดูดแบบ Chua	19
2.10 ตัวดึงดูดของระบบออสซิลเลชันแบบ autonomous อันดับ 2	20
2.11 ตัวดึงดูดของระบบ autonomous อันดับ 3 โดยใช้ฟังก์ชันเครื่องหมาย	21
2.12 ตัวดึงดูดของระบบ nonautonomous อันดับสองใช้ฟังก์ชันเครื่องหมายขับเคลื่อนด้วยสัญญาณไซน์	22
2.13 ตัวดึงดูดของระบบ nonautonomous อันดับสองใช้ฟังก์ชันเครื่องหมายขับเคลื่อนด้วยสัญญาณพัลส์	23
3.1 วงจร Chua แบบมาตรฐาน	24
3.2 วงจร Chua แบบมาตรฐานแสดงระดับ block level	25
3.3 ผลการจำลองวงจร Chua โดยโปรแกรม Simulink	26
3.4 ผลการจำลองของวงจร Chua แบบมาตรฐานโดย Pspice	27
3.5 วงจรเชื่อมต่อ PC scope	28
3.6 แสดง PC-scope	29
3.7 แสดงปรากฏการณ์ของระบบออสซิลเลชันในการเรียนรู้	30
3.8 แสดงใจเรเตอร์ที่ใช้แทนตัวเหนี่ยวนำ	31
3.9 ผลการจำลองของวงจร Chua แบบมาตรฐานโดยใช้ใจเรเตอร์	31
3.10 วงจรความต้านลบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบใช้ออปแอมป์ตัวเดียว	32
3.11 ใจเรเตอร์แบบใช้ออปแอมป์ตัวเดียว	33
3.12 วงจร Chua ปรับปรุงใหม่	33
3.13 ผลการจำลองวงจร Chua ปรับปรุงใหม่โดย Pspice	34
3.14 แสดงการขับเคลื่อน	34
3.15 แบบจำลองเชิงกลของการขับเคลื่อนหุ่นยนต์	35
3.16 ผลการจำลองรูปแบบการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ออสซิลเลชัน	35
3.17 ชุดหุ่นออสซิลเลชันเล็ก DIY	36
3.18 ชุดหุ่นออสซิลเลชันวาครูปประกอบเสร็จ	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.19	ลูปอินที่เกรทเตอร์แบบลบสองตัว	37
3.20	ลูปอินที่เกรทเตอร์บวกรวมกับวงจรรินที่เกรทเตอร์แบบลบ	38
3.21	วงจรรอลวนอันดับสองใช้ตัวฮิสเตอร์ซีล	39
3.22	ผลการจำลองวงจรรอลวนอันดับสองใช้ตัวฮิสเตอร์ซีลโดย Pspice	40
3.23	วงจรรอลวนอันดับสองที่ใช้เป็นตัวตรวจวัด	40
3.24	ผลการจำลองวงจรรอลวนอันดับสองใช้ฟังก์ชันเครื่องหมายขั้วด้วยสัญญาณพัลส์ด้วย Pspice	41
3.25	วงจรรอลวนแบบ Wien-bridge	42
3.26	ผลการจำลองวงจรรอลวนแบบ Wein bridge	42
3.27	หุ่นยนต์ขีดเส้น (Doodle Robot)	43
3.28	รูปรวาดจากหุ่นยนต์ขีดเส้น	43
3.29	วงจรรตัวตั้งจุดแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen แบบง่าย	44
3.30.1	ผลการจำลองวงจรรอลวนแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen ค่า $r=0.2$	45
3.30.2	ผลการจำลองวงจรรอลวนแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen ค่า $r=0.5$	46
4.1	แสดงการปรับค่า R1 ของวงจรร Chua เกิดสัญญาณอลวนแบบ 1 สกอร์	47
4.2	แสดงการปรับค่า R1 ของวงจรร Chua เกิดสัญญาณอลวนแบบ 2 สกอร์	48
4.3	ผลของการวาดรูปโดยหุ่นยนต์อลวนแบบ DIY	48
4.3	ระบบตรวจวัดแบบอลวน	49
4.4	ความถี่ของ V/F และสัญญาณอลวนเมื่อปรับอุณหภูมิ	50
4.5	ความถี่ของ V/F และสัญญาณอลวนต่อปริมาณเกลือ	51
4.6	ผลการทดลองวงจรรอลวนแบบ Wein bridge	52
4.7	ผลการทดลองวงจรรอลวนแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen	54
4.8	ชุด DIY พร้อมกล่องเครื่องหมายการค้าชื่อ "KMITL Engyoynearing"	55
5.1	แสดงงานบางส่วนเผยแพร่แก่นักเรียน รร. วิทยาศาสตร์	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากพระราชบัญญัติการศึกษาแห่งชาติ พ.ศ. 2542 ที่กำหนดไว้ว่าการศึกษาคือต้องยึดผู้เรียนมีความสามารถเรียนรู้และพัฒนาตนเองได้ และถือว่าผู้เรียนเป็นศูนย์กลางแห่งการเรียนรู้(Student centered instruction) ซึ่งการจัดการศึกษาที่เน้นผู้เรียนเป็นสำคัญนี้ สิ่งสำคัญคือ ต้องให้ผู้เรียนค้นคว้าและทดลองแลกเปลี่ยนเรียนรู้และลงมือปฏิบัติจริงจนเกิดทักษะในการแสวงหาความรู้และสามารถสร้างองค์ความรู้ และสิ่งประดิษฐ์ใหม่ได้ด้วยตนเองอีกทั้งปัจจุบันแนวคิดเรื่องเศรษฐกิจสร้างสรรค์(creative economic) ตามประกาศระเบียบสำนักนายกรัฐมนตรีว่าด้วยกองทุนเศรษฐกิจสร้างสรรค์[1] ที่นิยามว่าเศรษฐกิจสร้างสรรค์คือแนวคิดขับเคลื่อนเศรษฐกิจบนพื้นฐานการใช้ความรู้(knowledge) การสร้างสรรค์(creativity) การใช้ทรัพย์สินทางปัญญา (intellectual property) กับพื้นฐานทางวัฒนธรรม การส่งเสริมความรู้ของสังคม และเทคโนโลยีและนวัตกรรมสมัยใหม่ โดยสำหรับประเทศไทยแล้วมูลค่าเศรษฐกิจสร้างสรรค์ในระหว่างช่วงปี พ.ศ. 2545-2550 คิดเป็นประมาณ 10% ของผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ โดยกลุ่มสร้างสรรค์ตามลักษณะงานประเภทออกแบบเช่น แฟชั่น อัญมณี สถาปัตยกรรม และของเล่น เป็นกลุ่มที่มีมูลค่าสูงสุด แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อเทียบกับประเทศจีนแล้ว กลุ่มประเภทของเล่น(รวมหมายถึงของเล่นเพื่อการศึกษา) มีมูลค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับประเทศจีน โดยการส่งออกของประเทศจีนอยู่ในระดับ 9,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐแต่ของประเทศไทยอยู่ในระดับไม่ถึง 100 ล้านดอลลาร์สหรัฐ สำหรับการศึกษาก็เพื่อที่จะให้คุณภาพประชากรและยกระดับความสามารถในการแข่งขันนั้น ปัจจุบันสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี[2]ได้ผลักดันการศึกษาแบบ STEM สู่วิทยาลัยทั่วประเทศโดยการศึกษาแบบ STEM นี้เป็นแนวคิดจากการศึกษาของประเทศสหรัฐอเมริกาที่ต้องการปรับปรุงการศึกษาหลังจากพบว่าความสามารถในการแข่งขันของตนเองไม่ได้เป็นอันดับหนึ่งในหลายๆ ด้าน [3] โดยการศึกษาแบบ STEM เป็นการสอนแบบบูรณาการข้ามกลุ่มสาระวิชา ที่ประกอบด้วยวิชาวิทยาศาสตร์(science) ที่เน้นเกี่ยวกับปรากฏการณ์ธรรมชาติ เทคโนโลยี(Technology) เป็นการประยุกต์ความรู้ในศาสตร์ต่างๆ วิศวกรรม(engineering) เป็นการสร้างนวัตกรรม และคณิตศาสตร์(mathematics) ที่เป็นการคำนวณเพื่อให้ผู้เรียนสามารถนำความรู้ทุกแขนงดังกล่าวมาแก้ไขปัญหาในชีวิตประจำวันและสร้างนวัตกรรม โดยการศึกษาแบบ STEM นี้ประเทศเกาหลีใต้ผู้ที่ได้ชื่อว่าเป็นผู้นำเศรษฐกิจสร้างสรรค์แห่งเอเชียโดย มีกองทุนเพื่อความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และความคิดสร้างสรรค์(Korea foundation for the advance science and creativity)[4]ได้ปรับปรุงเป็นการศึกษาให้เป็นแบบ STEAM โดยเพิ่มการศึกษาศิลปะ(art) เพื่อให้เด็กเกิดความคิดสร้างสรรค์โดยจัดการศึกษาตั้งแต่ระดับประถมจนถึงมัธยมปลาย

ด้วยเหตุผลที่กล่าวข้างต้น รวมทั้งขบวนการเรียนรู้ที่เน้นผู้เรียนเป็นสำคัญ ซึ่งการออกแบบการสอนต้องเน้นที่ผู้เรียนแล้วสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษายังมีตัวบ่งชี้ที่ต้องมีนวัตกรรมในการเรียนรู้ รวมทั้งแนวคิดแบบเศรษฐกิจสร้างสรรค์ที่ต้องให้ผู้เรียนมีความคิดสร้างสรรค์สามารถสร้างนวัตกรรมเพื่อสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจ อีกทั้งแนวทางที่จะนำการศึกษาแบบ STEM มาใช้จึงจำเป็นต้องมีชุดเรียนรู้หรือของเล่นเพื่อการเรียนรู้(educational toy) แบบต่างๆ เพื่อให้ผู้เรียนได้สร้างและสัมผัสจึงจะสามารถที่จะเกิดความคิดที่สร้างสรรค์และสร้างนวัตกรรมได้ โดยชุดสำหรับเรียนรู้ที่เป็นที่แพร่หลายในต่างประเทศเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PicoCricket[26] สำหรับเรียนรู้ในระดับประถม Legomin stroms[29] ชุดตัวต่อสร้างหุ่นยนต์แบบต่างๆ สำหรับ มัธยมถึงระดับอุดมศึกษา Littlebits[24] ที่เป็นตัวต่อฝังตัวด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถต่อเป็นโครงงานต่างๆ ซึ่งผู้ผลิตอ้างว่าเหมาะสมกับการการศึกษาแบบ STEAM แต่ชุดเรียนรู้ดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ต่างประเทศที่มีราคาค่อนข้างแพง(ราคาต่อชุด 250 เหรียญสหรัฐสำหรับ PicoCricket, 300 เหรียญสหรัฐสำหรับ Lego mindstroms และ 150 เหรียญสหรัฐสำหรับ Littlebits ในชุดพื้นฐาน)และถ้าหากใช้ชุดทดลองดังกล่าวแล้วยังการพัฒนาเข้ากับหลักสูตรการศึกษาของประเทศอีกด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอการสร้างชุดเรียนรู้ที่อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีออสวาทซ์ที่เป็นปรากฏการณ์ทางวิทยาศาสตร์ที่น่าสนใจและสามารถประยุกต์ทั้งงานวิศวกรรมศาสตร์และศิลปะ สำหรับนักเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจนถึงระดับอุดมศึกษา ที่ใช้ทดลองเล่นเรียนรู้ในวิชาคณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ จนถึงระดับทดลองในระดับสาขาวิศวกรรมบางสาขาเช่นไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ แมคคาทรอนิกส์และสารสนเทศ โดยชุดทดลองอาศัยพื้นฐานคณิตศาสตร์ในระดับสมการอนุพันธ์ โดยออกแบบให้มีลักษณะเป็นของเล่น (educational toy) ที่สามารถสร้างและเชื่อมต่อให้เป็น หุ่นยนต์ เครื่องเล่นดนตรี การกำเนิดรูปภาพศิลปะ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 สร้างต้นแบบชุดเรียนรู้บนพื้นฐานวิศวกรรมอลวนเพื่อใช้สำหรับการศึกษาแบบบูรณาการข้ามกลุ่มสาระวิชาในระดับมัธยมปลาย และสำหรับนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้ผู้เรียนสามารถมีความคิดสร้างสรรค์และสร้างนวัตกรรมได้

1.2.2 จดสิทธิบัตรตัวต้นแบบชุดเรียนรู้เพื่อเป็นสินค้าประเภทเศรษฐกิจสร้างสรรค์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สร้างตัวต้นแบบชุดเล่นเรียนรู้กับวิศวกรรมอลวนที่ประกอบด้วยบล็อกทางวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่สามารถให้ผู้เรียนประกอบเพื่อสร้าง(construction kit) เป็นโครงงานเช่น หุ่นยนต์ เครื่องเล่นดนตรี ตัวตรวจจับ พร้อมชุดต่อเชื่อมคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์เพื่อแสดงผลของภาพและเสียงหรือปรากฏการณ์ของพฤติกรรมอลวน

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยกระทำตามขั้นตอนการเรียนรู้ของผู้เรียนที่กล่าวมาในหัวข้อทฤษฎีโดย

1.4.1 ทำการตรวจสอบและหารูปแบบของสมการที่สามารถสร้างโครงงานแบบต่างๆ ที่กำหนดเป้าประสงค์ไว้

1.4.2 ทำการสร้างบล็อกที่แทนฟังก์ชันคณิตศาสตร์

1.4.3 ทดลองบล็อกที่ได้ในการเรียนรู้ โดยต่อเป็นโครงงานต่างๆ

1.4.4 พัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับต่อเชื่อมชุดทดลองกับคอมพิวเตอร์

1.4.5 จัดทำคู่มือชุดเรียนรู้

1.4.6 จัดทดลองและเผยแพร่แก่บุคคลากรที่สอนนักเรียนมัธยมปลายและอุดมศึกษา

1.4.7 ทำรายงานและจดสิทธิบัตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้และชุดเรียนรู้ในการเรียนการสอนแบบบูรณาการข้ามกลุ่มสาระวิชาสำหรับการเรียนการสอนระดับมัธยมปลาย และชุดเรียนรู้ในระดับอุดมศึกษาสำหรับการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์

1.5.2 ได้ตัวตนแบบชุดเรียนรู้ที่สามารถสร้างเป็นสินค้าแบบเศรษฐกิจสร้างสรรค์ประเภทของเล่นสำหรับการเรียนรู้

1.5.2 ได้สิทธิบัตรชุดเล่นเรียนรู้กับวิศวกรรมอลวน

1.5.4 ตัวต้นแบบสามารถใช้อบรมครูหรือบุคลากรทางการศึกษา ที่ต้องการพัฒนาในนักเรียนได้เรียนรู้แบบข้ามกลุ่มสาระวิชาและ กลุ่มที่ต้องการให้ผู้เรียนมีความคิดสร้างสรรค์เพื่อสร้างนวัตกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีเกี่ยวข้อง

ปรากฏการณ์ค้นพบโดย E.N Lorenz[5] นักคณิตศาสตร์และอุตุนิยมวิทยาแห่งสถาบันเทคโนโลยีแห่ง Massachusetts ในปี ค.ศ. 1963 โดยการจำลองการไหลของความร้อนในชั้นบรรยากาศ ด้วยการลดรูปแบบจำลองให้เป็นสมการอนุพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น 3 ตัวแปร(x,y,z)ในครั้งการคำนวณ Lorenz ได้ลดหลักของค่าเริ่มต้นที่ไม่มีนัยต่อการคำนวณปรากฏว่าผลลัพธ์ที่ได้ในแกนเวลามีค่าแตกต่างกับการไม่ลดหลักโดยสิ้นเชิงหรือระบบที่จำลองขึ้นนี้มีความไวต่อค่าเริ่มต้น(sensitive to initial condition) และเมื่อ Lorenz นำค่า (x,y,z) ทำการพล็อตเข้าด้วยกันพบว่า เป็นรูปร่างที่น่าสนใจโดย Lorenz ให้ชื่อว่าตัวดึงดูดประหลาด (strange attractor)



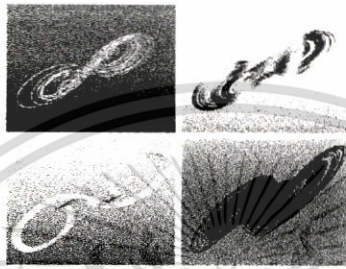
รูปแสดงตัวดึงดูดประหลาดของ Lorenz

พฤติกรรมอลวนนี้เมื่อพิจารณาคอมพิวเตอร์ในโดเมนของเวลาแล้วพบว่า มีลักษณะคล้ายสัญญาณเชิงสุ่ม (random) แต่คุณสมบัติของระบบพลวัตที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์อลวนนั้น เป็นระบบที่เจาะจง (deterministic) โดยสัญญาณที่เกิดขึ้นนี้จะมีลักษณะขึ้นกับค่าเริ่มต้น ดังนั้นทำให้ระบบพลวัตแบบอลวนมีความสามารถทำการ Synchronize ทางเวลากับระบบพลวัตแบบอลวนที่มีคุณสมบัติเหมือนกันได้

จากสภาวะอลวนนั้นเป็นพฤติกรรมเกิดจากระบบพลวัตแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นสภาวะดังกล่าวจึงสามารถเกิดได้ทั้งในระบบเศรษฐศาสตร์[6] วิศวกรรม[7-8] และสภาวะของระบบชีวการแพทย์[9] แนวคิดที่นำเอาระบบอลวนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในทางวิศวกรรมนั้น ได้มีตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 โดย K. Aihara [10] ศาสตราจารย์แห่งมหาวิทยาลัย Tokyo ได้แสดงถึงแนวทางการพัฒนาวิชาวิศวกรรมอลวน และการประยุกต์ใช้พฤติกรรมในงานวิศวกรรมด้านต่างๆ ในประเทศญี่ปุ่นเช่น การควบคุมระบบการหมุนของเครื่องซักผ้า การควบคุมการฉีดน้ำสำหรับเครื่องล้างจานเพื่อให้ประหยัดพลังงาน และสถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (IEEE) ได้ให้ความสำคัญต่อพฤติกรรมอลวนโดยให้ Proceeding IEEE [11] ในเดือนสิงหาคม ปี ค.ศ. 1987 เป็นวารสารฉบับพิเศษสำหรับปรากฏการณ์อลวน โดยเนื้อหาหลักเป็นบทความเกี่ยวกับวงจร Chua และปี ค.ศ. 1993 เฉพาะ IEEE Circuit and System society [12] ได้แสดงแนวทางทบทวนและประยุกต์ในงานวิศวกรรมสื่อสารอีกครั้ง โดยหลังจากนั้น ในปี ค.ศ. 2002 IEEE ได้ออก Proceeding IEEE [13] เป็นวารสารพิเศษอีกครั้งสำหรับการประยุกต์ระบบอลวนสำหรับวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และวิศวกรรมสารสนเทศ เช่นงานเข้ารหัสลับและการสื่อสารแบบกระจายสเปกตรัมการลด Harmonic ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าปรากฏการณ์การอลวนค้นพบโดย Lorenz แต่ก็มีผู้ตั้งคำถามว่า การค้นพบรูปร่างหรือลักษณะแบบอลวนนี้แท้จริงแล้วมีการค้นพบโดยนักศิลปะก่อนหน้านี้หรือไม่[14] โดยได้แสดงภาพวาดศิลปะของ Roberto Cripp ศิลปินในยุคหลังสงครามโลกครั้งที่สอง ได้แสดงเส้นที่มีรูปร่างคล้ายตัวตั้งดูดประหลาดและตัวลักษณะของตัวตั้งดูดดูน่าสนใจและมีความงามศิลปะในตนเอง ดังนั้นได้มีนักวิจัย[15]ได้สร้างสมการอนุพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น 3 ตัวแปรเพื่อให้เกิดลักษณะตัวตั้งดูดแบบต่างๆ เป็นภาพกราฟิกที่มีลักษณะสวยงามและมีผู้รวบรวมรูปแบบตัวตั้งดูดประหลาดมาจากเป็นผลงานทางศิลปะโดยที่เกิดจากการจำลองค่าสมการของ Chua ในพารามิเตอร์ต่างๆ [16]



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างรูปภาพผลงานศิลปะจากการจำลองค่าสมการของ Chua

จากความซับซ้อนของสัญญาณอลวนที่ให้คุณสมบัติทางฮาร์โมนิกที่หลากหลายจึงมีผู้นำเอาสัญญาณอลวนมาดัดแปลงเลียนเสียงเครื่องดนตรี [17] รวมทั้งได้มีผู้ได้นำเอาพฤติกรรมอลวนมาใช้เพื่อเรียบเรียงเพลงด้วยวิธีการแปลงทำนองหลักของเพลงคลาสสิก [18] โดยแปลงระดับเสียง (pitch) ให้เป็นเส้นทางโคจร 3 มิติของตั้งดูดอลวนแบบ Lorenz และ อาศัยสมบัติที่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมที่ไวต่อค่าเริ่มต้นของระบบอลวน ในการสร้างวงโคจรใหม่ที่ใกล้เคียง ในการแปลงเป็นทำนองใหม่จากทำนองหลัก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์การอลวนเป็นปรากฏการณ์ที่ตอบสนองต่อการศึกษาแบบ STEAM ที่มีปรากฏการณ์จากวิทยาศาสตร์ และจำลองรูปแบบโดยคณิตศาสตร์ และสามารถประยุกต์กับงานวิศวกรรมในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งสามารถใช้สร้างสรรค์งานศิลปะทั้งในลักษณะภาพศิลปะและดนตรี

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยเป็นการสร้างของเล่นเพื่อการเรียนรู้ โดยตัวอย่างชุดเรียนรู้แบบต่างๆ ที่ใช้การต่อเชื่อมบล็อกให้เกิดเป็นโครงงานต่างๆ (construction kits) มีดังนี้

1. Flow Blocks[19] เป็นชุดของเล่นเพื่อการศึกษาสำหรับนักเรียนชั้นประถม วิจัยโดยสถาบันเทคโนโลยีแห่ง Massachusetts ที่สร้างแนวคิดใช้บล็อกที่จับต้องได้เป็นชุดของคำสั่งโปรแกรม (tangible program system) โดยบล็อกมี 4 รูปแบบต่อเชื่อมกันด้วยแม่เหล็ก จุดมุ่งหมายเพื่อให้ผู้เรียนได้เข้าใจโครงสร้างการทำงานของโปรแกรม (ตัวแปร การซ้ำ วงลูป) โดยผลของโปรแกรมจากการต่อบล็อกแสดงที่แสงไฟที่วิ่งไปมาในแต่ละบล็อก

2. Lightup[20] พัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัย Stanford เป็นชุดทดลองทางวงจรง่ายๆ ประกอบด้วยบล็อกต่างๆ เช่น สวิตช์ มอเตอร์ หลอดไฟ แบตเตอรี่ บล็อกหลักที่สามารถจะกำหนดคุณสมบัติด้วยการโปรแกรม จากคอมพิวเตอร์ การเชื่อมต่อกันแต่ละกระทำด้วยแม่เหล็ก และมีแสงไฟจากหลอด LED เป็นตัวแสดงการไหลของกระแสไฟในวงจร เมื่อวงจรเกิดปัญหาหรือไม่ทำงานสามารถตรวจสอบและแก้ไขได้โดยใช้เทปเลตถ่ายภาพเพื่อให้โปรแกรมวิเคราะห์และแนะนำข้อแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Turn[21] เป็นงานวิจัยของมหาวิทยาลัย Tufts เป็นการสร้างบล็อกและต่อกันได้แบบ jigsaw เพื่อสร้างโปรแกรมที่ผู้ใช้จับต้องชุดคำสั่งได้เช่นเดียวกับงานวิจัย[19] โดยหลังจากต่อบล็อกเข้าด้วยกันแล้ว ผู้เรียนสามารถแปลงบล็อกเป็นคำสั่งให้คอมพิวเตอร์ทำงานโดยใช้กล้องจับภาพและการแสดงผลบนคอมพิวเตอร์
4. roBlock[22] เป็นงานวิจัยของมหาวิทยาลัย Carnegie Mellon ที่สร้างบล็อกต่างๆ 4 รูปแบบ(บล็อกอเนกประโยชน์ บล็อกตัวตัวจับ, บล็อกตัวกระทำ, และบล็อกลอจิก) โดยแต่ละบล็อกสามารถเชื่อมโยงได้ 3 มิติ ผู้เรียนสามารถเรียนรู้การทำงานตั้งแต่ระดับต่างๆ ตั้งแต่ต่อให้ทำงานง่ายๆ ด้วยบล็อกตรวจจับและบล็อกกระทำแล้วสังเกตผล ระดับกลางที่เมื่อต่อบล็อกเสร็จแล้วส่งผลให้คอมพิวเตอร์แสดงผล และระดับก้าวหน้าที่โปรแกรมบล็อกอเนกประโยชน์ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อให้ทำหน้าที่ตามต้องการ
5. LittleBits [23-24] เป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าที่ยินจัดสิทธิบัตร [25] ตัวผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยบล็อกต่างๆ ที่ฝังตัวด้วยวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์ รูปแบบของแต่ละบล็อก เป็นฟังก์ชัน ทำงานของวงจรเช่นวงจรขยาย วงจรกำเนิดความถี่ และพร้อมด้วยอุปกรณ์ตรวจ จับ สวิตช์ มอเตอร์ จุดประสงค์ของผลิตภัณฑ์ต้องการให้ผู้เรียนสร้างวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์เพื่อตอบสนองจินตนาการและตอบโจทย์ประยุกต์ของตนเอง โดยผู้เรียนไม่จำเป็นต้องมีพื้นฐานในเรื่องอิเล็กทรอนิกส์และทักษะในการต่อวงจร ในการเชื่อมโยงกันแต่ละบล็อกต่อกันด้วยแม่เหล็กได้โดยไม่ต้องคำนึงเรื่องขั้วของแหล่งจ่ายและการต่อวงจรผิด
6. PicoCriket [26] เป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าที่เป็นบอร์ดที่สามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตและสามารถเชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์โดยผ่านพอร์ต USB โดยบนบอร์ดประกอบด้วยปุ่มกด ปุ่มเลื่อน ตัวตรวจจับแสงและเสียง ตัวบอร์ดจะช่วยให้ผู้เรียนระดับชั้นประถมศึกษาจินตนาการต่างๆ โดยทำงานร่วมกับโปรแกรม Scratch ที่สามารถสร้างภาพเคลื่อนไหว หรือเกมง่ายๆ
7. LilyPad Anduino[27] เป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าที่เป็นชุดอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์แบบเปิด(open source hardware) สามารถโปรแกรมได้ด้วยภาษาชั้นสูงเช่นภาษาซี โดย LilyPad เป็นบอร์ดออกแบบให้ผู้เรียนระดับมัธยมปลายถึงอุดมศึกษานำไปประยุกต์เป็น คอมพิวเตอร์แบบสวมใส่(wearable computer)[28] หรือแสดงความคิดสร้างสรรค์โดยการนำไปประดับเสื้อผ้า
8. Lego mindstroms[29] ผลิตภัณฑ์ทางการค้าที่เป็นชุดทดลองประกอบด้วยโมดูลที่โปรแกรมได้ และชิ้นส่วนต่างๆ กว่า 700 ชิ้นที่ต่อแบบเชื่อมต่อแบบตัว lego ตัวโมดูลที่โปรแกรมได้นี้เรียกว่า Brick[30] ประกอบด้วย CPU และส่วนที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ส่วนเชื่อมต่อกับตัวตรวจจับและตัวกระทำแบบต่างๆ รวมทั้งมอเตอร์ อุปกรณ์รอบข้างนอกจากตัว Brick มีไว้ให้ผู้เรียนได้ออกแบบสร้างเป็นโครงงานเช่นหุ่นยนต์ ในการควบคุมตัว Brick สามารถใช้ภาษาแบบกราฟิก และภาษาที่เป็นรูปแบบคำสั่งคล้ายภาษาซี[31] ที่ออกแบบโดยผู้พัฒนาผลิตภัณฑ์เอง ได้มีนักศึกษานำชุดทดลอง Lego mindstroms ไปใช้กับการเรียน ตั้งแต่ระดับประถม[32] จนถึงระดับอุดมศึกษา[33]

นอกจากตัวอย่างชุดเรียนรู้ที่ 5-8 ที่จดทะเบียนเป็นเครื่องหมายการค้าและมีสิทธิบัตรคุ้มครองสินค้าของตนเองแล้ว สำหรับตัวอย่างสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับของเล่นเพื่อการ ศึกษาจากการสืบค้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้แก่

สิทธิบัตรประเทศสหรัฐอเมริกาหมายเลข 7214066 [34] เป็นสิ่งประดิษฐ์ของเล่นเพื่อการศึกษาสำหรับสอนเรื่องตัวอักษรและตัวเลขโดยจดสิทธิบัตรควบกับสิทธิบัตรหมายเลข 7217135 [35] ตัวสิทธิบัตรอ้างสิทธิการที่ผู้เรียนเรียงบล็อกเป็นตัวอักษรบนบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ที่ผู้ประดิษฐ์สร้างขึ้นโดยบอร์ดจะเชื่อมต่อเพื่อแสดงการสะกดบนคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิทธิบัตรประเทศสหรัฐอเมริกาหมายเลข 7316567[36] เป็นการสร้างโปรแกรมแบบผู้ใช้บังคับชุดคำสั่งได้ โดยชุดคำสั่งใช้บล็อกที่เป็นอุปกรณ์ฝังตัวอิเล็กทรอนิกส์สามารถต่อซ้อนกันเพื่อส่งชุดคำสั่งไปควบคุมหุ่นยนต์ การอ้างสิทธิกล่าวถึงเทคนิคการสร้างวงจรรายในบล็อกเพื่อให้มีความสามารถในการต่อซ้อนกันได้

สิทธิบัตรประเทศสหรัฐอเมริกาหมายเลข 7927103 [37] เป็นชุดสอนวิชาคณิตศาสตร์ ระดับชั้นประถม เพื่อแก้ปัญหาเครื่องเศษส่วนหรือปัญหาร้อยละ ด้วยการใช้วัสดุที่จับต้องได้ลักษณะเช่นเดียวกับดินน้ำมัน โดยอุปกรณ์สามารถแบ่งหรือแปลงเป็นรูปต่างๆ เพื่อให้นักเรียนได้เข้าใจเป็นรูปธรรม

คำขอสิทธิบัตรประเทศสหรัฐอเมริกาหมายเลข 2013295536 [38] เป็นชุดอุปกรณ์สอนคณิตศาสตร์เรื่องเศษส่วนโดยอุปกรณ์แบบจอภาพ LCD ที่แสดงผลการเรียนรู้ในอยู่ในรูปกราฟิกเพื่อให้ผู้เรียนได้เข้าใจได้ง่าย

สำหรับการใช้ปรากฏการณ์ลอเรนในการเรียนรู้สำหรับนักเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย มีผู้เสนอการใช้วงจรของ Chua [39] ซึ่งเป็นวงจรลอเรนแบบง่ายที่มีอุปกรณ์ไม่มากแต่ให้รูปแบบสัญญาณได้หลากหลายรูปแบบเพื่อให้นักเรียนได้เรียนรู้พฤติกรรมลอเรน โดยผู้เสนอให้นักเรียนที่ยังไม่มีทักษะอิเล็กทรอนิกส์ประกอบวงจรลงบนแผ่น PCB โดยใช้เวลาไม่มากนัก และในงานวิจัย [40] ของกลุ่มนักจิตวิทยาการเรียนรู้ได้ต่อยอดงานวิจัย[39]โดยนำสัญญาณจากวงจร Chua ที่นักเรียนประกอบขึ้นมาด้วยตนเองต่อกับการ์ดเสียงที่ผู้วิจัยได้พัฒนา freeware สำหรับแสดงผลของสัญญาณให้อยู่ในรูป 3 มิติหรือบรรเลงเป็นทำนองเพลง เพื่อให้นักเรียนได้เรียนรู้และเกิดจินตนาการในการสร้างผลงานทางศิลปะ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้วงจร Chua จะสร้างได้ง่ายแต่การอธิบายรูปแบบของสมการกระทำได้อากต่อนักเรียนในระดับมัธยมปลาย

สำหรับการใช้ปรากฏการณ์ลอเรนในการเรียนรู้ระดับอุดมศึกษาโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในการศึกษาฟิสิกส์ เช่นวารสารของสมาคมวิชาชีพรูฟิสิกส์แห่งประเทศไทยสหรัฐอเมริกา [41] ได้เสนอการสร้างการทดลองศึกษาปรากฏการณ์ตัวกำเนิดสัญญาณแบบ Impact โดยต่อวงจรทดลองและวัดผลด้วยออสซิลโลสโคป ในบทความ [42] เป็นการสร้างระบบทางกลเพื่อจำลองระบบ Duffing ที่วัดผลโดยออสซิลโลสโคปเช่นกัน สำหรับการศึกษาด้านวิศวกรรมไฟฟ้านั้น มีผู้เสนอแนวทางการเรียนรู้พฤติกรรมลอเรนในวารสาร IEEE transaction Education [43] โดยแสดงการใช้โปรแกรมจำลองวงจร Pspice ทำการจำลองสมการที่ทำให้เกิดสัญญาณลอเรนแบบต่างๆ เช่นสมการของระบบ Lorenz, Rossler และการจำลองการเกิดปรากฏการณ์ลอเรนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบง่ายๆ สำหรับการทดลองโดยเสนอรูปแบบวงจรไฟฟ้าร่วมกับคอมพิวเตอร์นั้น มีนักวิจัยทางศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น [44] เสนอการสร้างวงจร Chua ที่ควบคุมได้โดยคอมพิวเตอร์และแสดงผลของโดเมนเวลาด้วยคอมพิวเตอร์ และในบทความ [45] แสดงการออกแบบบอร์ดทดลองการสร้างสัญญาณลอเรนแบบผสมสามารถกำเนิดสัญญาณได้มากกว่า 1 ชนิด รวมทั้งบทความ [46] ได้แสดงการสาธิตการต่อวงจรจริงของสมการ Lorenz, Duffing ให้นักศึกษาได้ทราบพฤติกรรมในทางปฏิบัติ และสำหรับการทดลองทางทฤษฎีลอเรนโดยการจำลองผลบนคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมสำเร็จรูป เช่น SIMULINK นั้นได้มีผู้เสนอในบทความ [47] เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎี

นิยาม

ตัวดึงดูด (Chaotic attractor) หรือ ตัวดึงดูด แบบประหลาด (strange attractor) เป็นเส้นทางโคจร (trajectory) ที่มีขอบเขตอยู่ใน space ขนาด 3 มิติ โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ถ้าให้ A เป็นขนาดขอบเขตใน 3 มิติแล้ว ทุกๆ เส้นทางโคจรใน A จะอยู่ใน A ตลอดไป และถ้าค่าเริ่มต้นนอกขอบเขตของ A แล้วในเวลาต่อมาเส้นทางโคจรจะต้องอยู่ใน A เราเรียกคุณสมบัติแบบนี้ว่าคุณสมบัติดึงดูด (attractor) หรือเรียกว่า attractor ถ้า $A \subset \mathbb{R}^n$ และ U เป็นค่าใกล้เคียง นอกบริเวณ A แล้ว x จะเป็นเส้นทางโคจรของตัวดึงดูด

$$\forall x \in U : \varphi(x, t) \in A \quad \text{for } t \geq 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(x, t) = A \quad (2.1)$$

2. ตัวดึงดูดมีความไวขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้น (Sensitive dependence on the initial conditions) ถ้าให้ x เป็นเส้นทางโคจรของตัวดึงดูด และ s เป็นเซตที่แสดงว่าไวต่อค่าเริ่มต้นแล้ว

$$\exists \delta > 0 \quad \forall x(0) \in s, \quad \varepsilon > 0, \quad \exists y \in s :$$

$$|x(0) - y(0)| < \varepsilon, \quad |x(t) - y(t)| > \delta \quad (2.2)$$

3. ตัวดึงดูดไม่สามารถแยกเป็นเซตย่อยได้ (Indecomposability) แม้แต่ให้ attractor ท่างกันเล็กน้อยดังนั้น attractor มีรายคาบยาวมากๆ

สำหรับคุณสมบัติที่สำคัญที่แสดงว่าตัวดึงดูด เป็นอลวน คือคุณสมบัติที่ไวต่อค่าเริ่มต้น ซึ่งเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้นให้ต่างกันเพียงเล็กน้อย เส้นทางโคจรก็จะให้ลักษณะที่ต่างกันโดยสิ้นเชิงนั้น เราสามารถวัดค่าความไวนี้ได้โดย Lyapunov exponents ซึ่งแสดงเส้นทางโคจรของ x เมื่อ เวลา t ได้คือ

$$|x(t)| = |x(0)|e^{\lambda t} \quad (2.3)$$

โดย λ เป็นค่า Lyapunov เนื่องจากอลวนติกตัวดึงดูด เกิดขึ้นในมิติขนาด 3 มิติดังนั้นเงื่อนไขที่แสดงความไวต่อค่าเริ่มต้น ของสมการที่ (2.2) ค่า Lyapunov ของทิศทางของการเคลื่อนที่ใน 3 มิติ (x, y, z) จะต้องมี ค่าเป็น บวก 1 ค่าเพื่อแสดงทิศทางของการแยกจากกัน (stretch) ของเส้นทางโคจรของตัวดึงดูด และเพื่อให้ตัวดึงดูด อยู่ในขอบเขตจะต้องมีค่า Lyapunov เป็นลบหนึ่งค่าเพื่อแสดงการพับเข้า (fold) และมีค่า Lyapunov เป็น 0 อยู่หนึ่งค่าเพื่อแสดงทิศทางของการไหลของตัวดึงดูด หรือกล่าวได้ว่า ค่า ถ้าตัวดึงดูดเกิดขึ้นใน 3 มิติและเป็นอลวนแล้ว ถ้า λ_1 เป็น Lyapunov ที่มากที่สุด และ λ_3 เป็นค่า Lyapunov ที่น้อยที่สุดแล้วค่า Lyapunov ของระบบจะแสดงค่า $\lambda_1 > \lambda_2 = 0 > \lambda_3$ ซึ่งมีค่า (+, 0, -) โดยในระบบที่มีขอบเขตค่า $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 < 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3. การสร้างตัวดึงดูดแบบต่างๆ

2.3.1 ตัวดึงดูดแบบ Lorenz

เป็นตัวดึงดูด แรกที่รู้จักกันที่ค้นพบโดย E.N Lorenz [5] จากการสร้างแบบจำลองพยากรณ์อุตุนิยมวิทยาของการแปรผันของสภาวะอากาศ โดยแบบจำลองแสดงได้ โดยสมการอนุพันธ์ลำดับ 3 คือ

$$x' = -ax + ay \quad (2.4.1)$$

$$y' = rx - y - xz \quad (2.4.2)$$

$$z' = -bz + xy \quad (2.4.3)$$

จากสมการเป็นการแสดงการไหลของอากาศจากการนำความร้อน โดยอากาศร้อนจะไหลขึ้นที่สูงและอากาศเย็นจะตกสู่ระดับล่างเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก โดยการเคลื่อนที่ในลักษณะวงแหวน ตัวแปร x ขึ้นอยู่กับการนำความร้อน และตัวแปร y และ z จะเป็นการวัดการกระจายของความร้อนรอบๆ วงแหวนในงานวิจัย Lorenz ได้ให้ $a=10$, $b = 8/3$ และค่า r . กำหนดให้เป็นพารามิเตอร์ควบคุมโดยปรับให้มีขนาดต่างๆ

จากสมการ (2.4) หาจุดสมดุลของระบบโดย $x'=y'=z'=0$ จะได้ $y=x, z=r-1$ และ $x^2 = y^2 = b(r-1)$ ดังนั้นระบบจะมีจุดสมดุลอยู่ 3 จุดคือที่ $P^0 = (0,0,0)$ และ $P^\pm = (\pm\sqrt{b(r-1)}, \pm\sqrt{b(r-1)}, r-1)$ โดยจุดสมดุลที่ P^\pm และ P^0 จะเกิดขึ้นเมื่อค่า $r > 1$ จากสมการที่ (4) เพื่อหาคุณสมบัติของระบบ ทำการหาค่า Jacobian matrix ซึ่งแสดงได้

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial x} & \frac{\partial f_x}{\partial y} & \frac{\partial f_x}{\partial z} \\ \frac{\partial f_y}{\partial x} & \frac{\partial f_y}{\partial y} & \frac{\partial f_y}{\partial z} \\ \frac{\partial f_z}{\partial x} & \frac{\partial f_z}{\partial y} & \frac{\partial f_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

โดยค่า Jacobian matrix ของสมการที่ (4) มีค่า

$$J = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ r-z & -1 & -x \\ y & x & -b \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

สมการคุณสมบัตินี้ของระบบหาได้จาก $|J - \lambda I|$ โดยที่จุดสมดุล P^0 มีสมการคุณสมบัตินี้คือ

$$\lambda^3 + (a+b+1)\lambda^2 + (a-ar+ab+b)\lambda + ab(1-r) \quad (2.7)$$

และที่จุดสมดุล P^\pm มีสมการคุณสมบัตินี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda^3 + (a+b+1)\lambda^2 + b(a+r)\lambda + 2ab(r-1) \quad (2.8)$$

ค่า eigen ซึ่งเป็นค่าแสดงพฤติกรรมของระบบหาได้จากให้ $|J-\lambda I|=0$ ดังนั้นที่จุดสมดุล P^0 ในกรณี $r < 1$ ค่า eigen ทั้งหมด 3 ค่าจะเป็นค่าจริงและเป็นลบหรืออยู่ด้านซ้ายของระนาบ S (S Plane) และถ้าหาก $r > 1$ แล้วระบบจะมีค่า eigen 1 ค่าเป็นค่าจริงบวกอยู่ด้านขวาของระนาบ S โดยถ้าหากให้ index k แสดงจำนวนค่ารากอยู่ด้านขวาของระนาบ S แล้ว เมื่อ $r > 1$ ระบบจะมีค่า index = 1 และจุดที่นี้เส้นทางโคจรจะมีทั้งเคลื่อนที่เข้าและออก (Saddle point index 1) สำหรับที่จุดสมดุล P^\pm จะเกิดขึ้นเมื่อ $r > 1$ ดังนั้น ถ้าให้ $a_1 = (a+b+1)$, $a_2 = (a+r)b$, $a_3 = 2ab(r-1)$ แล้วจากเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz ระบบจะมีเสถียรภาพภายใต้เงื่อนไขเมื่อ $a_1 > 0$, $a_2 > 0$, $a_3 > 0$ หรือ $a_1 a_2 - a_3 > 0$ ซึ่งเขียนได้

$$(a+b+1)(a+r)b - 2ab(r-1) > 0 \quad (2.9)$$

ดังนั้นที่จุดสมดุล P^\pm ระบบจะมีเสถียรภาพถ้า

$$r < \frac{a(a+b+3)}{a-b-1} \quad (2.10)$$

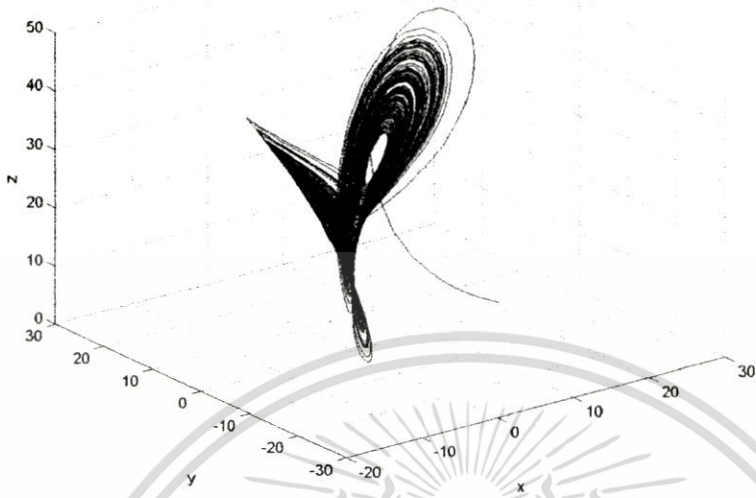
และในทางตรงกันข้ามถ้าให้ $a = 10$, $b = 8/3$ และถ้าให้ $r > \frac{470}{19}$ ซึ่งทำให้ระบบไม่มี

เสถียรภาพที่จุดสมดุล P^\pm จะมีค่ารากเป็นบวก 1 ค่าอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบ S และมีรากเป็น $\sigma \pm j\omega$ 1 คู่อยู่ด้านขวามือของระนาบ S ซึ่งที่จุดสมดุล P^\pm นี้ เส้นทางโคจรจะแสดงการไหลเข้าและหมุนออกหรือเรียกว่า eigen มีลักษณะเป็น Spiral saddle index 2 ดังนั้นจากจุดสมดุลถ้าที่ P^0 แทนการไหลเข้าและไหลออกและที่จุด P^\pm แทนการไหลเข้าและหมุนออกแล้ว หลังจากค่าเริ่มต้นเส้นทางโคจรไม่สามารถออกจากตัวดึงดูด ได้ ดังนั้นเมื่อตัวดึงดูด ไหลออกจากจุดสมดุล P^0 แล้วจะไหลเข้าสู่สมดุล P^+ หรือ P^- และที่สองจุดนี้จะแทนจุดหมุนออกซึ่งอาจจะหมุนรอบจุดสมดุลนี้หรือไหลกลับเข้าสู่จุดสมดุล P^0 ซึ่งพฤติกรรมนี้จะเกิดการไหลวนในลักษณะหลากหลายหรือแสดงสภาวะ (Chaotic attractor) และเพื่อแสดงว่าระบบ Lorenz เป็นระบบที่มีขอบเขตค่า divergence ของการไหลของตัวดึงดูด ต้องอยู่ในเงื่อนไข

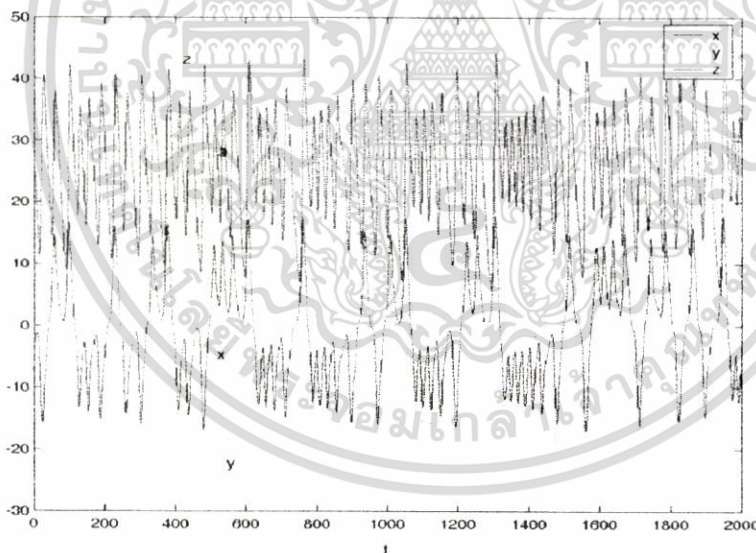
$$\nabla F = \frac{\partial Fx}{\partial x} + \frac{\partial Fy}{\partial y} + \frac{\partial Fz}{\partial z} < 0 \quad (2.11)$$

และสำหรับค่า Lyapunov ของระบบ Lorenz มีค่า $\lambda_1 = 0.9, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -14.57$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ตัวดึงดูดแบบ Lorenz



รูปที่ 2.3 ตัวดึงดูดแบบ Lorenz ในแกนเวลา

2.3.2 ตัวดึงดูดของ Chen

เป็นตัวดึงดูด ค้นพบโดย Chen[50] โดยเกิดจากการควบคุมระบบ Lorenz ให้ไปในทิศทางที่ขาดเสถียรภาพยิ่งขึ้นหรือ ทำให้ระบบที่เป็นออสซิลเลชันอยู่แล้วให้เป็นออสซิลเลชันมากขึ้น ซึ่งโดยกระทำด้วยการให้ค่าควบคุมเข้าที่ y' ของระบบ Lorenz หรือแสดงได้

$$\begin{aligned}x' &= -ax + ay \\y' &= cx - y - xz + u \\z' &= -bz + xy\end{aligned}\quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าควบคุมมีค่า $u = k_1x + k_2y + k_3z$

จากสมการ (2.12) เราสามารถหาจุดสมดุลของระบบโดยให้ $x' = y' = z' = 0$ แล้วจะได้จุดสมดุลจุดแรกคือ $P^0 = (0,0,0)$ และเมื่อให้ $x = y$ จะได้ $z = \frac{1}{b}x^2$ ดังนั้นระบบจะมีจุดสมดุลอีก 2 จุดที่ P^\pm คือ $x = y = \frac{1}{2}k_3 \pm \frac{1}{2}\sqrt{k^3 + 4(b+k_1+k_2-11)}$, $z = \frac{1}{b}x^2$ จากสมการ(2.12) หาค่า Jacobian matrix ของระบบได้คือ

$$J = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c+k_1-z & k_2-1 & k_3-x \\ y & x & -b \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

โดยที่จุดสมดุล $(0,0,0)$ ค่า k_3 ไม่มีผลต่อการเกิดค่า eigen เลือกให้ $k_3 = 0$ ดังนั้นค่าสมการคุณสมบัติที่จุดสมดุล P^\pm มีค่า

$$\lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 \quad (2.14)$$

โดย $a_1 = (a+b-k_2+1)$, $a_2 = (ab-ac+a+b+az+x^2-k_1a-k_2a-k_2b)$ และ $a_3 = (ab-abc+ax^2+axy+abz-k_1ab-k_2ab)$ จากเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz เพื่อให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ ระบบ Chen เลือกให้ $k_1 = a$ $k_2 = 1+c$ ดังนั้นได้ค่าตัวควบคุมใหม่คือ $u = -ax + (1+c)y$ ทำให้สมการของระบบ Chen แสดงได้

$$\begin{aligned} x' &= -ax + ay \\ y' &= (c-a)x - ay - xz \\ z' &= -bz + xy \end{aligned} \quad (2.15)$$

จากสมการเพื่อให้ระบบเป็นระบบ dissipative

$$\nabla F = \frac{\partial Fx}{\partial x} + \frac{\partial Fy}{\partial y} + \frac{\partial Fz}{\partial z} = -a + c - b < 0 \quad (2.16)$$

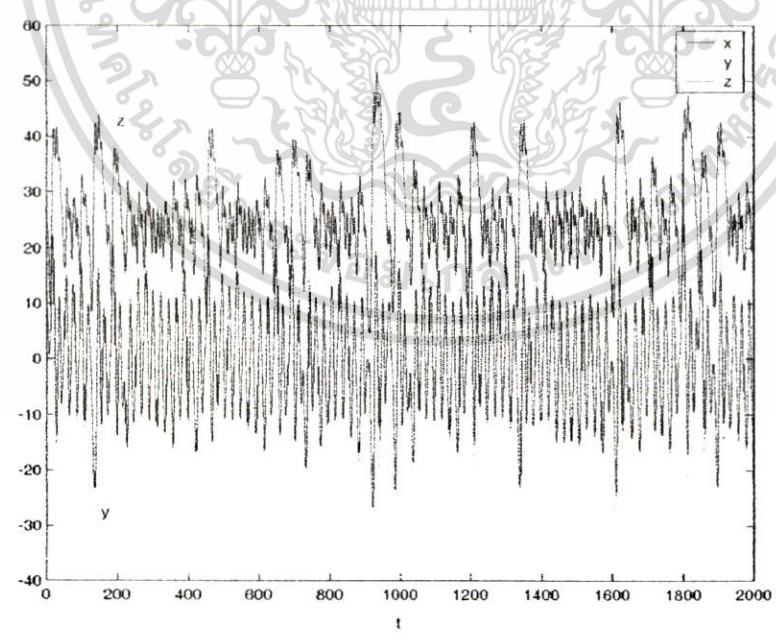
ระบบ Chen เลือกให้ $a = 35, b = 8/3, c = 28$ ซึ่งเป็นที่อยู่สมดุล P^0 จะมีค่า eigen เป็น saddle index 1 และที่จุดสมดุล P^\pm มีค่า eigen เป็น spiral saddle index 2 และระบบมีค่า $\lambda_1 = 2.18, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -11.85$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ Chen เลือกให้ $a = 35, b = 8/3, c = 28$ ซึ่งเป็นที่อยู่สมดุล P^0 จะมีค่า eigen เป็น saddle index 1 และที่อยู่สมดุล P^\pm มีค่า eigen เป็น spiral saddle index 2 และระบบมีค่า $\lambda_1 = 2.18, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -11.85$



รูปที่ 2.4 ตัวดึงดูดแบบ Chen



รูปที่ 2.5 ตัวดึงดูดแบบ Chen ในแกนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ตัวดึงดูดแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen แบบง่าย

ในกรณีที่ตัวดึงดูดสร้างขึ้นเพื่อให้มีสมบัติทางพฤติกรรมทั้งแบบ Lorenz และ Chen นั้นระบบที่ปรับได้มีตัวอย่างดังนี้ ระบบแบบ unified ซึ่งเสนอโดย Lu [51] แสดงสมการได้

$$\begin{aligned}x' &= (25\alpha + 10)(x - y) \\y' &= (28 - 35\alpha)x - xz + (29\alpha - 1)y \\z' &= -\left(\frac{\alpha + 8}{3}\right)z + xy\end{aligned}\quad (2.17)$$

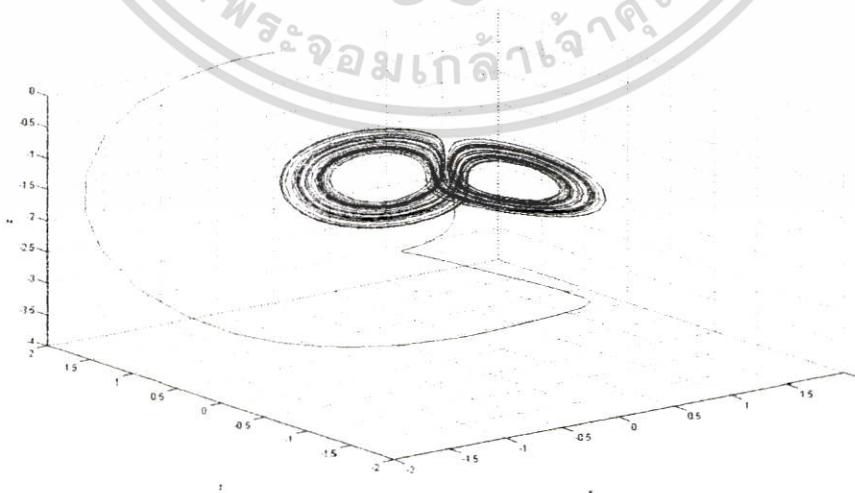
จากสมการถ้าค่า $\alpha = 0$ ระบบแสดงพฤติกรรมเป็น Lorenz และ $\alpha = 1$ ระบบแสดงพฤติกรรมเป็นระบบ Chen และ มีผู้เสนอระบบ Generalize [52] ที่สามารถปรับพฤติกรรมระบบได้เช่นเดียวกัน โดยแสดงรูปสมการในรูป Canonical คือ

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -xz \\ xy \end{bmatrix}\quad (2.18)$$

โดยระบบ(2.18) ให้รูปแบบตัวดึงดูดอสมมาตรบนแกน z สำหรับตัวดึงดูดที่ปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen แบบง่ายนั้นค้นพบโดย Wang และ Chen [53] แสดงได้

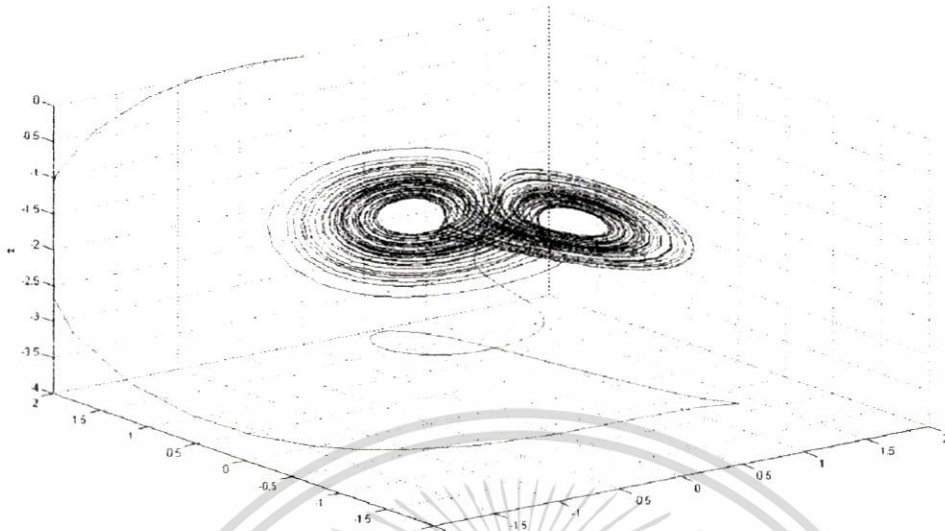
$$\begin{aligned}x' &= r(x - y) \\y' &= -x + ry - xz \\z' &= -0.1z + xy\end{aligned}\quad (2.19)$$

โดยระบบ(2.19) มีตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้นคือ xy และ xz เช่นเดียวกับระบบ Lorenz และ Chen โดยพารามิเตอร์ที่ทำให้ระบบเปลี่ยนแปลงคือ r

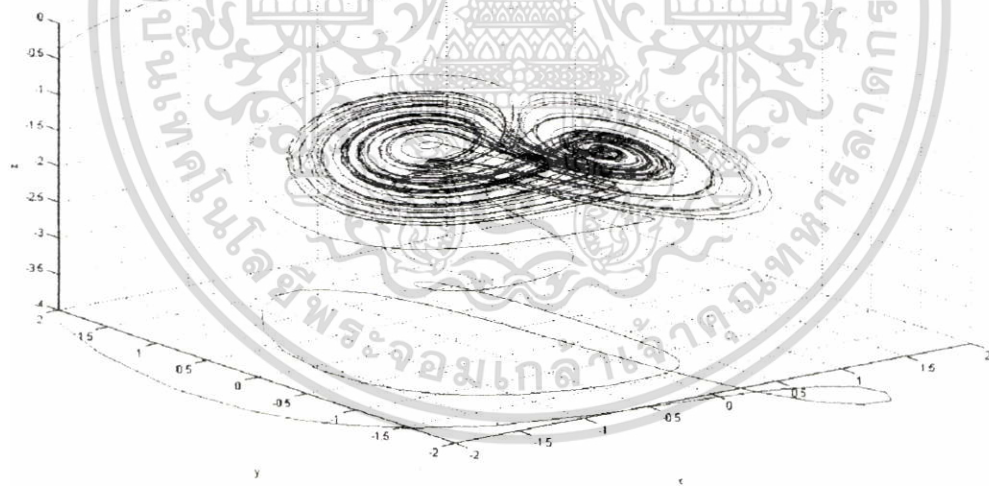


รูปที่ 2.6.1 ตัวดึงดูดแบบ Wang และ Chen เมื่อ $r=0.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

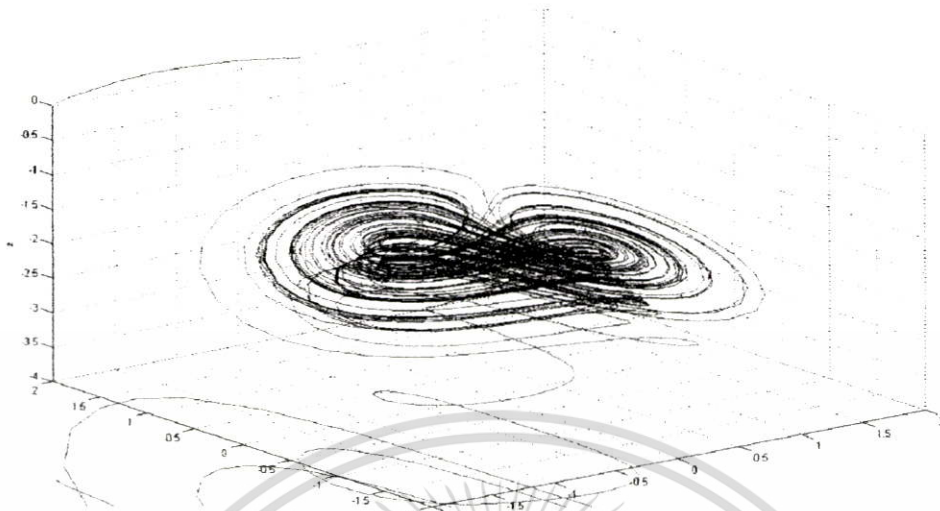


รูปที่ 2.6.2 ตัวดึงดูดแบบ Wang และ Chen เมื่อ $r=0.3$



รูปที่ 2.6.3 ตัวดึงดูดแบบ Wang และ Chen เมื่อ $r=0.5$

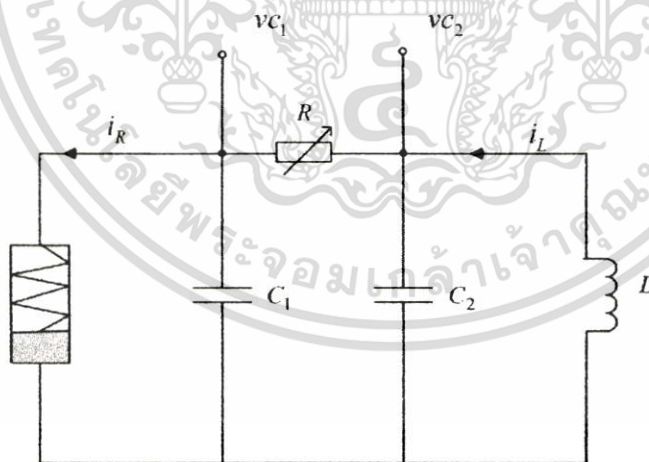
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6.4 ตัวดึงดูดแบบ Wang และ Chen เมื่อ $r=0.7$

2.3.4 วงจร Chua

วงจร Chua [54] เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถสร้างสัญญาณอลวนที่มีความหลากหลายมากที่สุด และสร้างได้ง่าย โดยวงจรประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว และอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีก 1 ตัว



รูปที่ 2.7 วงจร Chua

วงจร Chua แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว คือตัวเก็บประจุ 2 ตัว, ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว, ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว และตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตัว แสดงสมการของระบบได้ดังสมการที่ (2.20)

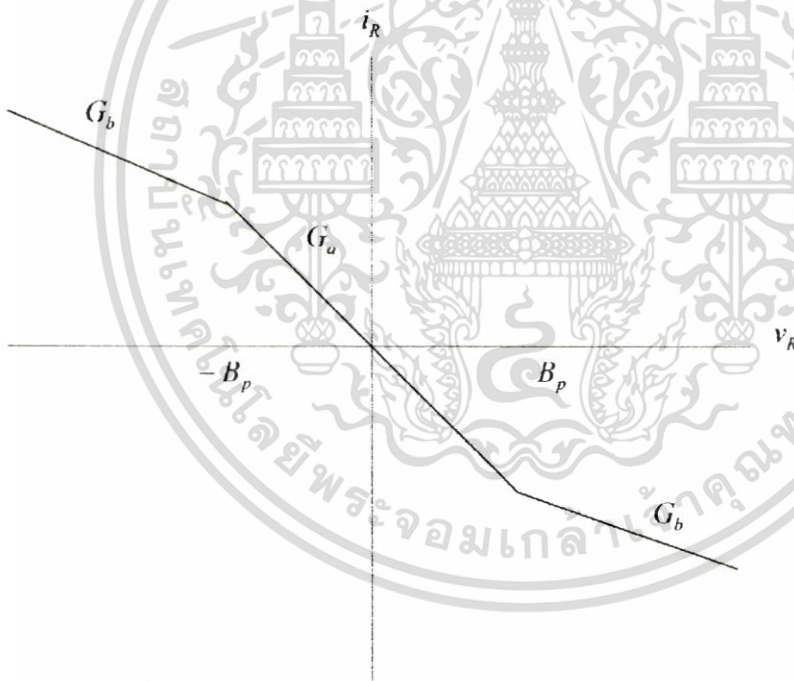
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{dv_{c_1}}{dt} &= \frac{1}{R}(v_{c_2} - v_{c_1}) - f(v_{c_1}) \\
 C_2 \frac{dv_{c_2}}{dt} &= \frac{1}{R}(v_{c_1} - v_{c_2}) + i_L \\
 L \frac{di_3}{dt} &= -v_{c_2}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

โดย

$$i_R = \hat{f}(v_R) = G_b v_R + \frac{1}{2}(G_a - G_b) \left\{ |v_R + B_p| - |v_R - B_p| \right\} \tag{2.21}$$

จากสมการที่ (2.21) เป็นการแสดงคุณสมบัติของความต้านทานลบแบบ 3-segment (3-segment odd-symmetric voltage-current characteristic) ของตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือ Chua ไดโอด โดยมีค่าชันเป็น G_a, G_b และจุดแรงดัน breakpoint อยู่ที่ $v_R = -B_p$ และ $v_R = B_p$ โดยที่ $v-i$ characteristic ของ Chua ไดโอด แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 $v-i$ characteristic ของ Chua ไดโอด

สมการอนุพันธ์ (differential equation) แสดงในสมการ (2.20) นั้นเป็นระบบ *autonomous dynamical system* หรือไม่ต้องการสัญญาณขับจากภายนอกเข้าสู่ระบบ ระบบสามารถกำเนิดสัญญาณตามคุณสมบัติธรรมชาติ (natural dynamics) เมื่อ R, L และ C_1, C_2 ในวงจร Chua มีค่าเป็นบวกจากจุดที่แสดงถึงพลังงานสะสม ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะทำงานเพื่อกำเนิดสัญญาณ

เมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรในของสมการสถานะ (state equation) ในสมการ (2.20) ให้อยู่ในรูปที่ไม่มีมิติ (dimensionless)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

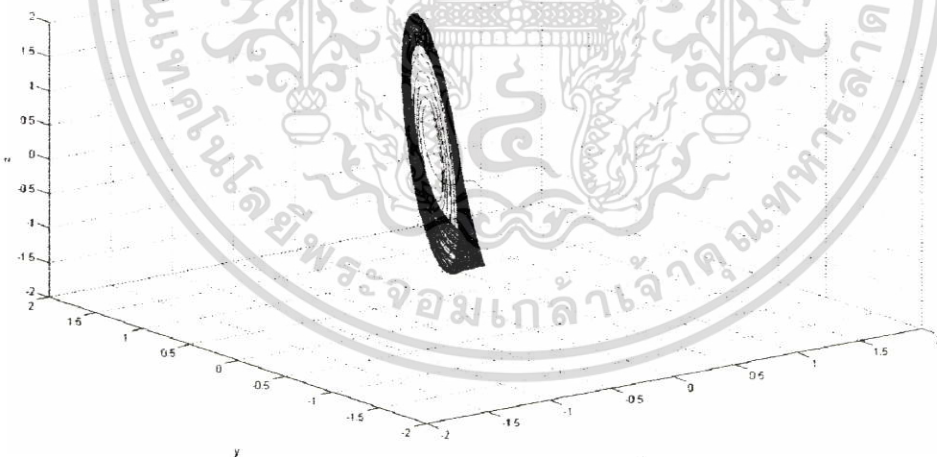
$$\begin{aligned}
 \frac{dx}{d\tau} &= k\alpha(y-x-f(x)) \\
 \frac{dy}{d\tau} &= k(x-y+z) \\
 \frac{dz}{d\tau} &= -k\beta y
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

โดย

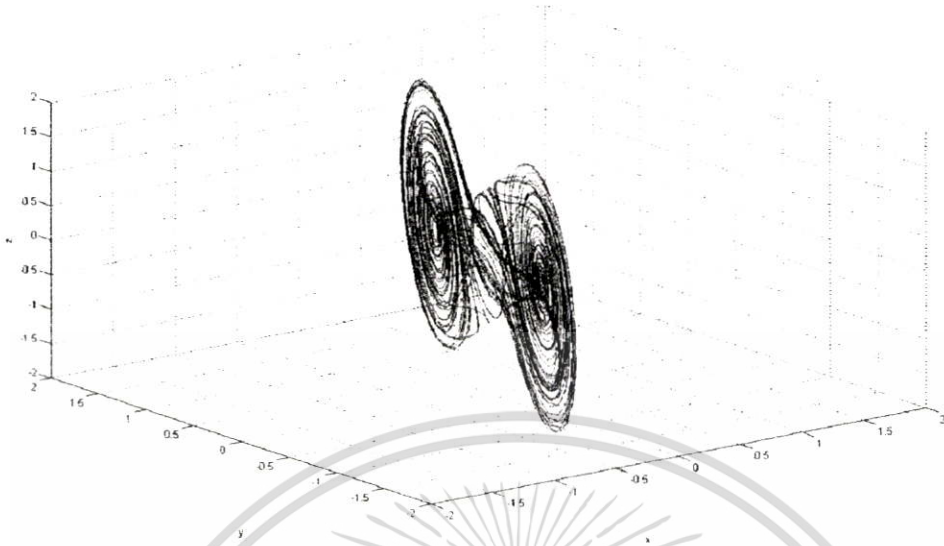
$$f(x) = bx + \frac{1}{2}(a-b)\{|x+1| - |x-1|\}$$
(2.23)

และ

$$\begin{aligned}
 x &\equiv \frac{Vc_1}{B_p}, y \equiv \frac{Vc_2}{B_p}, z \equiv \frac{i_L R}{B_p} \\
 \alpha &\equiv \frac{C_2}{C_1}, \beta \equiv \frac{R^2 C_2}{L}, \tau \equiv \frac{t}{RC_2} \\
 a &\equiv RG_a, b \equiv RG_b
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



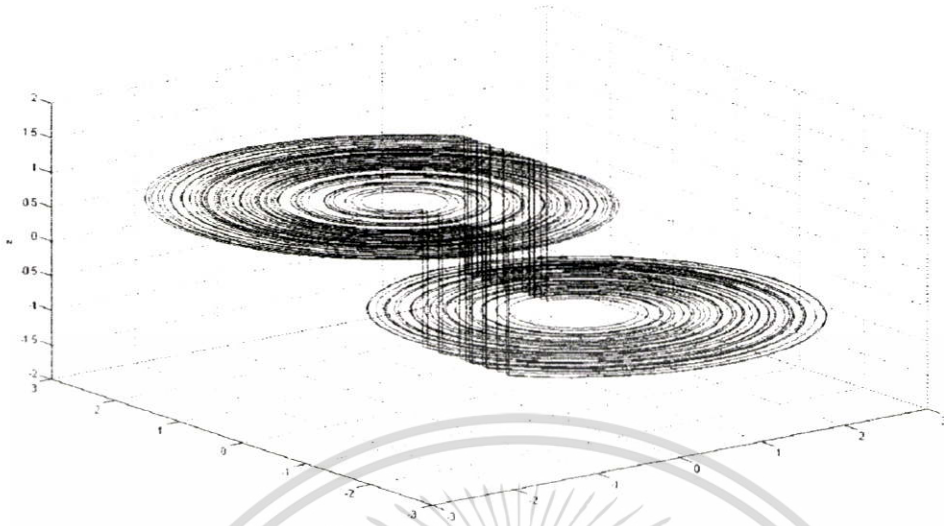
รูปที่ 2.9 ตัวดึงดูดแบบ Chua

2.3.5 ระบบอลวนแบบ autonomous อันดับสอง (Second-order autonomous chaotic system)
 เสนอโดย Cook[55] ระบบแสดงได้โดยสมการอนุพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นอันดับสองมีอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น(nonlinear function)คือ Hysteresis: $hys(x)$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ hys(x) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

จากระบบของ Cook เป็นระบบประกอบด้วยระบบเชิงเส้นอันดับ 2 ที่ไม่มีเสถียรภาพโดยมีอุปกรณ์ Hysteresis เป็นตัวป้อนกลับจากและตัวระบบเชิงเส้นมี complex conjugate eigenvalues บน Right Half Plane (RHP):

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่. 2.10 ตัวดึงดูดของระบบอลวนแบบ autonomous อันดับ 2

ตารางที่ 2.1 แสดงฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

	ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น	นิยาม
1	Heaviside	$H(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$
2	Signum	$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$
3	Hysteresis	$\text{hys}(x) = \begin{cases} +1, & -1 < x < \infty \\ -1, & -\infty < x < 1 \end{cases}$
4	Saturation	$\text{sat}(x) = \begin{cases} 1 & x > L \\ kx & x < L \\ -1 & x < -L \end{cases}$ โดย $L = \frac{x}{k}$, k เป็นอัตราขยาย.

2.3.6 ระบบอลวนแบบ autonomous อันดับ 3 (Third-order autonomous chaotic system)

เป็นระบบของ Sprott [56] ผลของวงจรจะได้ตัวดึงดูดสองสกรอร์เช่นเดียวกับระบบ (2.25) โดยระบบอันดับ 3 แสดงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f(x) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

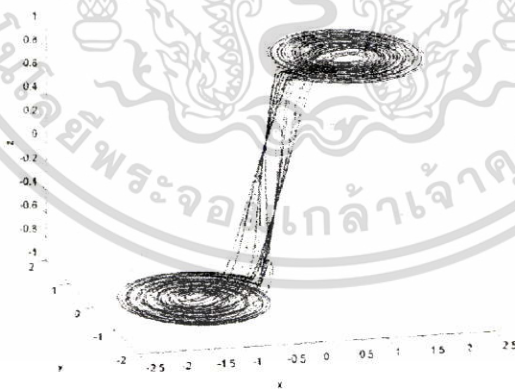
โดย $f(x) = \text{sgn}(x)$ เป็นฟังก์ชันเครื่องหมาย และ ค่า α เป็นค่าพารามิเตอร์ bifurcation $[0.5, 0.9]$ อยู่ระหว่างโดยระบบนี้มีแกนของ quadrature oscillator อยู่ที่ระนาบ $y-z$ จากระบบ (2.26) สามารถดัดแปลงได้คือ

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f(x) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

โดย α เป็นค่าพารามิเตอร์ bifurcation มีค่าระหว่าง $[0.1, 0.3]$.

และในรูปแบบเดียวกันสามารถดัดแปลงให้ quadrature oscillator อยู่ที่ระนาบ $x-y$ โดยระบบสามารถสามารถให้รูปแบบตัวดึงดูดได้ตั้งแต่ 1 สกอร์หรือ 2 สกอร์โดยค่า $f(x)$ เป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นตามตารางที่ 2.1

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & \alpha & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f(x) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.11 ตัวดึงดูดของระบบ autonomous อันดับ 3 โดยใช้ฟังก์ชันเครื่องหมาย

จากระบบ(2.28) ประกอบด้วยด้วยระบบเชิงเส้นอันดับ 3 โดย quadrature oscillator อยู่ที่ระนาบ $x-y$ เป็นระบบย่อยที่ไม่มีเสถียรภาพ โดยการเพิ่มสแตต z สำหรับเป็นระนาบไฮเปอร์ถ้า α ที่เป็นค่าพารามิเตอร์ bifurcation มีค่า >1 ระบบแสดงเป็นระบบสูญเสียที่รับประกันว่าการเกิดสภาพอลวนจะมีเสถียรภาพในระดับภาพรวม(Global) ระบบมีราก eigenvalue เป็นค่าจริงลบและคู่ที่อยู่บน complex

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

conjugate poles ทางด้านขวา จุดสมดุลระบบอยู่ที่ (0,0,0) เป็น index-2 spiral-saddle point และเนื่องจากระบบแสดงความไม่มีเสถียรภาพที่ระนาบ $x-y$ ดังนั้นวงโคจรของตัวดึงดูดจึงเลื่อนออกจากจุดสมดุล การให้ระบบมีเสถียรภาพในภาพรวมใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นตามตารางที่ 2.1 เป็นตัวปรับวงโคจร

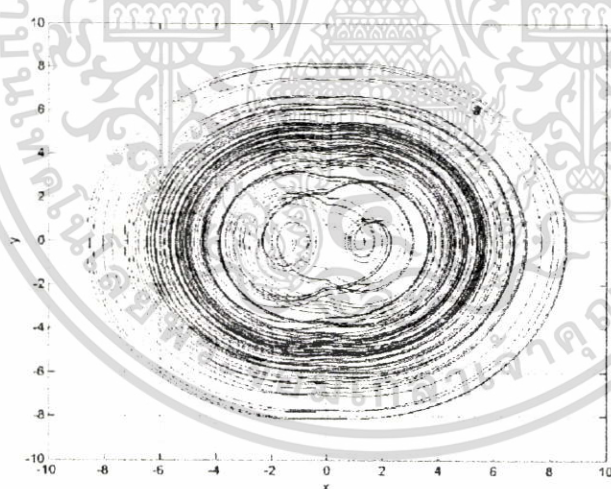
2.2.7 ระบบอลวนแบบ nonautonomous อันดับสอง 2 (Second-order nonautonomous chaotic system)

เพื่อกำเนิดสัญญาณอลวนจากระบบ nonautonomous อันดับสอง ระบบอลวนแบบนี้ประกอบด้วยระบบเชิงเส้นอันดับสองและอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นแบบเครื่องหมายเป็นตัวป้อนกลับ พร้อมด้วยสัญญาณขับที่เป็นคลื่นไซน์และในระบบแบบเดียวกันแต่ใช้ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นป้อนกลับแบบอิ่มตัว (saturate)

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ f(x) + f_s(\omega t) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

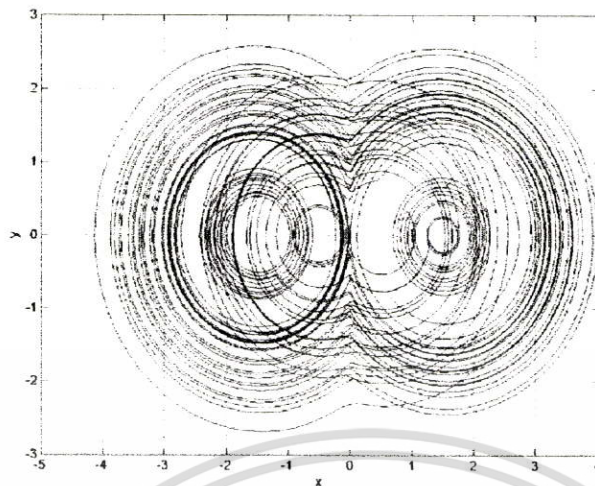
โดย α เป็นค่าสัมประสิทธิ์ damping ระบบใน (2.29) นี้ให้ตัวดึงดูดแบบ 2 สกอร์

จากระบบสามารถใช้สัญญาณขับที่เป็นสัญญาณพัลส์ แทนสัญญาณไซน์โดยฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นในที่นี้ใช้ฟังก์ชันผลการจำลองระบบ (2.29) โดย $f(x)$ เป็นฟังก์ชันเครื่องหมายและใช้สัญญาณไซน์เป็นตัวขับแสดงได้ในรูปที่ 2.12 และผลการจำลองระบบ (2.29) โดยใช้สัญญาณพัลส์-ขนาด ± 0.5 , 0.2 rad/s เป็นตัวขับแสดงได้ในรูปที่ 2.13



รูปที่.2.12 ตัวดึงดูดของระบบ nonautonomous อันดับสองใช้ฟังก์ชันเครื่องหมายขับด้วยสัญญาณไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่. 2.13 ตัวตัวดึงดูดของระบบ nonautonomous อันดับสองใช้ฟังก์ชันเครื่องหมายขับเคลื่อนด้วยสัญญาณพัลส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินวิจัย

แนวความคิดในการออกแบบ

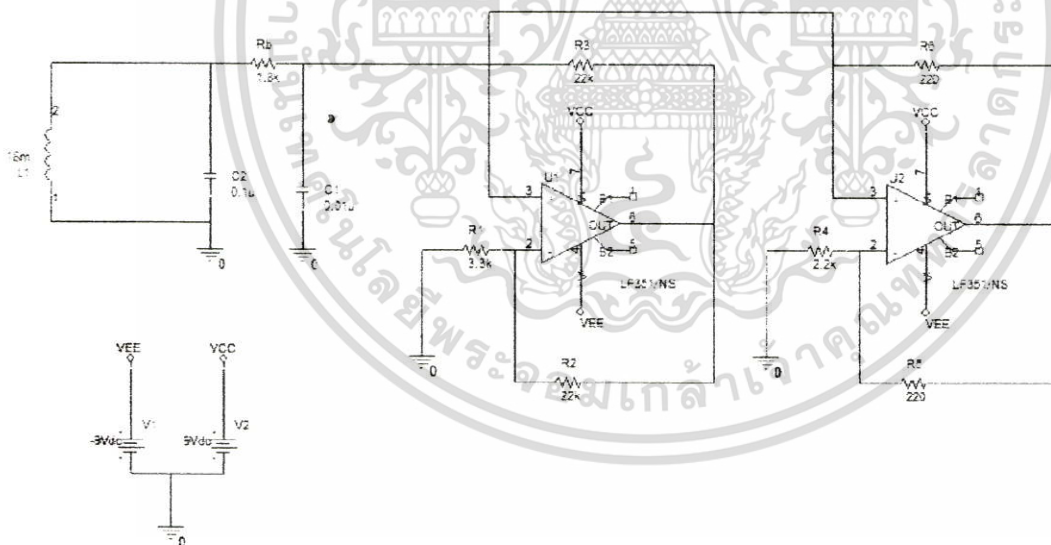
หัวใจของงานวิจัยนี้คือการสร้างตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันเพื่อใช้สร้างสัญญาณออสซิลเลชันรูปแบบต่างๆ เพื่อการเรียนรู้แบบในวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. ขับเคลื่อนหุ่นยนต์ขนาดเล็ก
2. ทดลองเสียงดนตรี
3. เป็นสัญญาณสั้น
4. เป็นตัวตรวจจับ

ดังนั้นขั้นตอนวิธีวิจัยจึงออกแบบตัวตั้งคูดเพื่อให้เข้ากับรูปแบบการเรียนรู้ในรูปดังกล่าว และเนื่องจากเป้าหมายของงานวิจัยที่จดสิทธิบัตรบางชุดซึ่งรายงานนี้อยู่ในการดำเนินงานจดคูดนั้นจึงขอเปิดเผยงานบางส่วนดังนี้

3.1 ตัวตั้งคูดแบบวงจร Chua

จากวงจร Chua ในสมการ 2.17 บทที่ 2 สามารถแทนด้วยวงจรแบบมาตรฐาน [57] ได้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจร Chua แบบมาตรฐาน

จากรูปวงจร Chua ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ $C_1=0.01 \mu F$ $C_2=0.1 \mu F$ ตัวเหนี่ยวนำ $L=18 mH$ ตัวต้านทานเชิงเส้น $R_b=1.8K$ และตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นประกอบด้วยออปแอมป์ U1-U2 และตัวต้านทาน $R_1 - R_6$ เนื่องจากวงจร Chua แบบนี้เป็นวงจรที่สร้างได้ง่ายในทางปฏิบัติและ จากวงจรสัญญาณที่กำเนิดขึ้นเป็นย่านความถี่เสียง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงออกแบบให้ผู้เรียนทำการทดลองเพื่อให้เข้าใจปรากฏการณ์ออสซิลเลชันโดยมีรูปแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ระดับสมการคณิตศาสตร์ที่แสดงรูปแบบระดับบล็อก (Block level)

จากวงจรในรูปที่ 3.1 สามารถใช้สมการที่ (2.17.1) ที่แสดงระบบ Chua ในรูปที่ไม่มีมิติ (dimensionless) ได้คือ

$$\frac{dx}{dt} = k\alpha(y - x - f(x))$$

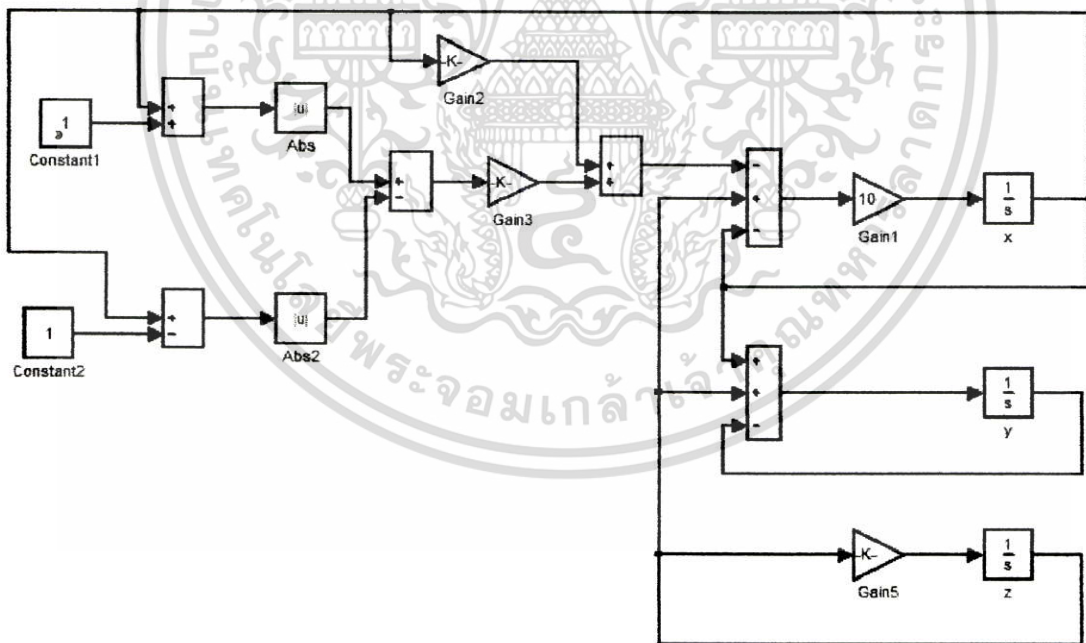
$$\frac{dy}{dt} = k(x - y + z)$$

$$\frac{dz}{dt} = -k\beta y$$

โดย

$$f(x) = bx + \frac{1}{2}(a-b)(|x+1| - |x-1|)$$

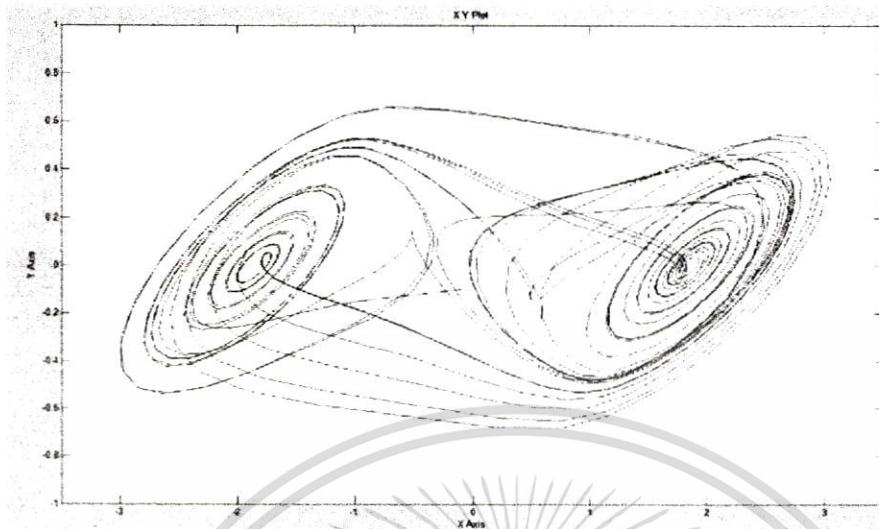
ในระดับนี้ผู้เรียนที่มีพื้นฐานสมการอนุพันธ์สามารถใช้โปรแกรม Simulink เพื่อจำลองการทำงานของสมการ (2.17) ได้แสดงดังรูป



รูปที่ 3.2 วงจร Chua แบบมาตรฐานแสดงระดับ block level

จากรูปแบบระดับบล็อกจำลองการทำงานได้ด้วยโปรแกรม Simulink การแทนฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เช่น การบวก ลบ คูณ การขยาย การทำการปริพันธ์รวมทั้งการสร้างฟังก์ชันสามารถกระทำได้โดยตรง ผลการจำลองระบบ Chua แบบมาตรฐานแสดงได้ในรูป 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สัญญาณในแกน x,y

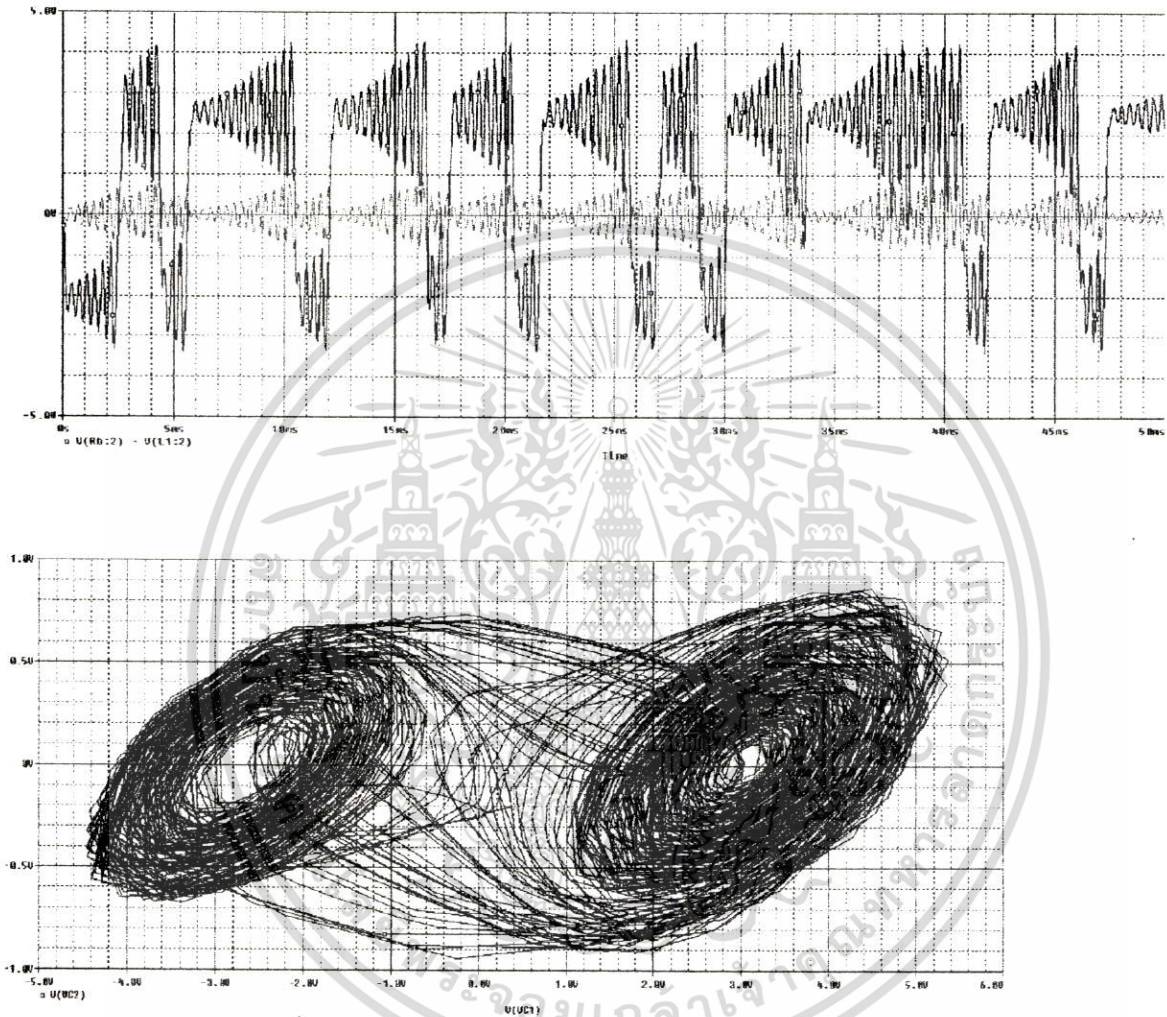


สัญญาณในโดเมนเวลา

รูปที่ 3.3 ผลการจำลองวงจร Chua โดยโปรแกรม Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

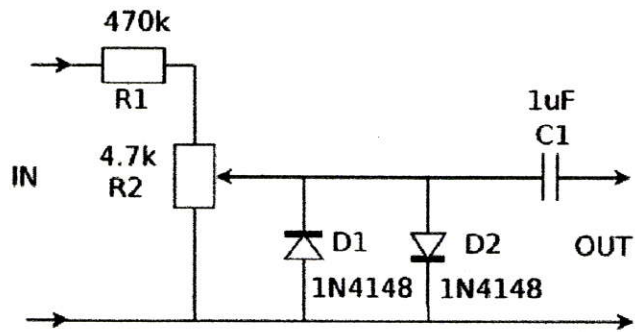
2.ระดับวงจร(Physical element level) โดยจำลองผลด้วยโปรแกรม Pspice ผลการการจำลองวงจร Chua ในรูปที่ 3.1 ในโดเมนของเวลาแสดงได้



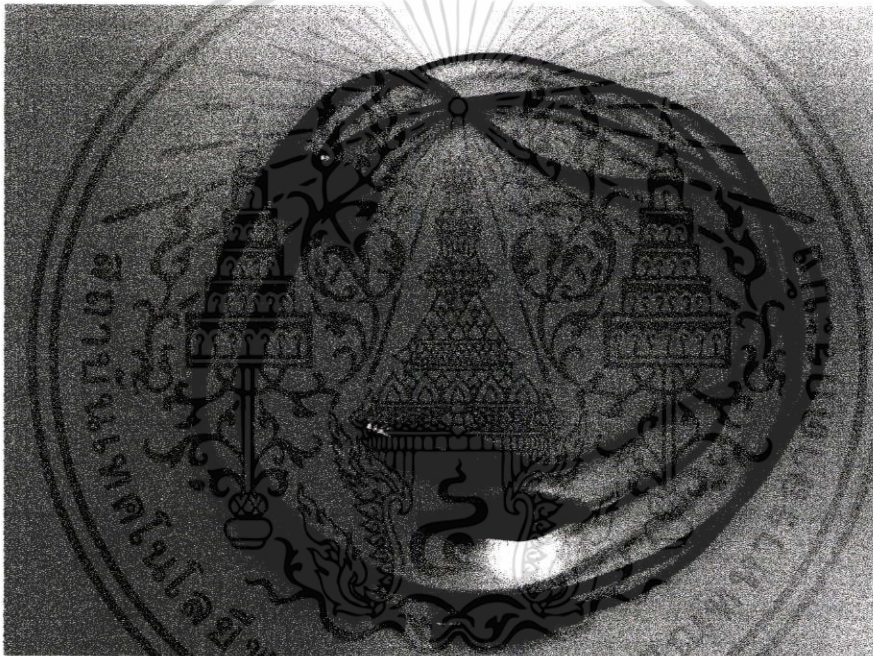
รูปที่ 3.4 ผลการจำลองของวงจร Chua แบบมาตรฐานโดย Pspice

ในการทดลองระดับวงจรนี้ ผู้เรียนสามารถทดลองเชื่อมต่อวงจรเข้ากับสโคปที่อยู่บนคอมพิวเตอร์ผ่านการ์ดเสียง(Sound Card Oscilloscope) เป็นซอฟต์แวร์ไม่เสียค่าใช้จ่ายเข้าถึงได้จาก https://www.zeitnitz.eu/scope_en ซึ่งวงจรเพื่อเชื่อมนี้ผู้เรียนรู้อาจสามารถสร้างด้วยตนเองแสดงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



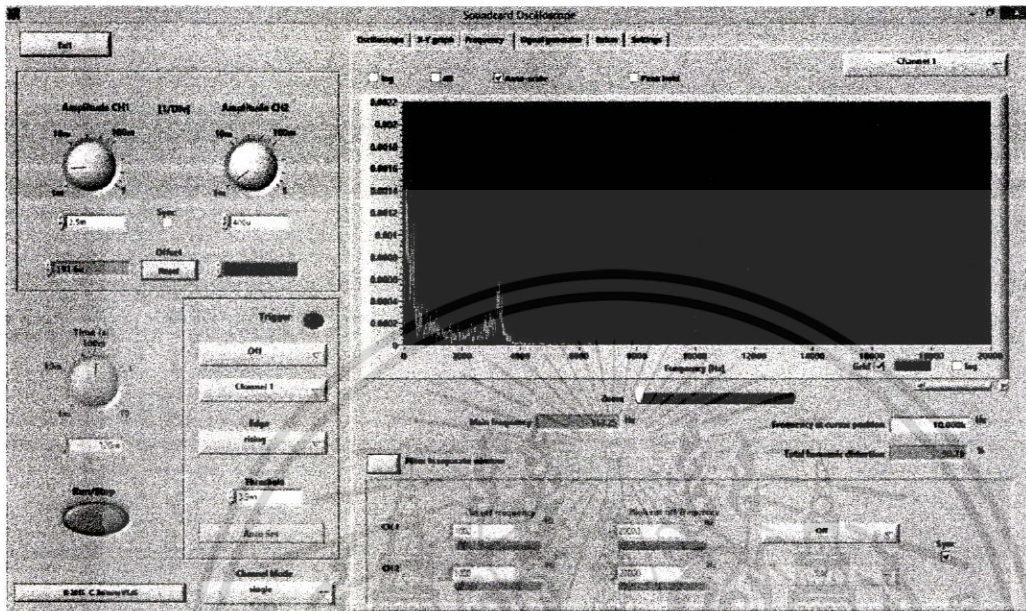
รูปที่ 3.5 วงจรเชื่อมต่อ PC scope



แสดงรูปวงจรเชื่อมต่อ PC scope ที่สร้างขึ้นในทางปฏิบัติที่ผู้เรียนรู้อาจสามารถสร้างได้ด้วยตนเอง อุปกรณ์ประกอบด้วยความต้านทานปรับได้ 1 ตัว แบบคงที่ 1 ตัว ไดโอด 2 ตัว และความจุ 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองจาก PC-scope แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 3.6 แสดง PC-scope

จากวงจรเมื่อปรับค่าความต้านทาน R_b ของวงจรในรูป 3.1 ไปเป็นค่าต่างๆ นั้นสามารถศึกษาปรากฏการณ์ของระบบอลวนได้ทั้งโดเมนเวลาและความถี่เริ่มตั้งแต่เป็นรายคาบ จนถึงแสดงได้ 2 สกอร์แสดงได้

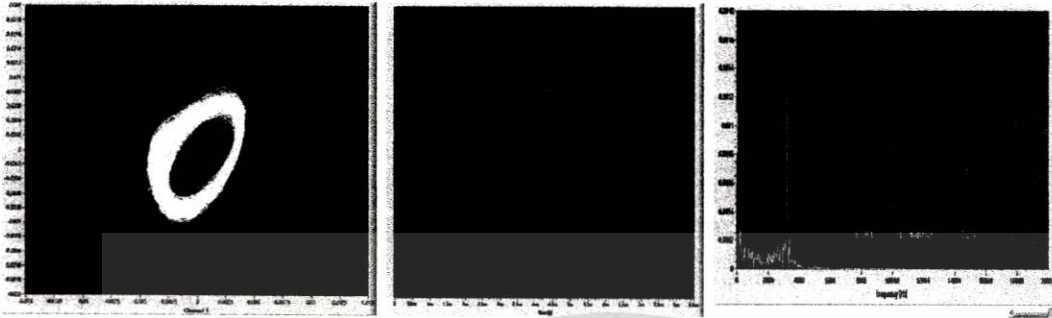


แสดงคาบเท่ากับ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงคาบเท่ากับ 3



แสดงเป็น 1 สกอร์



แสดงเป็น 2 สกอร์

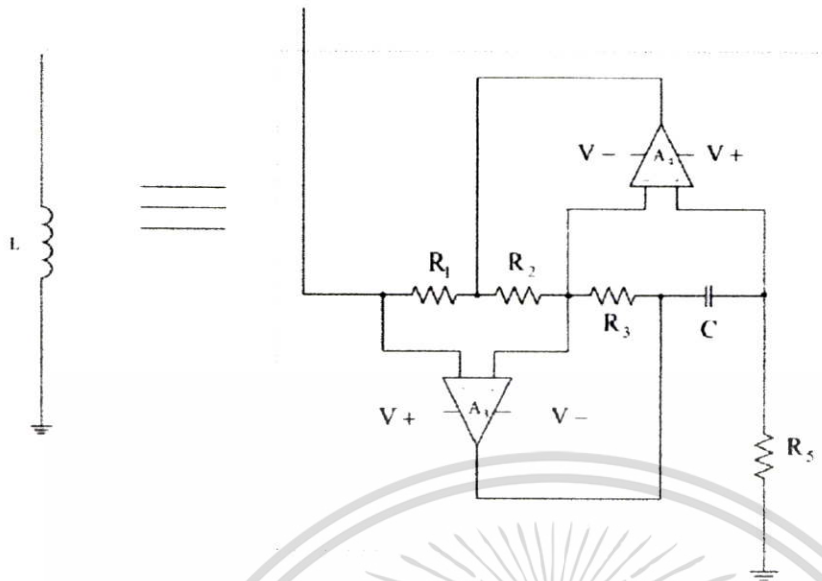
รูปที่ 3.7 แสดงปรากฏการณ์ของระบบออสซิลในการเรียนรู้

3. ทดลองต่อวงจรด้วยตนเองแล้ววัดผลด้วย PC ในระดับนี้สามารถเพิ่มระดับการทดลองให้ผู้เรียนที่เป็นชั้นก้าวหน้าเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์บางตัวโดยทดลองให้วงจรทำงานที่ความถี่ต่ำขนาด 1 Hz ค่าของความจุมีขนาด $C_1=4.7 \mu F$ $C_2=47 \mu F$ และตัวเหนี่ยวนำมีขนาด $L=4.7 H$ ซึ่งเป็นค่าที่สร้างไม่ได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงต้องใช้ไซเรเตอร์[58] แสดงได้ดังรูปที่ 3.8

$$L_{eq} = \frac{R_1 R_3 R_5 C}{R_2} \quad (3.1)$$

ในที่นี้ใช้ $R_1 = R_2 = R_3 = 1K$, $R_5 = 1K$ และ $Z_4 = 1/sc$, $C = 1 \mu F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงโอเพอเรเตอร์ที่ใช้แทนตัวเหนี่ยวนำ

แสดงผลการจำลองได้



รูปที่ 3.9 ผลการจำลองของวงจร Chua แบบมาตรฐานโดยใช้โอเพอเรเตอร์

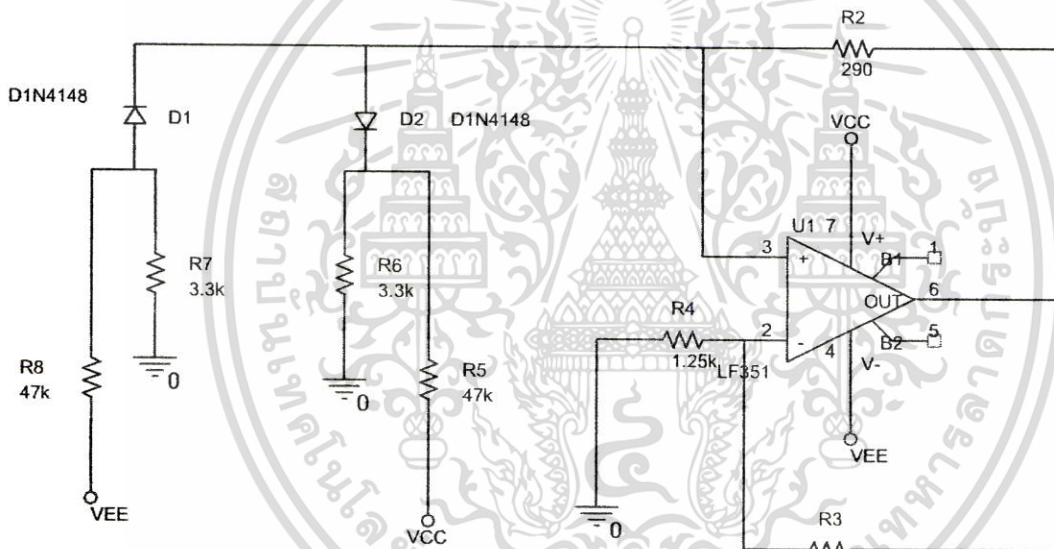
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ตัวตั้งคูดที่ปรับปรุงใหม่แบบวงจร Chua ปรับปรุงใหม่

การออกแบบวงจรในหัวข้อนี้ต้องการเพื่อให้ขับเคลื่อนหุ่นยนต์เล็กแบบอลวน โดยผู้เรียนสามารถสร้างด้วยตนเอง(DIY:Do It Yourself) การออกแบบเป็นโมดูลกำเนิดสัญญาณเพื่อขับมอเตอร์นอกจากต้องเป็นความถี่ต่ำขนาด 0.2-1Hz แล้วต้องมีขนาดเล็กอีกด้วย เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวจึงสร้างวงจร Chua แบบลดอุปกรณ์โดยปรับปรุงจากวงจร ในรูปที่ 3.1 ที่หากใช้โอเพอเรเตอร์แทนตัวหนี้ยวนำนั้นต้องการออปแอมป์ถึง 4 ตัว ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองทั้งพื้นที่และพลังงาน การลดอุปกรณ์ของวงจรที่สร้างขึ้นใหม่นี้จึงพิจารณาจากการลดจำนวนออปแอมป์ลงทั้งที่วงจรความต้านลบบไม่เป็นเชิงเส้นและที่วงจรโอเพอเรเตอร์ โดย

1.การใช้ไดโอดร่วมกับออปแอมป์เพื่อเป็นวงจรความต้านลบบไม่เป็นเชิงเส้น

จากรูปที่ 3.10 ใช้ไดโอด D1-D2 ต่อร่วมออปแอมป์เพื่อทำให้ส่วนตัวต้านทานลบบแบ่งออกเป็นท่อน จากรูปที่ 2.8 $v-i$ characteristic ของ Chua ไดโอด เมื่อ D2 ไม่ทำงานที่จุดค่าความต้านทาน R6 เทียบกราวน์จะมีขนาด $R5/R5+R6$ ถ้าให้ $R5/R5+R6=1/VCC$ แล้วจุด break point:BP ในรูปที่ 2.8 จะมีขนาด 1 v โดยสไลบของค่าความต้านลบบ G_a, G_b มีขนาดเท่ากับ $1/R3$



รูปที่ 3.10 วงจรความต้านลบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบใช้ออปแอมป์ตัวเดียว

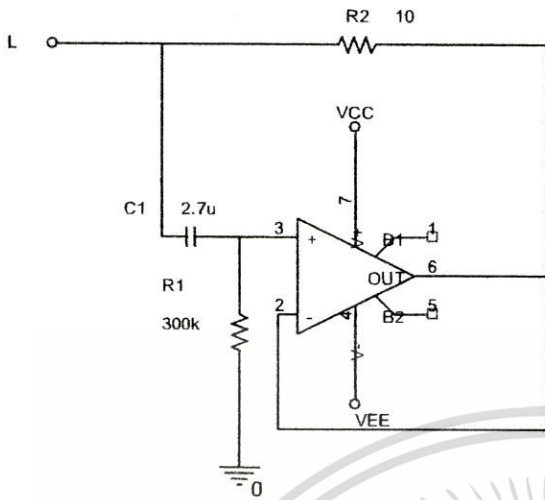
2. ใช้โอเพอเรเตอร์แบบออปแอมป์ตัวเดียว[59]

แสดงวงจรได้ดังรูป 3.11 สามารถแสดงค่าความเหนี่ยวนำและค่า Q ของวงจรได้คือ

$$L_{eq} = \frac{R_2 C (R_1 - R_2)}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} \quad (3.2)$$

$$Q = \frac{\omega C (R_1 - R_2)}{1 + \omega^2 C^2 R_2^2} \quad (3.3)$$

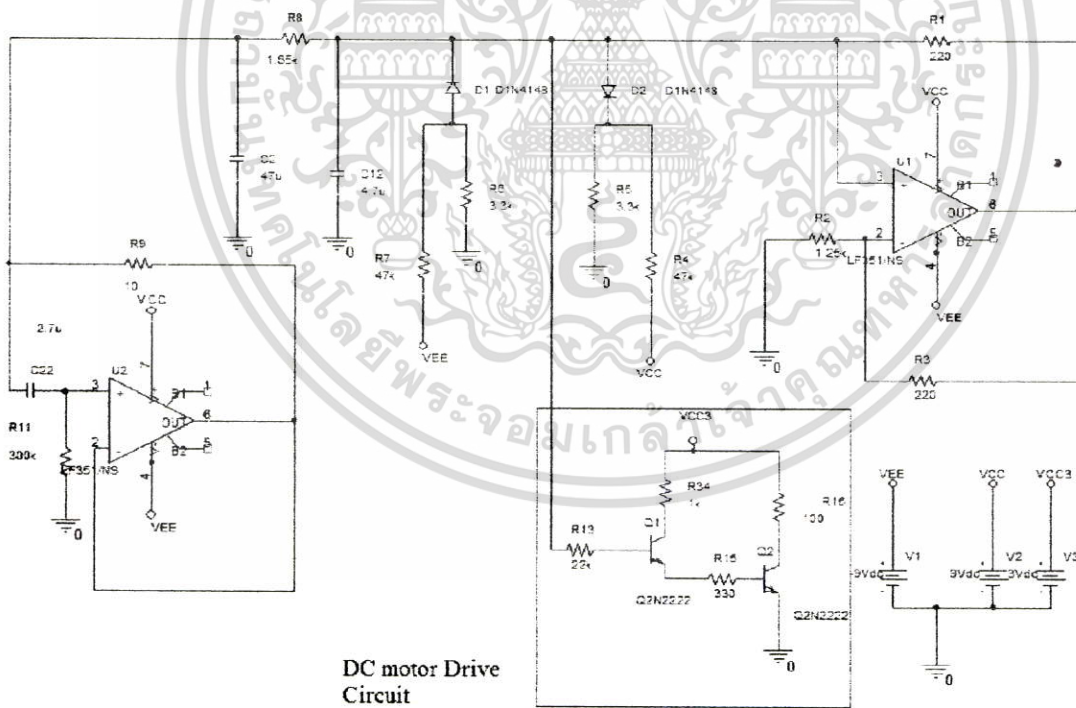
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



U13

รูปที่ 3.11 ไซเรเตอร์แบบใช้ออปแอมป์ตัวเดียว

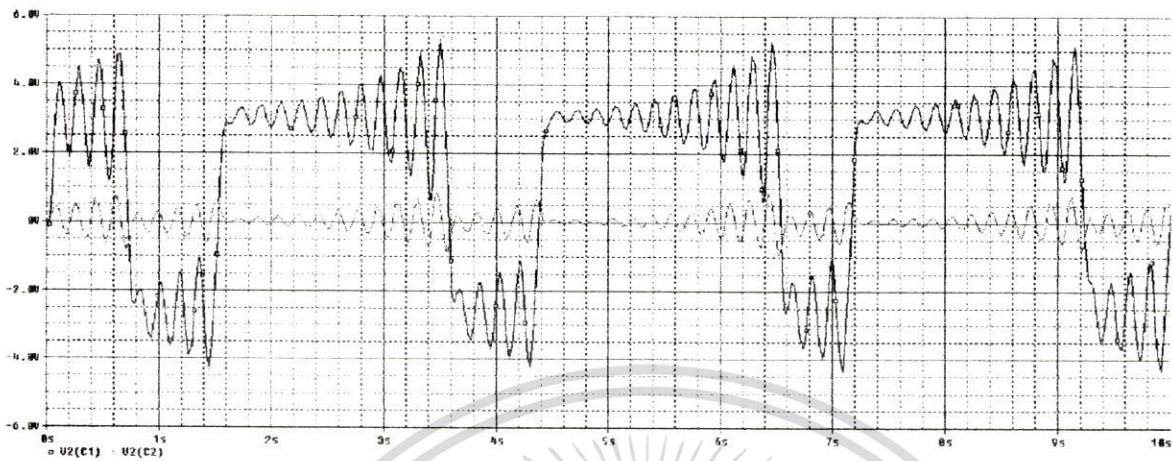
เพื่อให้ค่า $L=4.5\text{mH}$ สำหรับกำหนดความถี่ต้านนั้นใช้ $C_1=2.7\ \mu\text{F}$ ตัวต้านทาน $R_1=300\text{K}, R_2=10$ โดยวงจร Chua ที่ปรับปรุงแสดงได้ดังรูป 3.12 โดยจุดที่ใช้ขับมอเตอร์คือจุด VC1



รูปที่ 3.12 วงจร Chua ปรับปรุงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองวงจร Chua ปรับปรุงใหม่โดย Pspice แสดงได้



รูปที่ 3.13 ผลการจำลองวงจร Chua ปรับปรุงใหม่โดย Pspice

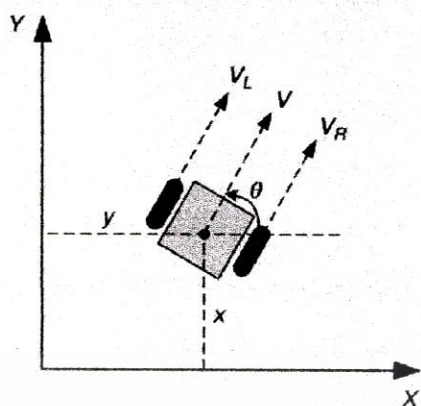
ในการประยุกต์ระบบอลวนสำหรับการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ สัญญาณอลวนที่เกิดจากวงจรจะแปลงเป็นสัญญาณพัลส์ขับโดยตรงเข้าที่มอเตอร์กระแสตรงที่ต่อกับลูกล้อ 2 ล้อแสดงระบบได้ดังรูป



รูปที่ 3.14 แสดงการขับเคลื่อน

รูปแบบการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อแสดงแบบจำลองเชิงกลได้ในรูปที่ 3.15

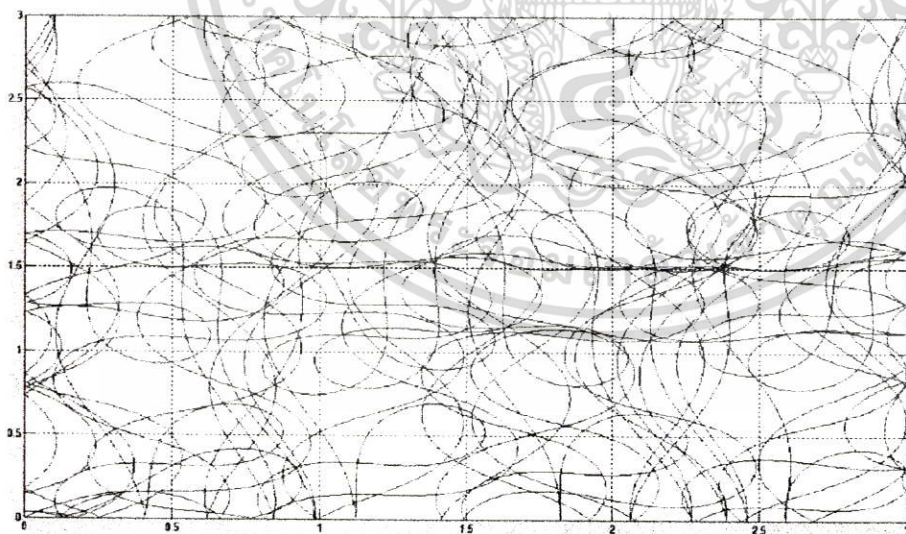
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แบบจำลองเชิงกลของการขับเคลื่อนหุ่นยนต์
จากรูปแสดงสมการเคลื่อนที่ของหุ่นได้คือ[60]

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

โดย V เป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ การจำลองขับเคลื่อนด้วยสมการ Chua ในสมการ (2.7) ทำการจำลองโดย Simulink ผลการทดลองรูปแบบการเคลื่อนที่แสดงได้



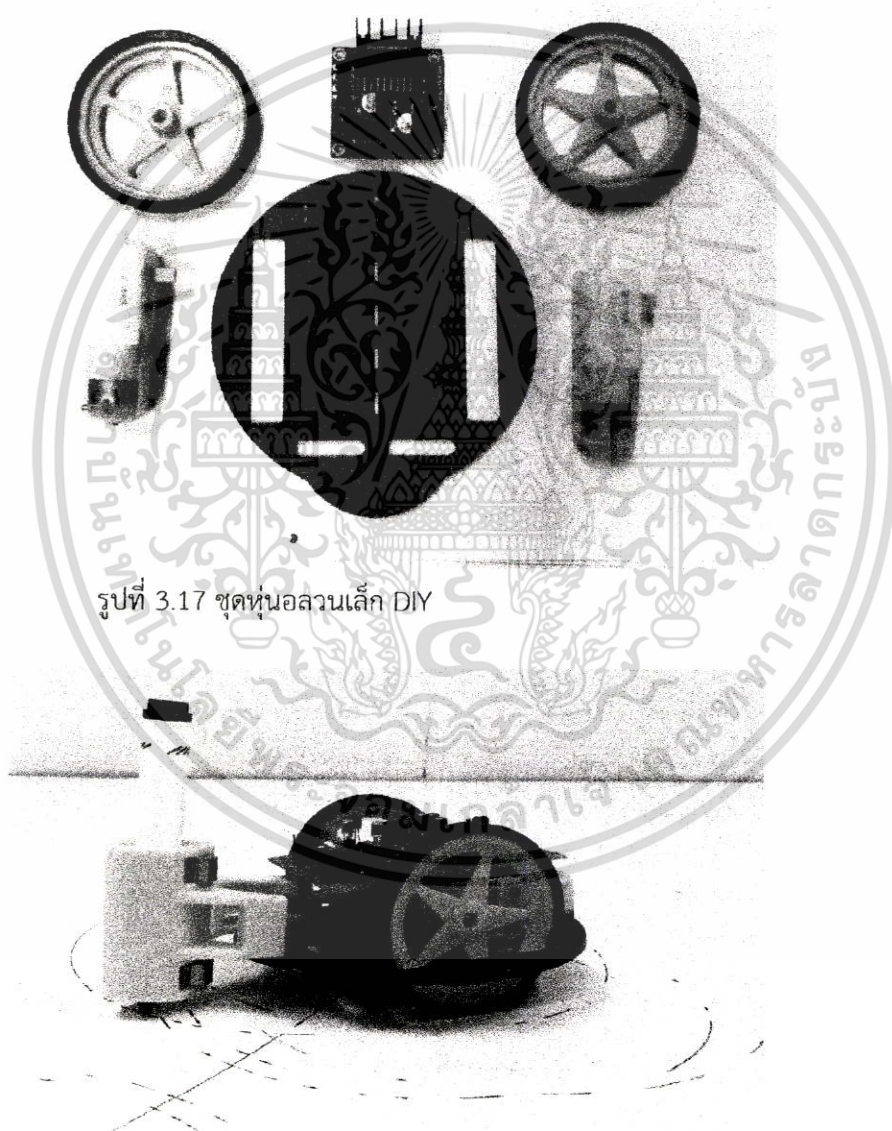
รูปที่ 3.16 ผลการจำลองรูปแบบการเคลื่อนที่หุ่นยนต์อลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากระบบที่จำลอง สามารถสร้างจากการต่อเป็นชุดทดลองด้วยตนเอง(DIY) เพื่อให้เห็นการขับเคลื่อนสภาวะอลวนจริง ชุดทดลองประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆ คือ

1. ลูกล้อ 2 ล้อ
2. แท่นพลาสติก
3. วงจร Chua
4. มอเตอร์

แสดงชิ้นส่วนได้ในรูป 3.17 และแบบประกอบเสร็จในรูป 3.18



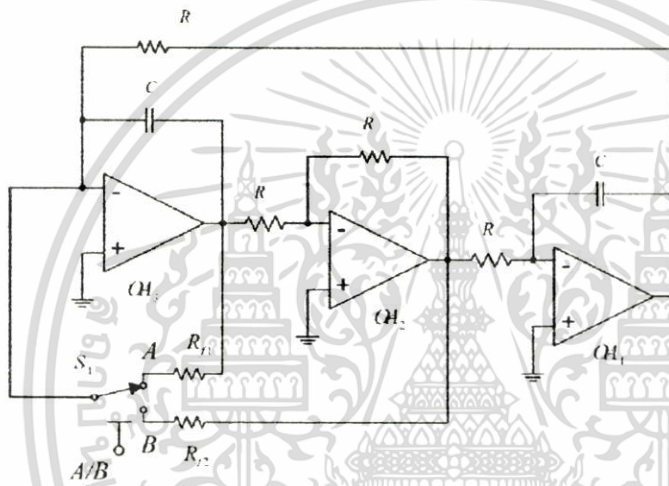
รูปที่ 3.17 ชุดหุ่นอลวนเล็ก DIY

รูปที่ 3.18 ชุดหุ่นอลวนวาทรูปประกอบเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ตัวดึงคูดที่ออกแบบจากลูปอินทีเกรเตอร์สองตัว

จุดมุ่งหมายของระบบอลวนแบบนี้ใช้สำหรับการตรวจวัด(sensor) ที่สามารถออกแบบจากสมการของระบบ (2.25)-(2.29) โดยหัวใจของระบบคือการควบคุมระบบเชิงเส้นลำดับ 2 หรือ 3 ที่ประกอบเข้ากับวงจรไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นตัวป้อนกลับ ซึ่งแกนของการออกแบบระบบคืออินทีเกรเตอร์สองตัวซึ่งมีอยู่สองรูปแบบคือ แบบที่ใช้วงจรอินทีเกรเตอร์แบบลบทั้งหมดสองตัว และแบบที่ใช้วงจรอินทีเกรเตอร์แบบบวกหรืออินทีเกรเตอร์ แบบ Daboo ร่วมกับวงจรอินทีเกรเตอร์แบบลบ สำหรับลูปอินทีเกรเตอร์แบบลบสองตัวแสดงได้ในรูป 3.19



รูปที่ 3.19 ลูปอินทีเกรเตอร์แบบลบสองตัว

จากรูปประกอบด้วยวงจรอินทีเกรเตอร์แบบลบ OA1, วงจรขยายแบบลบ OA2 อัตราขยายเท่ากับ 1 และวงจรอินทีเกรเตอร์แบบลบที่มีการป้อนกลับ OA3 ในกรณีสวิตช์ S1 ต่อที่จุด A ซึ่งเป็นการป้อนกลับแบบลบระบบจะมีเสถียรภาพอยู่บน LHP ถ้าให้จุด $v_1=x$ และ $v_2=y$ สมการสแตตของวงจรเขียนได้

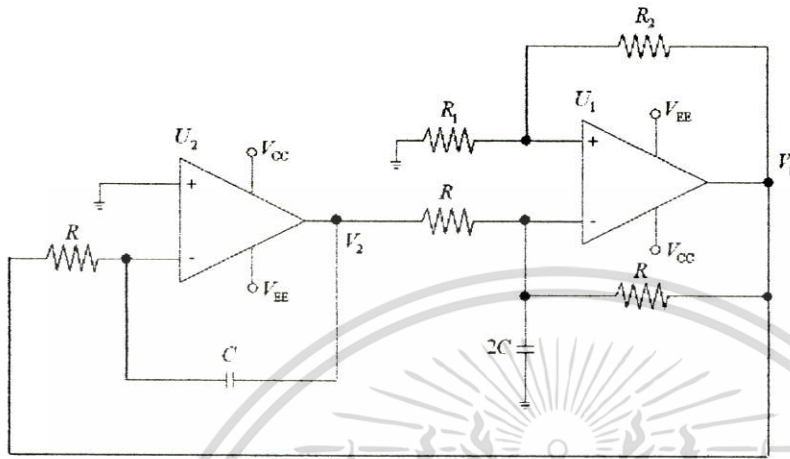
$$\begin{bmatrix} v'_1 \\ v'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{RC} \\ \frac{1}{RC} & -\frac{R_{f1}}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

แต่ถ้า S1 ต่อที่จุด B ซึ่งเป็นการป้อนกลับแบบบวกนั้นระบบจะเป็นระบบไม่มีเสถียรภาพอยู่บน RHP ถ้าให้จุด $v_1=x$ และ $v_2=y$ สมการสแตตของวงจรเขียนได้

$$\begin{bmatrix} v'_1 \\ v'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{RC} \\ \frac{1}{RC} & \frac{R_{f2}}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์ของการป้อนกลับ กำหนดได้จากความต้านทาน R_{f1} , R_{f2} และค่าเวลาคงที่ของวงจรคือ $1/RaC$ สำหรับรูปวงจรอินทิเกรตแบบบวกรวมกับวงจรอินทิเกรตเตอร์แบบลบซึ่งใช้อุปแอมป์เพียงสองตัว แสดงได้ในรูปที่ 3.20



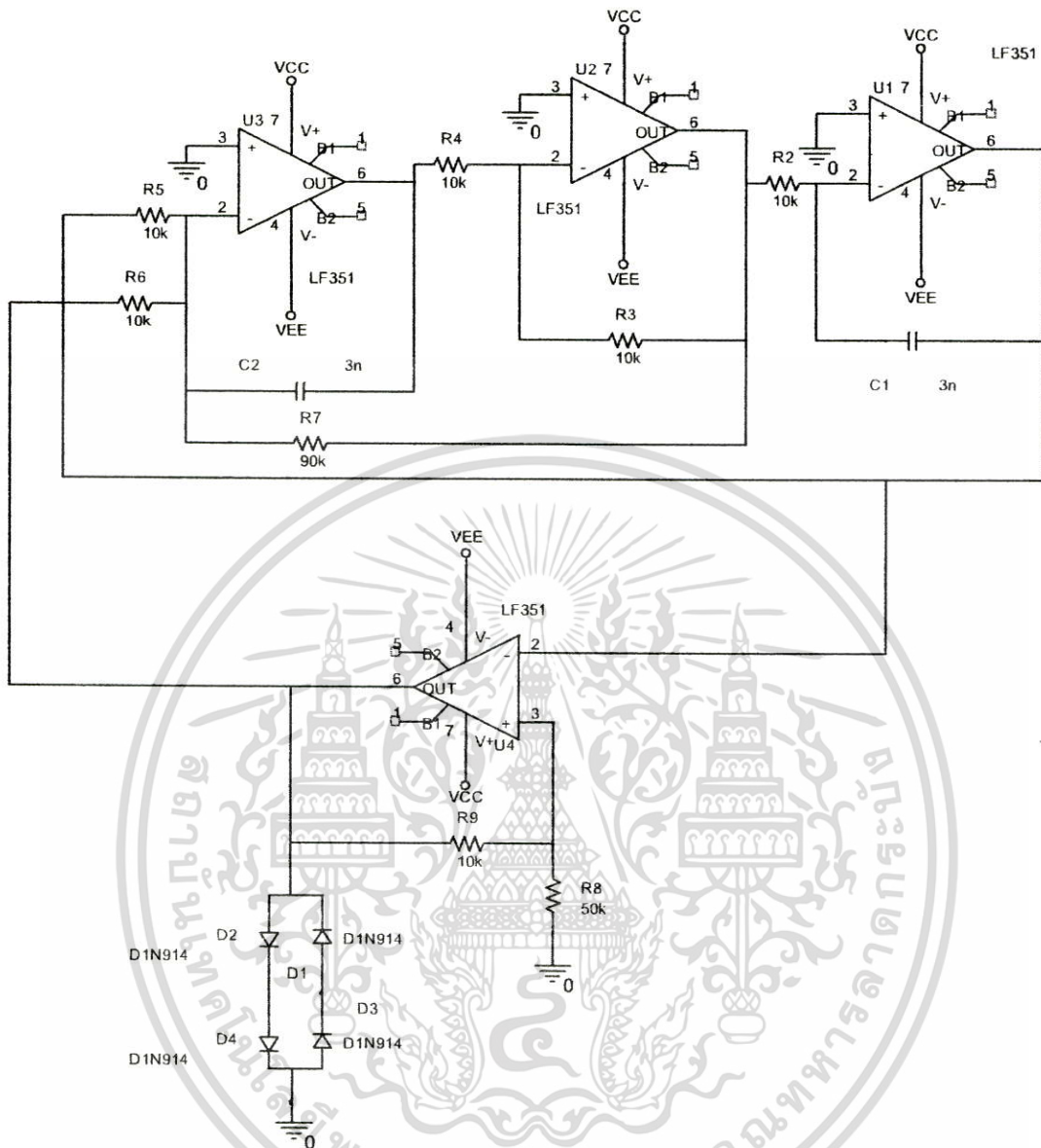
รูปที่ 3.20 ลูปอินทิเกรตเตอร์บวกรวมกับวงจรอินทิเกรตเตอร์แบบลบ

สมการสแตตของวงจรเขียนได้

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(A-1)}{2RC} & \frac{(A+1)}{2RC} \\ -\frac{1}{RC} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

โดย $A = \frac{R_2}{R_1}$ เป็นอัตราขยายของวงจรอินทิเกรต Daboo จากสมการถ้า $A < 1$ เป็นการป้อนกลับแบบลบในวงจรอินทิเกรต Daboo ระบบจะเป็นระบบเสถียรภาพอยู่บน LHP และถ้า $A > 1$ เป็นการป้อนกลับแบบบวกในวงจรอินทิเกรต Daboo ระบบไม่มีเสถียรภาพอยู่บน RHP

การออกแบบวงจรจากระบบอววนแบบ autonomous อันดับสอง(2.25) โดยใช้ลูปอินทิเกรตเตอร์แบบลบสองตัวโดยระบบเป็นระบบเชิงเส้นอันดับ 2 ที่ไม่มีเสถียรภาพโดยมีอุปกรณ์ Hysteresis เป็นตัวป้อนกลับจากและระบบมี complex conjugate eigenvalues บน right haft plane (RHP) ดังนั้นในลูปอินทิเกรตเตอร์จึงต้องกำหนดให้ระบบป้อนกลับแบบบวก วงจรแสดงได้ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 วงจรอลานอันดับสองใช้ตัวออสเตอริซิด

ลูปวงจรรินทีเกรทเตอร์ประกอบด้วยออปแอมป์ U1-U3 สัมประสิทธิ์การป้อนกลับแบบบวกควบคุมได้โดยความต้านทาน R7 วงจร Hysteresis ใช้ออปแอมป์ U4 ควบคุมเกณฑ์ด้วย R9-R10 โดย D1-D4 เป็นตัวจำกัดขนาดแรงดันสมการสแตตของวงจรรแสดงได้

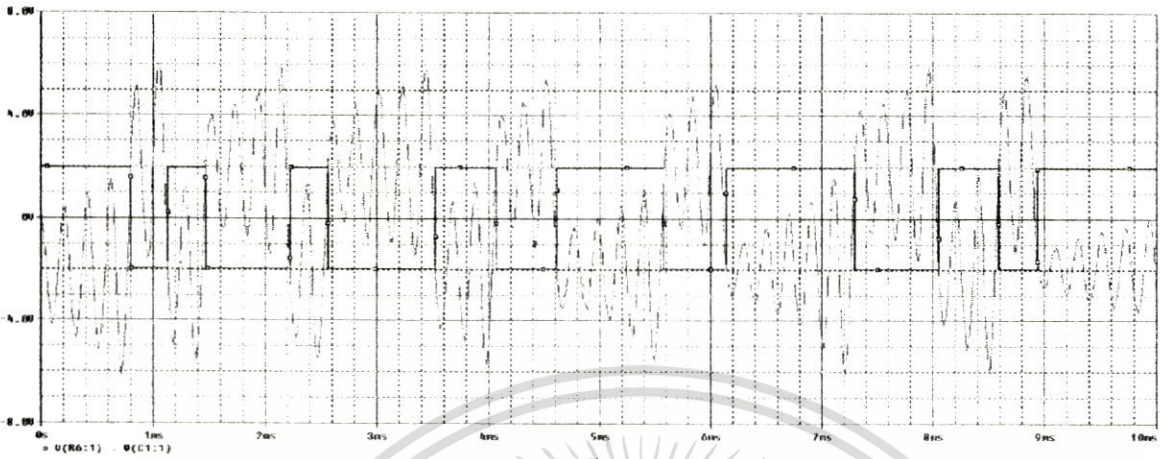
$$\frac{dvc_1}{dt} = \frac{vc_2}{R_2C_1}$$

$$\frac{dv_2}{dt} = -\frac{vc_1}{R_5C_2} + \frac{vc_2}{R_7C_2} + \frac{\text{sgn}(vc_1)'}{R_6C_2}$$

(3.9)

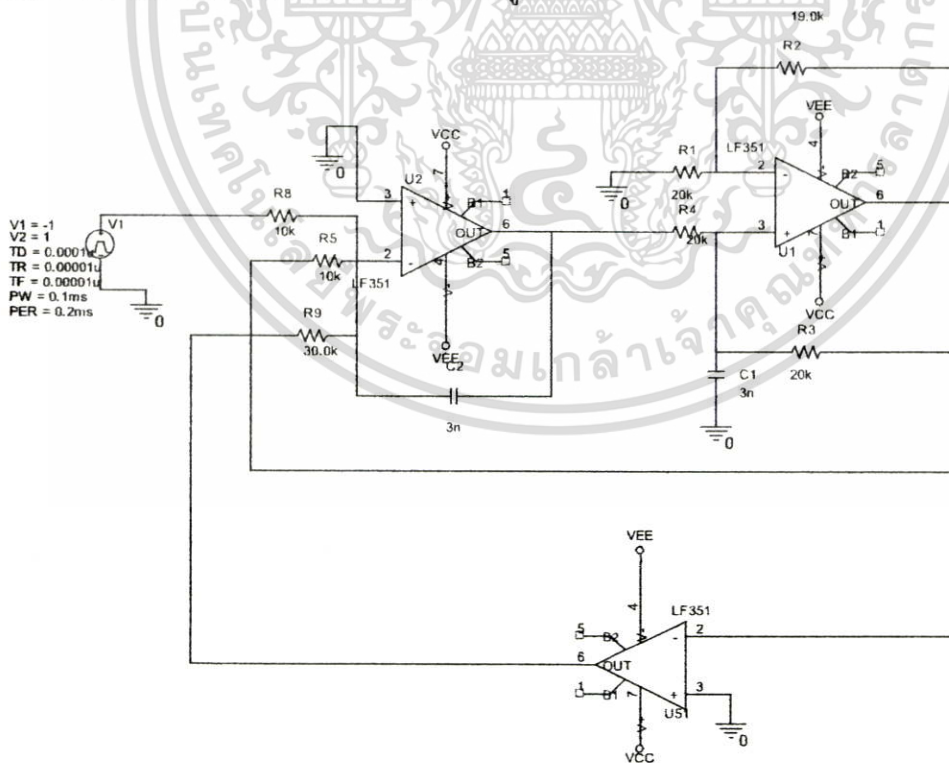
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Pspice แสดงได้



รูปที่ 3.22 ผลการจำลองวงจรถอลวนอันดับสองใช้ตัวฮิสเตอร์ซิสโดย Pspice

การออกแบบวงจรจากระบบอลวนแบบ non-autonomous อันดับสอง(2.29) โดยใช้ฟังก์ชัน เครื่องหมายและระบบขับด้วยสัญญาณพัลส์ โดยใช้ลูปลู่วางจรอินทิเกรตแบบบวกรวมกับวงจรถอลวนอินทิเกรตเตอร์แบบลบ โดยระบบ(2.29) เป็นระบบเชิงเส้นอันดับ 2 ที่มีเสถียรภาพโดยมีอุปกรณ์ comparator เป็นตัวป้อนกลับจากและระบบมี complex conjugate eigenvalues บน Lift haft plane (LHP): ดังนั้นในลูปลอินทิเกรตเตอร์จึงกำหนดให้ป้อนกลับแบบลบวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 3.23



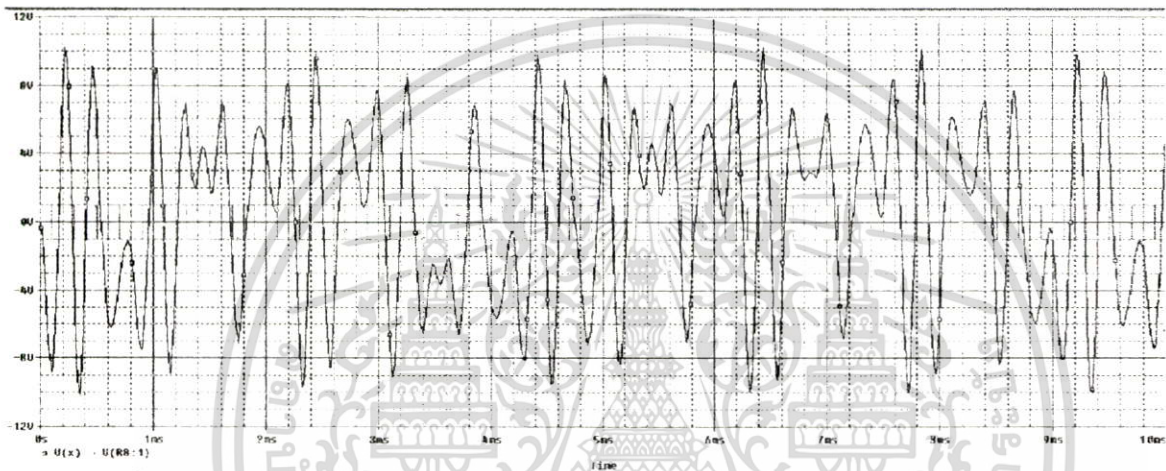
รูปที่ 3.23 วงจรถอลวนอันดับสองที่ใช้เป็นตัวตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูปวงจรถ่ายเทรเตอร์ประกอบด้วยออปแอมป์ U1-U2 สัมประสิทธิ์การป้อนกลับแบบบวกควบคุมได้โดยความต้านทาน R2 วงจร comparator ใช้ออปแอมป์แทนฟังก์ชันเครื่องหมาย สมการสเตตของวงจรแสดงได้

$$\begin{aligned} \frac{dv_1}{dt} &= \frac{(A-1)}{2R_1C_1}v_1 + \frac{(A+1)}{2R_1C_1}v_2 \\ \frac{dv_2}{dt} &= -\frac{v_1}{RC_2} + \frac{\text{sgn}(v_1)}{R_4C_2} - \frac{v_{ac}}{R_3C_2}\text{sgn}(\sin(\omega t)) \end{aligned} \quad (3.10)$$

ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Pspice แสดงได้

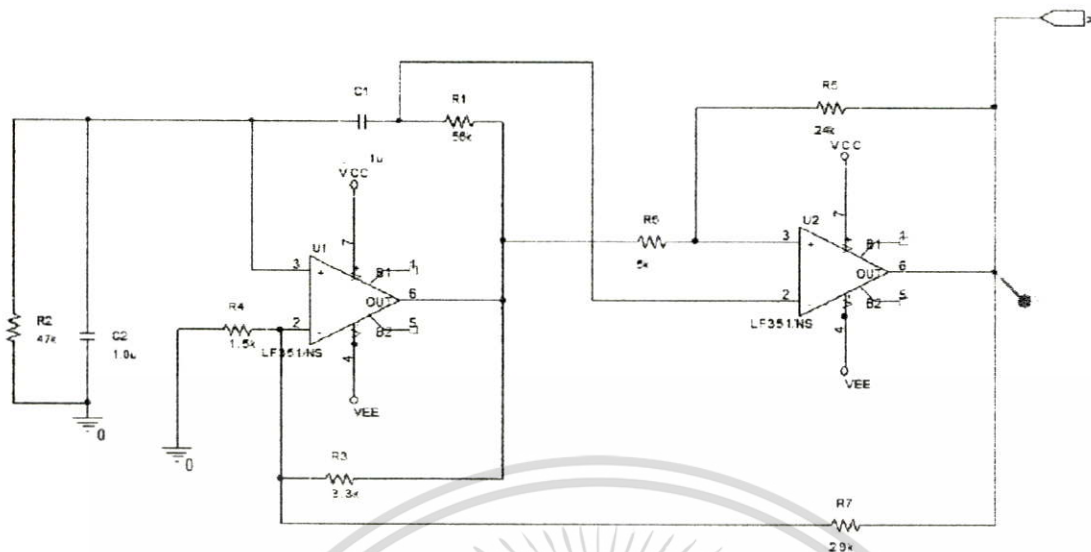


รูปที่ 3.24 ผลการจำลองวงจรลอวนอันดับสองใช้ฟังก์ชันเครื่องหมายขับเคลื่อนด้วยสัญญาณพัลส์

3.4 วงจรลอวนแบบ Wien bridge

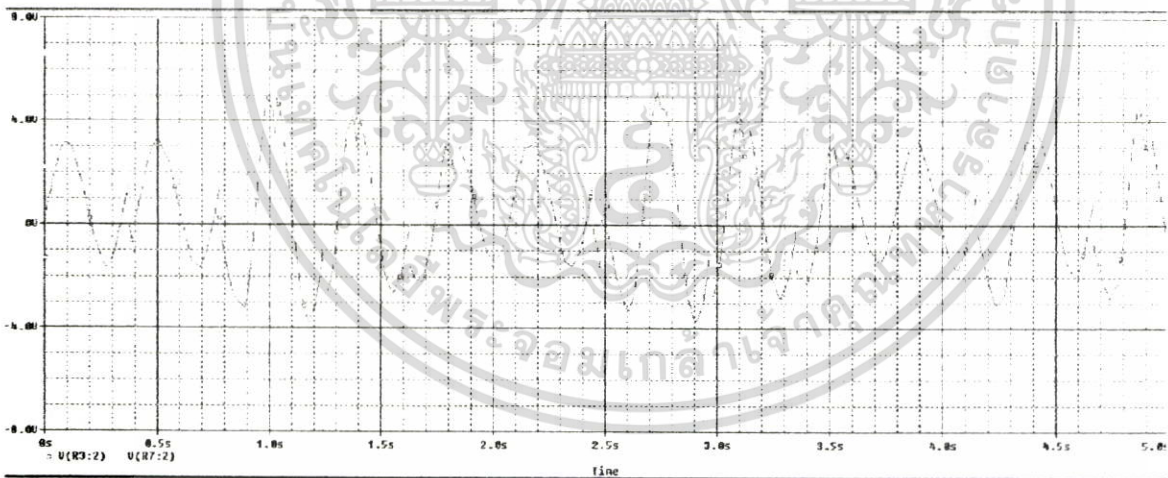
จากวงจรระบบลอวนแบบ autonomous อันดับสอง(2.25) ซึ่งประกอบด้วยระบบเชิงเส้นอันดับ 2 ที่ไม่มีเสถียรภาพร่วมกับอุปกรณ์ Hysteresis เป็นตัวป้อนกลับนั้นเมื่อพิจารณาจากวงจรถ่ายเทรเตอร์แบบ Wein-bridge ซึ่งการควบคุมอัตราขยายของลูปสามารถทำได้โดยกำหนดค่าอัตราขยายของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส ดังนั้นถ้าหากเลือกจุดป้อนกลับด้วยตัว Hysteresis แล้วสามารถให้ผลการทำงานเหมือนกับระบบ (2.25) โดยแสดงวงจรได้ดังรูปที่ 3.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบ Wien-bridge

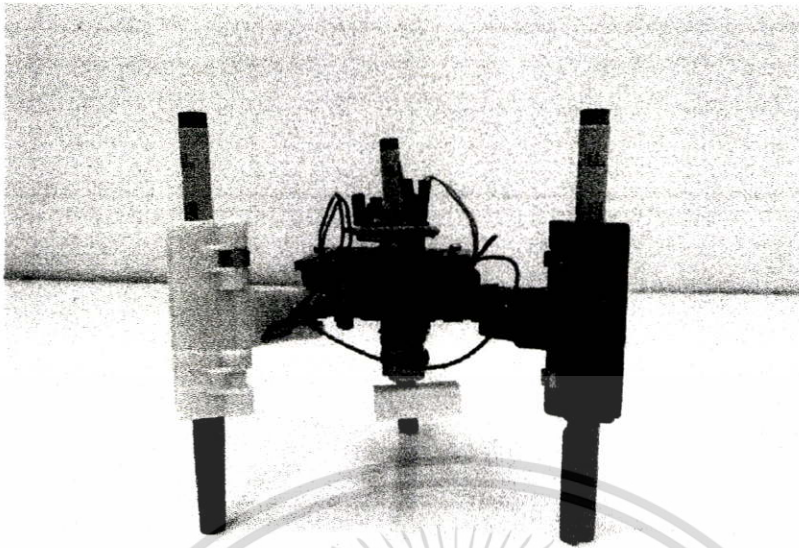
จากรูป 3.25 วงจร Wien-bridge ใช้โอปแอมป์ U1 วงจร hysteresis ใช้ โอปแอมป์ U2 โดยเอาท์พุทของ วงจร hysteresis ป้อนเข้าที่จุดควบคุมเกนของ U1 จากวงจรออกแบบให้ทำการสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่ต่ำ สำหรับการกำเนิดรูปแบบการสั่นสะเทือน ผลการจำลองด้วยโปรแกรม Pspice แสดงสัญญาณออสซิลเลชันและสัญญาณพัลส์ได้



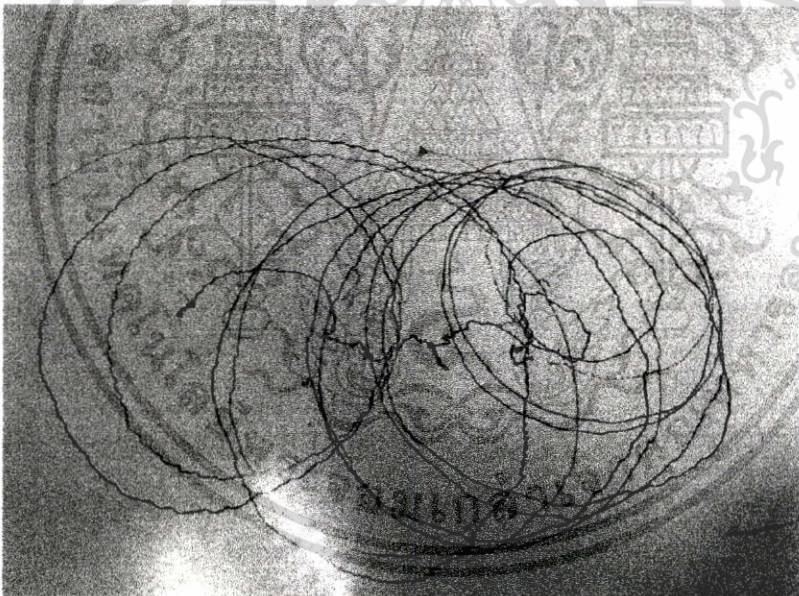
รูปที่ 3.26 ผลการจำลองวงจรออสซิลเลเตอร์แบบ Wein bridge

จากขนาดความถี่ของสัญญาณสามารถใช้ขับเคลื่อนเพื่อใช้เป็นโมดูลสำหรับสร้างหุ่นยนต์ขีดเส้น (Doodle Robot) แสดงตัวหุ่นและผลการทดลองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 หุ่นยนต์ขีดเส้น (Doodle Robot)



รูปที่ 3.28 รูปวาดจากหุ่นยนต์ขีดเส้น (Doodle Robot)

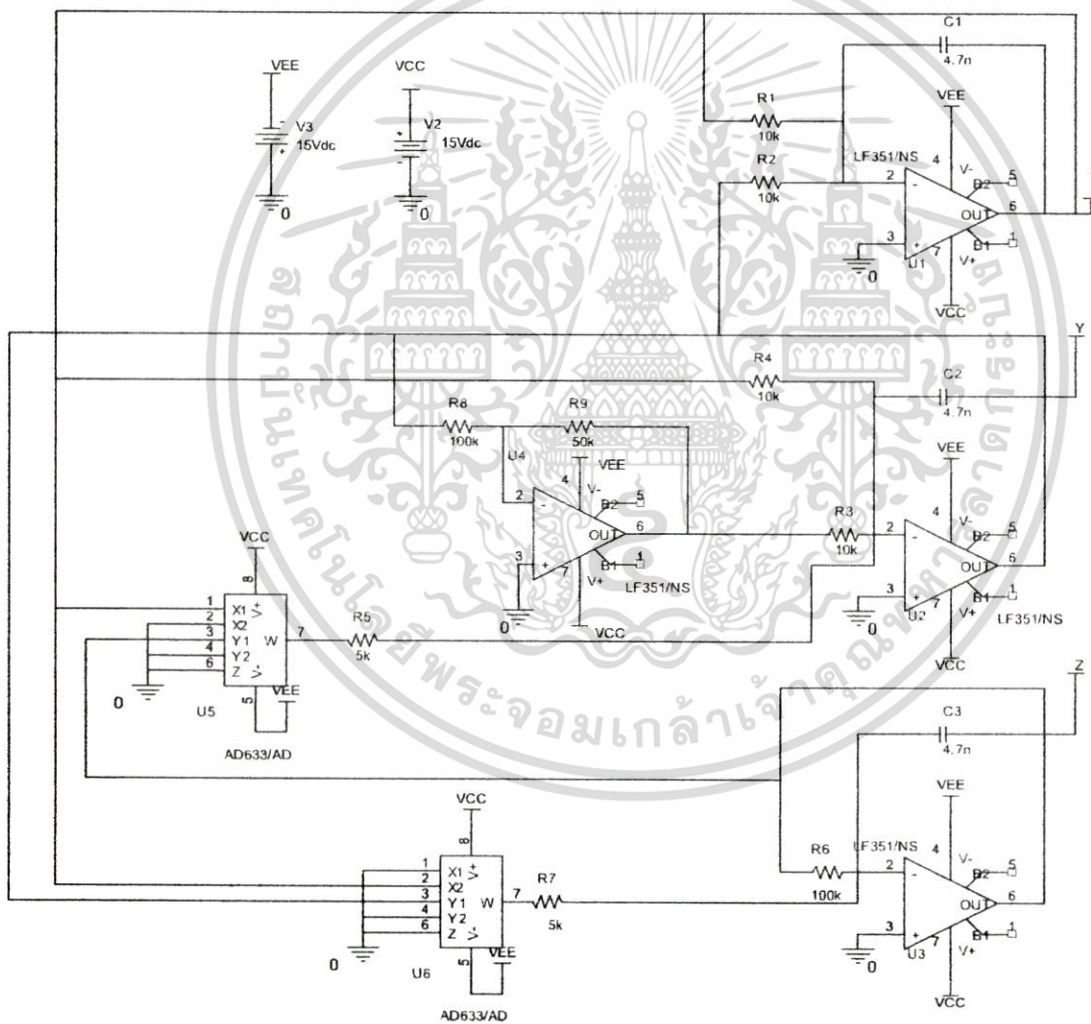
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วงจรตัวตั้งคูดแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen แบบง่าย

จุดประสงค์ของการสร้างตัวตั้งคูดแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen แบบง่ายค้นพบโดย Wang และ Chen แสดงได้จากสมการ (2.19) เพื่อใช้ในการสร้างเสียงดนตรีในการออกแบบ นอกสามารถปรับค่า r เพื่อเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมแล้วยังออกแบบให้สามารถย้ายแกนความถี่ได้อีกด้วย

$$\begin{aligned}x' &= -x - y \\y' &= -x + ry - xz \\z' &= -0.1z + xy\end{aligned}$$

โดยระบบตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้นคือ xy และ xz เช่นเดียวกับระบบ Lorenz และ Chen จากระบบออกแบบได้ดังรูป



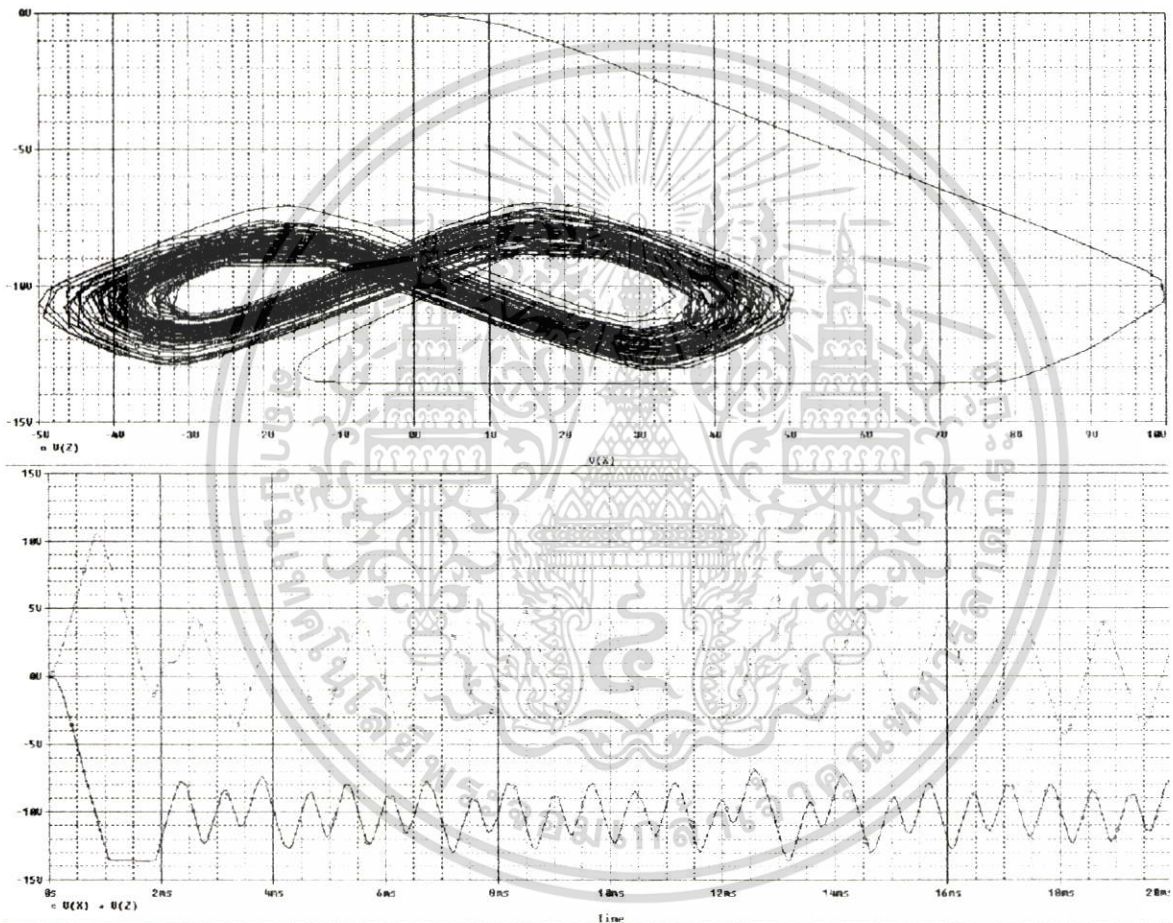
รูปที่ 3.29 วงจรตัวตั้งคูดแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen แบบง่าย

จากรูปวงจรอินทิเกรเตอร์คือ U1-U3 วงจรคูณในทางปฏิบัติใช้ AD633 แสดงสมการสเตชของวงจรได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

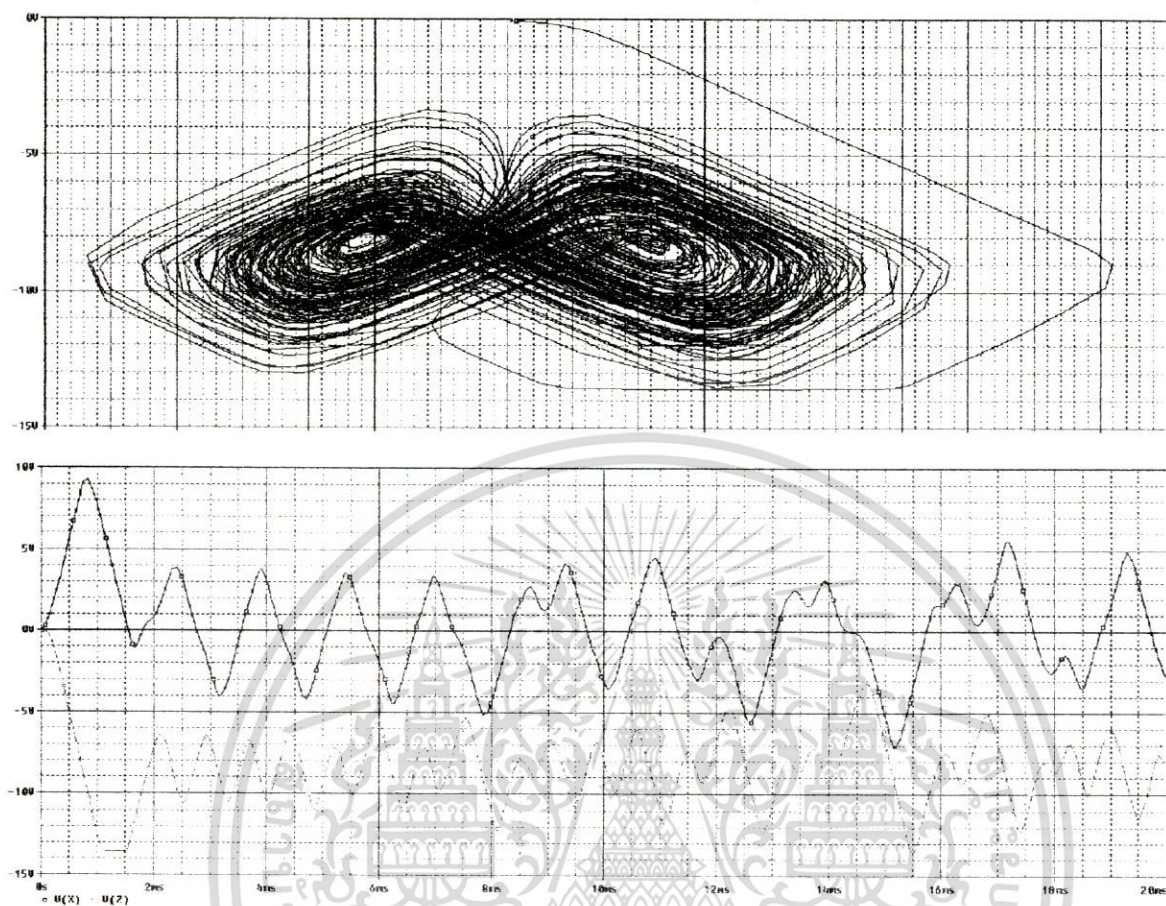
$$\begin{aligned}\frac{dv_1}{dt} &= -\frac{1}{R_1 C_1} v_1 - \frac{1}{R_1 C_1} v_2 \\ \frac{dv_2}{dt} &= -\frac{v_1}{R_4 C_2} + \frac{R_9}{R_8} \frac{v_2}{R_3 C_2} - \frac{v_1 v_3}{R_5 C_2} \\ \frac{dv_3}{dt} &= -\frac{v_3}{R_6 C_3} + \frac{v_1 v_2}{R_7 C_3}\end{aligned}\quad (3.11)$$

ค่า r เพื่อเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมกำหนดได้โดยค่า R_9/R_8 ผลการจำลองด้วย Pspice แสดงได้



รูปที่ 3.30.1 ผลการจำลองวงจรรอสวนแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen ค่า $r=0.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30.2 ผลการจำลองวงจรถอสวนแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen ค่า $r=0.5$

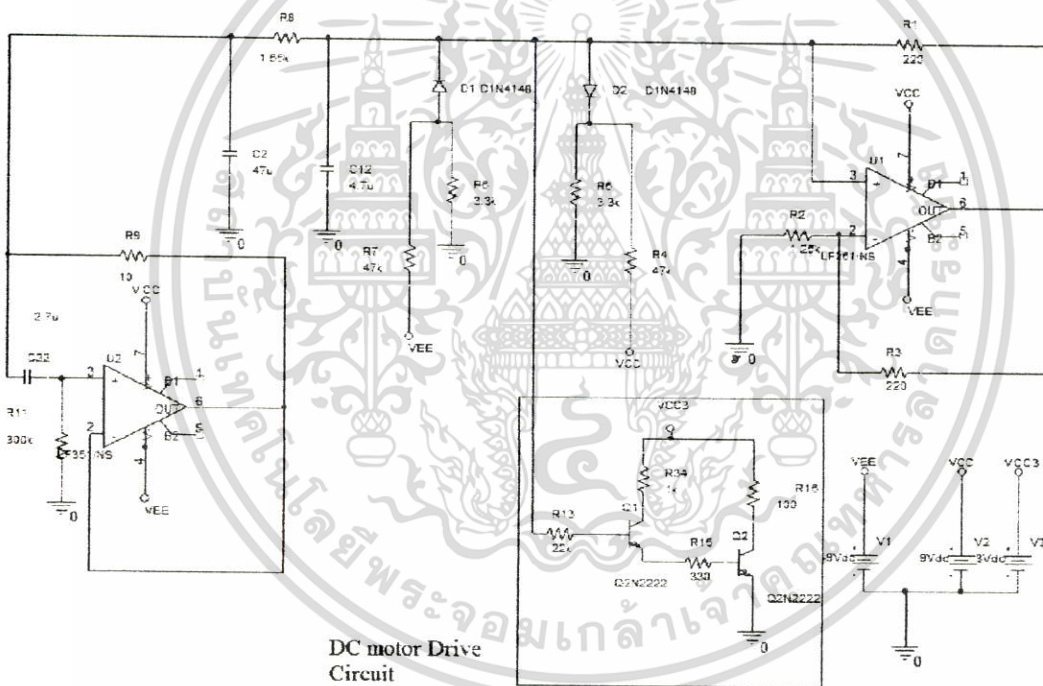
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการแสดงผลของวงจรที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นโมดูลสำหรับการทดลองในหัวข้อ 3.2- คือผลของ วงจร Chua ปรับปรุงใหม่สำหรับขับเคลื่อน หุ่นยนต์ลอว์นวดรูป หัวข้อ 3.3 ผลของวงจรถอยวน ใช้ฟังก์ชันเครื่องหมายและระบบขับเคลื่อนด้วยสัญญาณพัลส์ที่สามารถแทนอินพุตสัญญาณพัลส์ด้วยสัญญาณจาก วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นความถี่ หัวข้อ 3.4 ผลการจำลองวงจรถอยวนแบบ Wein bridge ที่ใช้เป็นสัญญาณ ของหุ่นยนต์ขีดเส้น และหัวข้อ 3.5 ผลการจำลองวงจรถอยวนแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen

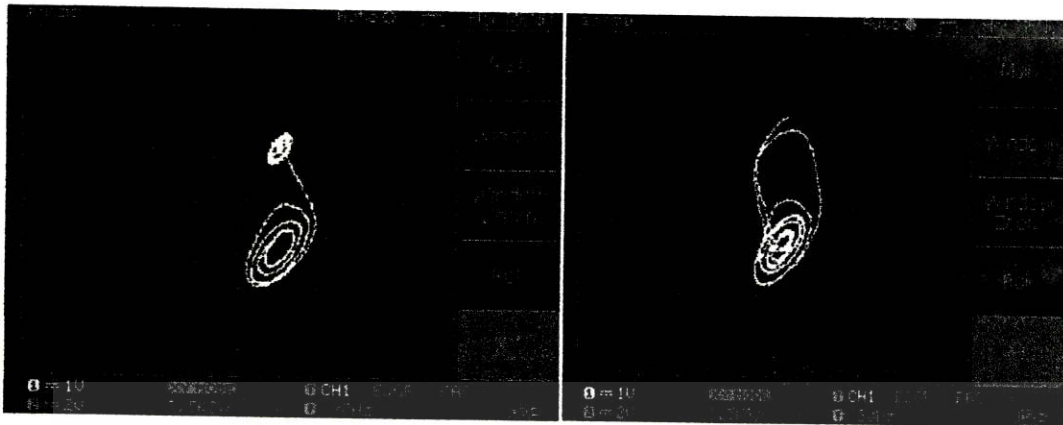
4.1 ผลการจำลองวงจร Chua ปรับปรุงใหม่

วงจร Chua ปรับปรุงใหม่ในรูปที่ 3.12 แสดงสัญญาณ V_{c1} และ V_{c2} เมื่อทดลองปรับค่า R_1

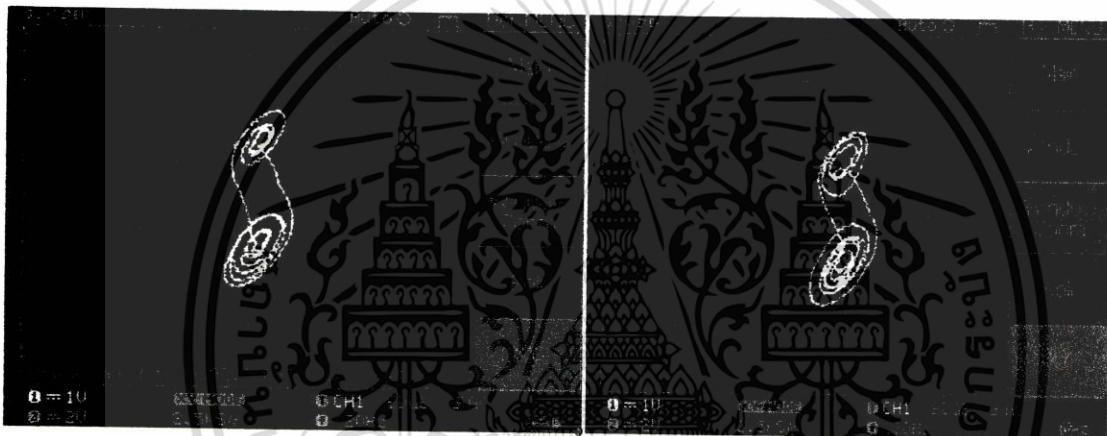


แสดงสัญญาณได้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงการปรับค่า R1 ของวงจร Chua เกิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบ 1 สกอร์



รูปที่ 4.2 แสดงการปรับค่า R1 ของวงจร Chua เกิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบ 2 สกอร์

ผลการใช้วงจร Chua ที่ทดลองต่อเป็นหุ่นยนต์วาดรูปแสดงรูปวาดได้

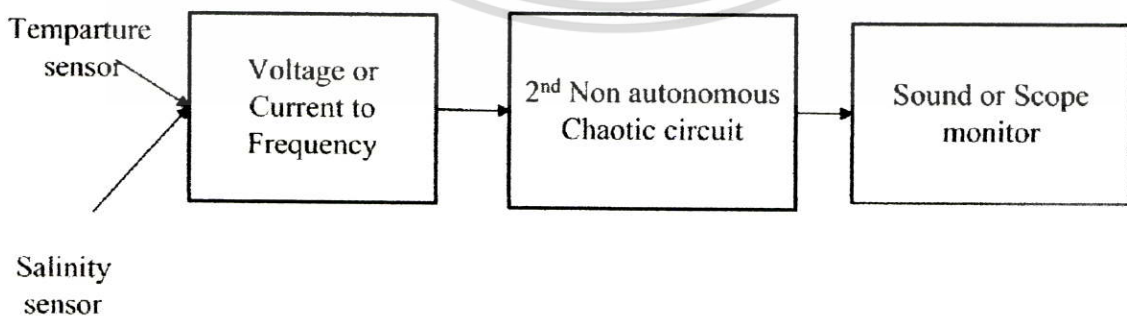
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลของการวาดรูปโดยหุ่นยนต์อลวนแบบ DIY

4.2 การใช้วงจรถวลอนอันดับสองเป็นตัวตรวจวัด

จากระบบตรวจวัดแทนอินพุตสัญญาณพัลส์ด้วยสัญญาณจากวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นความถี่ซึ่งตรวจจับอุณหภูมิและความเค็มเข้าที่วงจรถวลอนแบบ Nonautonomous ใช้ฟังก์ชันเครื่องหมายในรูป 3.23



รูปที่ 4.3 ระบบตรวจวัดแบบอลวน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นความถี่ได้จากการวัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2		การทดลองครั้งที่ 3		ผลการทดลองเฉลี่ย	
อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)	อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (kHz)
0	3.790	0	3.743	0	3.711	0	3.748
10	3.791	10	3.785	10	3.776	10	3.784
20	3.831	20	3.851	20	3.871	20	3.851
30	4.001	30	4.003	30	3.942	30	3.982
40	4.128	40	4.142	40	4.146	40	4.139
50	4.209	50	4.213	50	4.243	50	4.222
60	4.277	60	4.334	60	4.326	60	4.312

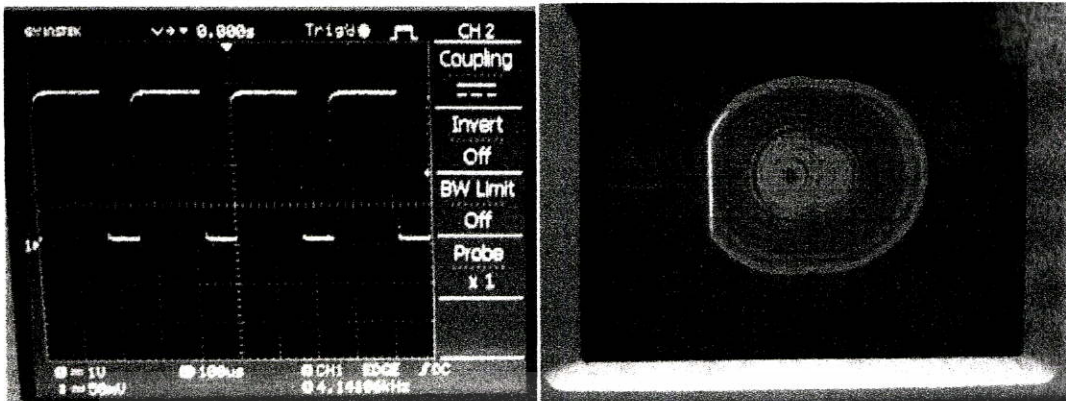
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นความถี่ได้จากการวัดเกลือ

การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2		การทดลองครั้งที่ 3		ผลการทดลองเฉลี่ย	
ปริมาณเกลือ (g.)	ความถี่ (kHz)	ปริมาณเกลือ (g.)	ความถี่ (kHz)	ปริมาณเกลือ (g.)	ความถี่ (kHz)	ปริมาณเกลือ (g.)	ความถี่ (kHz)
0	1.270	0	1.274	0	1.241	0	1.261
2	1.306	2	1.325	2	1.310	2	1.313
4	1.561	4	1.554	4	1.566	4	1.560
6	1.626	6	1.593	6	1.612	6	1.610
8	1.945	8	1.926	8	1.894	8	1.922

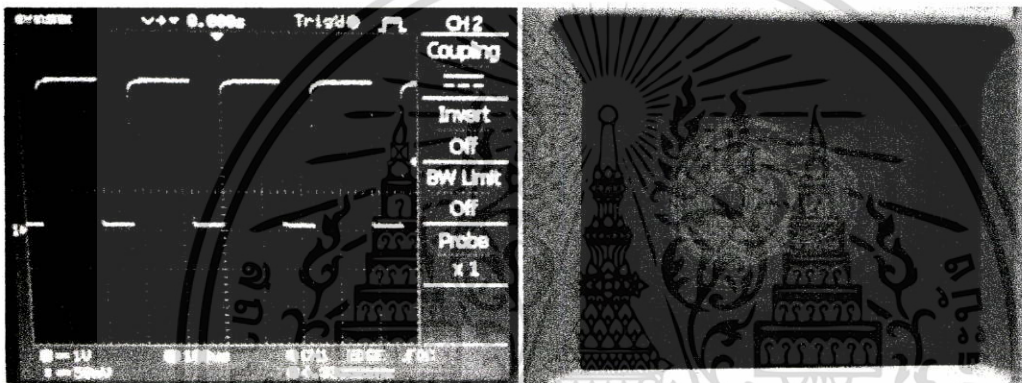


รูปที่ 4.4.1 ความถี่ของ V/F และสัญญาณอลวนที่อุณหภูมิ 20 องศา

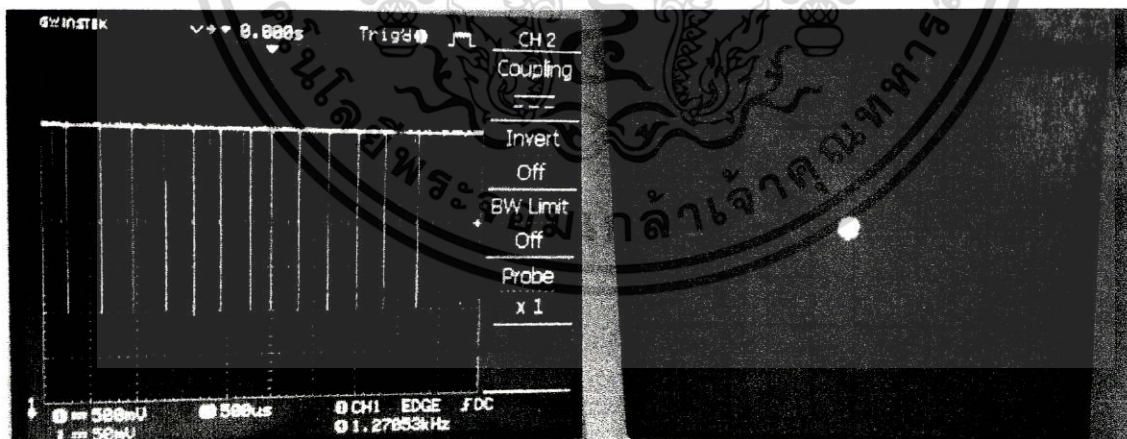
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4.2 ความถี่ของ V/F และสัญญาณอลวนที่อุณหภูมิ 40 องศา

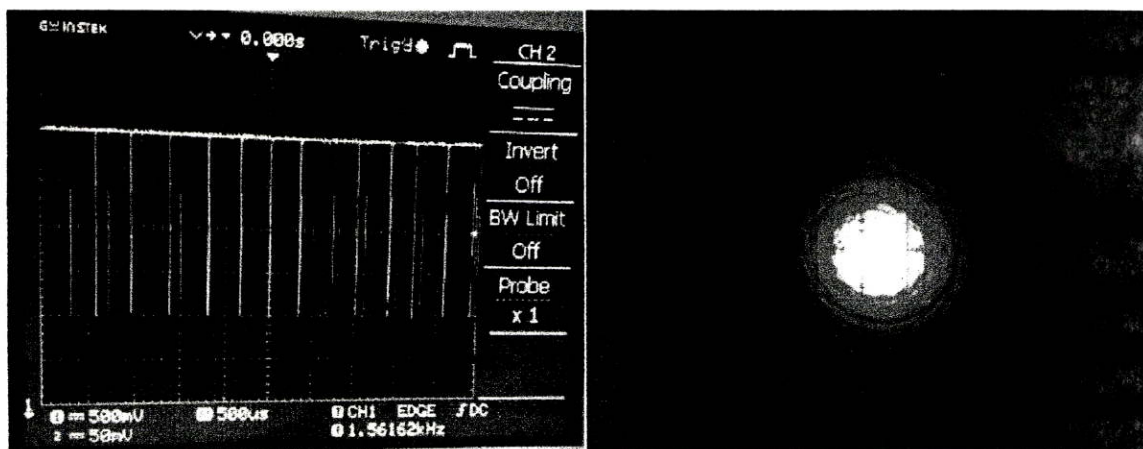


รูปที่ 4.4.3 ความถี่ของ V/F และสัญญาณอลวนที่อุณหภูมิ 60 องศา

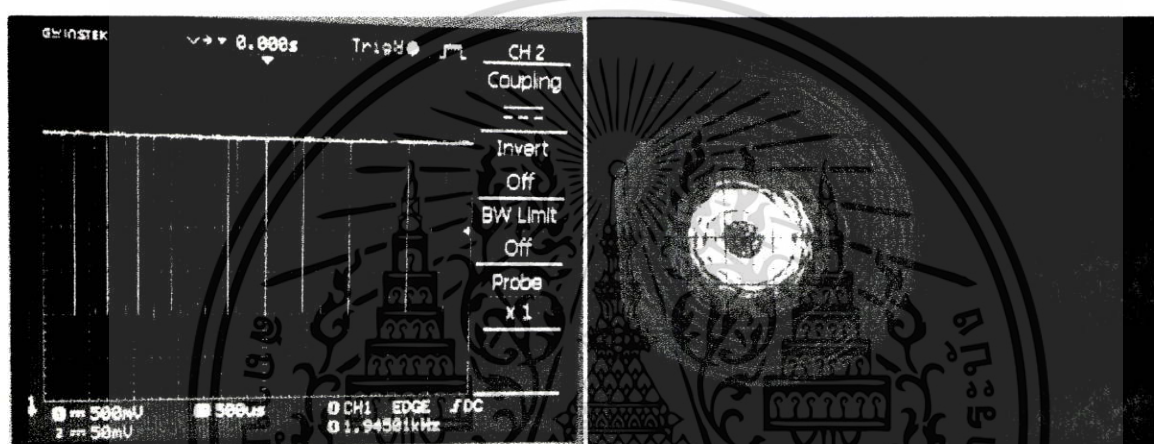


รูปที่ 4.5 ความถี่ของ V/F และสัญญาณอลวนปริมาณเกลือ 0g.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



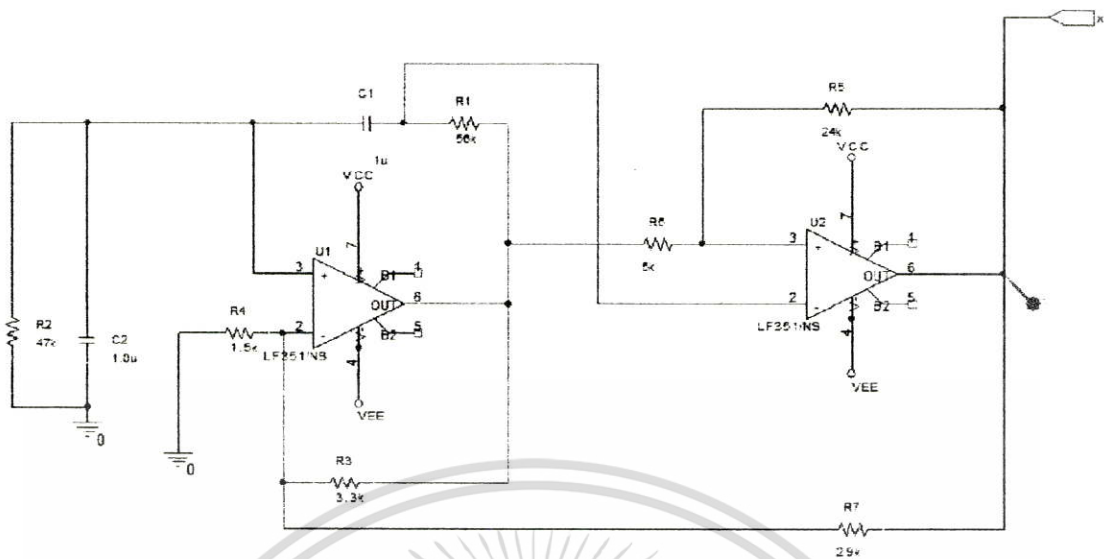
รูปที่ 4.5.2 ความถี่ของ V/F และสัญญาณอลวนปริมาณเกลือ 4g.



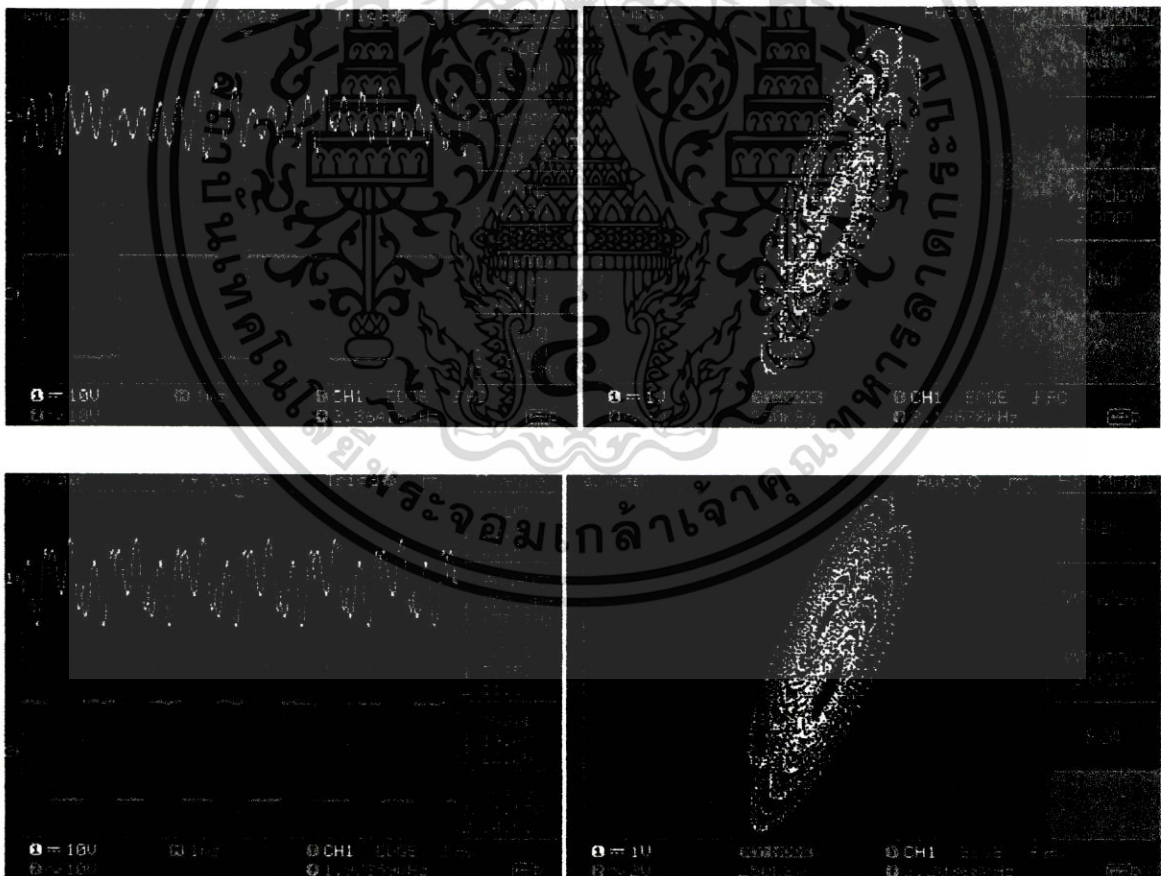
รูปที่ 4.5.3 ความถี่ของ V/F และสัญญาณอลวนปริมาณเกลือ 8g.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองวงจรออสซิลเลชันแบบ Wein bridge



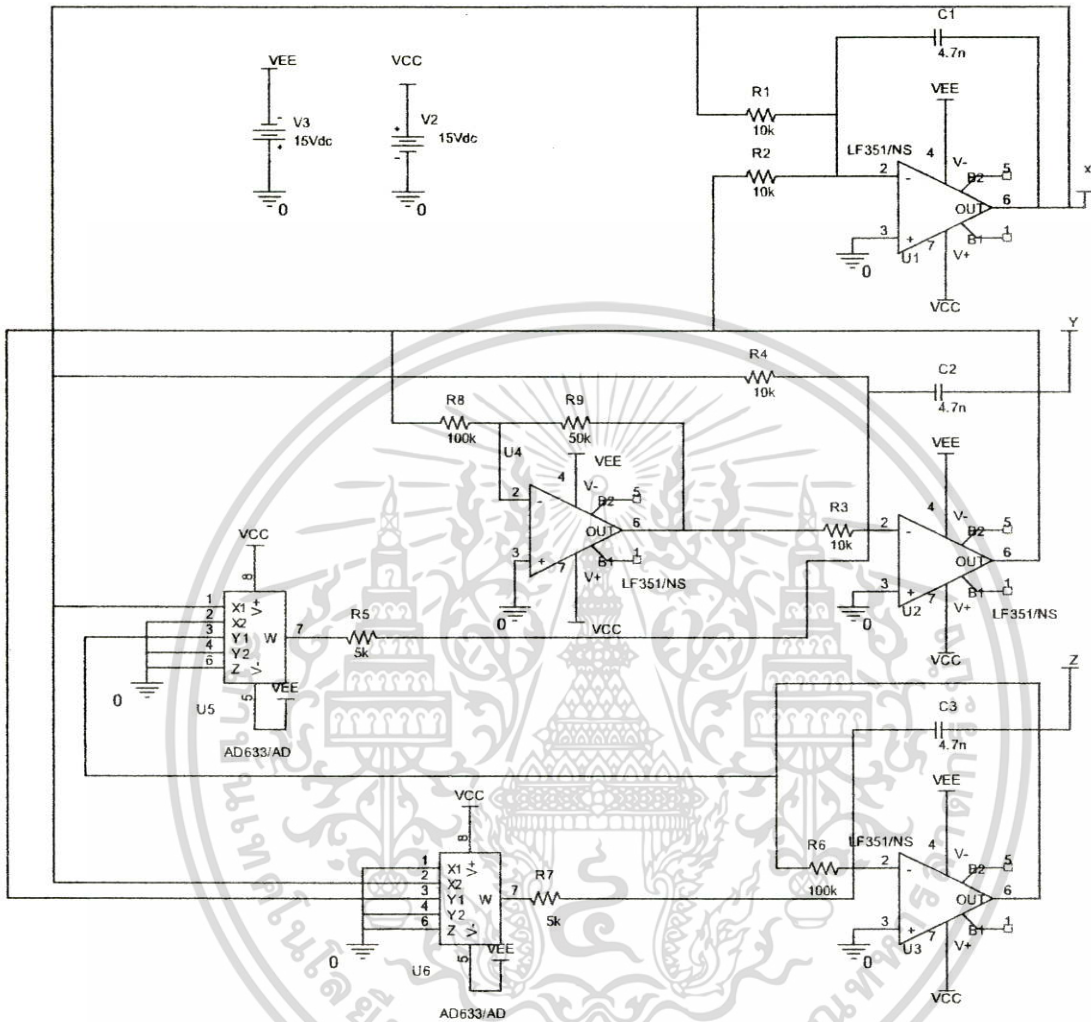
จากวงจรในหัวข้อ 3.25 ที่ออกเป็นสำหรับเป็นตัวกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมให้หุ่นยนต์ขีดเส้น ผลการทดลองโดยการปรับ R7



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองวงจรออสซิลเลชันแบบ Wein bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

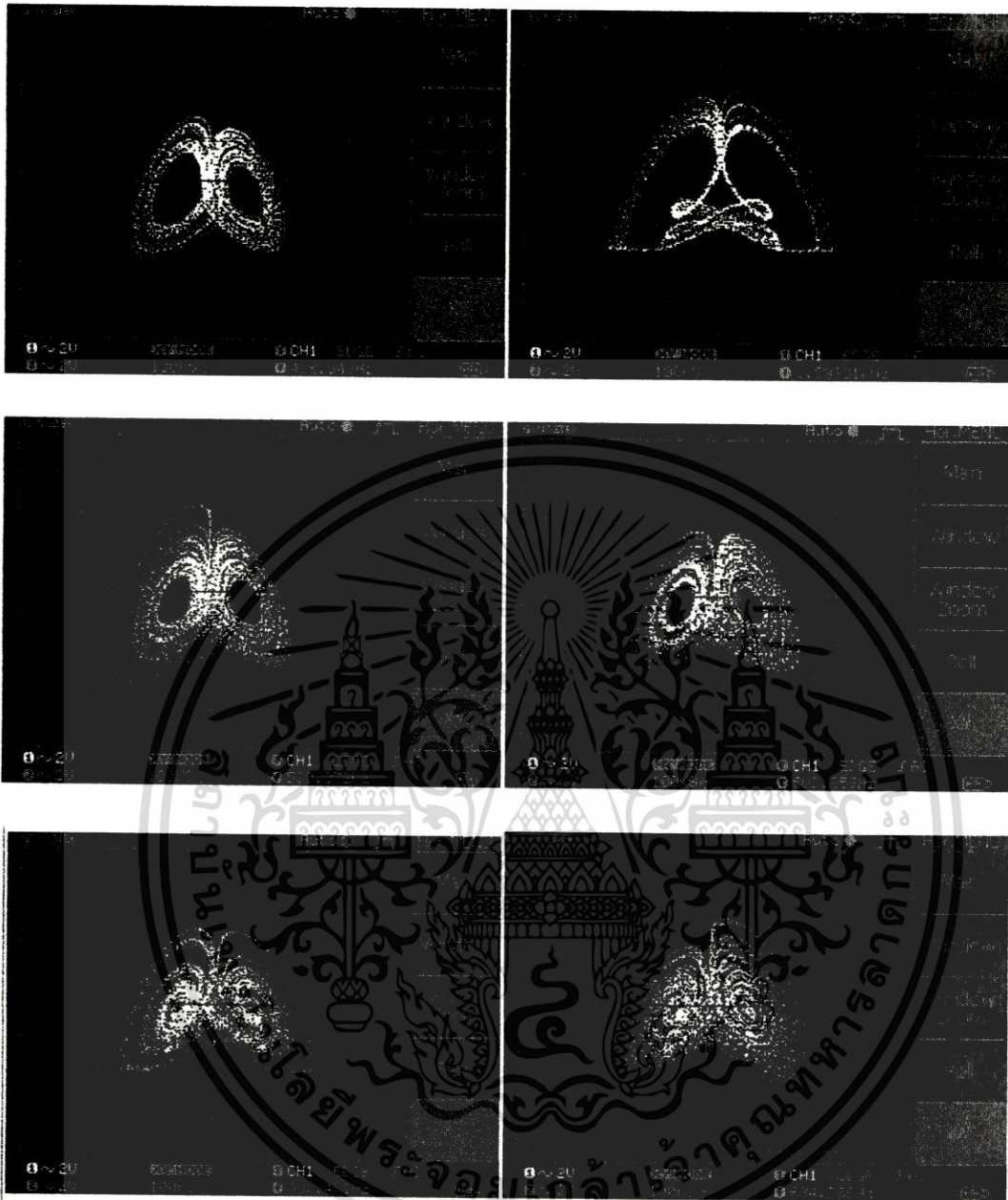
จากวงจรในหัวข้อ 3.5 การปรับพฤติกรรมของวงจรให้เปลี่ยนแปลงระหว่าง Lorenz และ Chen คือการปรับอัตราขยายของ U4 หรือปรับ R5 ให้มีค่าระหว่าง 10K-80K



ผลการทดลองแสดงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ผลการทดลองวงจรรอสวนแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบชุดหุ่นยนต์วาดรูป และหุ่นยนต์ขีดเส้นที่ทำเป็นชุด DIY พร้อมกล่องที่จัดทำเป็นเครื่องหมายการค้า ภายใต้ชื่อ “KMITL Engjoyneering”



รูป 4.8 ชุด DIY พร้อมกล่องเครื่องหมายการค้าชื่อ “KMITL Engjoyneering”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากจุดประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องสร้างชุดเรียนรู้ที่อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีออสวอนที่เป็นปรากฏการณ์วิทยาศาสตร์ที่น่าสนใจและสามารถประยุกต์ทั้งงานวิศวกรรมศาสตร์และศิลปะ สำหรับนักเรียนระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจนถึงระดับอุดมศึกษา ที่ใช้ทดลองเล่นเรียนรู้ใน วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ วิชาคณิตศาสตร์ หรือแบบ STEM โดยชุดทดลองใช้พื้นฐานคณิตศาสตร์ในระดับสมการอนุพันธ์ โดยออกแบบให้มีลักษณะเป็นของเล่น (educational toy) ที่สามารถสร้าง หุ่นยนต์ การกำเนิดรูปภาพศิลปะ การตรวจวัดสัญญาณ

วงจรที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นโมดูลสำหรับการเรียนรู้ทั้งหมดที่สร้างคือ-

1. วงจร Chua ปรับปรุงใหม่สำหรับขับเคลื่อนหุ่นยนต์ออสวอนวาดรูป
2. วงจรออสวอนใช้ฟังก์ชันเครื่องหมายและระบบขับเคลื่อนด้วยสัญญาณพัลส์ที่ใช้เป็นตัวตรวจวัด
3. วงจรออสวอนแบบ Wein bridge ที่ใช้เป็นสัญญาณของหุ่นยนต์ขีดเส้น
4. วงจรออสวอนแบบปรับได้ระหว่าง Lorenz และ Chen ที่ใช้สร้างเสียงดนตรี

โดยในงานวิจัยเปิดเผยผลบางส่วนเพราะอยู่ในช่วงดำเนินการจัดสิทธิบัตร และได้มีการเผยแพร่แก่บุคคลากรที่สอนนักเรียนมัธยมปลาย จัดบรรยายให้แก่นักเรียน รร. จุฬารัตนราชวิทยาลัย ที่ร่วมกิจกรรมค่ายโครงการวิศวกรรม ที่ วิศวกรรมศาสตร์



รูปที่ 5.1 แสดงงานบางส่วนเผยแพร่แก่นักเรียน ร.ร. วิทยาศาสตร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

ตัววงจรออสวอนนอกจากเพื่อการเรียนรู้ดังกล่าวแล้วสามารถใช้เพื่อเป็นสิ่งเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์สินค้าภายในประเทศซึ่งบางส่วนอยู่ช่วงกำลังวิจัยของผู้วิจัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www.creativethailand.org/th/>
- [2] <http://dpst-apply.ipst.ac.th/specialproject/index.php/menu-styles/stem-thailand>
- [3] <http://www.ed.gov/stem>
- [4] <http://eng.kofac.re.kr/eng/e2/e24/e241/v1.cms>
- [5] E. N. Lorenz, "Deterministic Non-periodic Flow," *J. Atmos. Sci.* 20, 130–141, 1963.
- [6] W. ABrock, D. Hsieh and B. LeBaron, *Nonlinear Dynamics, Chaos, and Instability: Statistical Theory and Economic Evidence*, MIT Press, Cambridge, MA, 1991.
- [7] I. R. Epstein and J. A. Pojman, *An Introduction to Nonlinear Chemical Dynamics. Oscillations, Waves, Patterns, and Chaos*, Oxford Univ. Press, 1998.
- [8] F Davide; M.Andersson,; M. Holmberg and I Lundstrom, "Chaotic chemical sensing," *Sensors Journal*, " *IEEE* ", vol.2, no.6, pp.656-662, Dec 2002.
- [9] N. Weiss, A. Garfinkel, M.L. Spano and W.L Ditto, "Chaos and chaos control in biology," *J. Clin. Invest.* vol.93, pp. 1355–1360, 1994.
- [10]. K. Aihara and R. Katayama, "Chaos Engineering in Japan," *Communications of the ACM*, vol. 38, no 1, pp.103-107, Nov. 1995.
- [11]. Special issue on Chaotic System, *Proc. of the IEEE*, vol. 75, no.8, 1987.
- [12]. Special issue on Tutorial and reviews, Bifurcation and chaos, Application *IEEE tran. On Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 40, no.10, 1993.
- [13]. Special issue on applications of nonlinear dynamics to electronic and information engineering. *Proc. of the IEEE*, vol.90, no.5, 2002.
- [14] L. Fortuna and M. Frasca, "Did Artist discover chaos before Scientis," *Internal Journal of Bifurcation and Chaos*, vol.20, pp 973-978 , 2010.
- [15] D.J. Aks and J.C. Sprott, "Quantifying aesthetic preference for chaotic patterns," *Journal of the Empirical Studies of the Arts*, vol.4 , pp. 1–16, 1996.
- [16] E. Bilotta and P. Pantano, "A Gallery of Chua Attractors," *World Scientific Series on Nonlinear Science, Series A 61*, Singapore, 2008.
- [17] D.SLATER, "Chaotic Sound Synthesis", *Computer Music Journal*, vol. 22, no. 2; pp. 12–19, 1998.
- [18] D.S. Dabby, "Creating Musical Variation," *Science 4* ,vol. 320 no. 5872 pp. 62-63, 2008.
- [19] O. Zuckerman , T. Grotzer and K. Leahy, "Flow blocks as a conceptual bridge between understanding the structure and behavior of a complex causal system," *Proc. of the 7th inter. conference on Learning sciences*, pp. 880-886, Bloomington, Indiana, June 27-July 01, 2006.
- [20] Z. Asgar, J. Chan, C. Liu and P Blikstein, "LightUp: a low-cost, multi-age toolkit for learning and prototyping electronics," *IDC 2011*, pp. 225-226, 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] M. S. Horn, R. J. K. Jacob, "Tangible programming in the classroom with tern," *CHI '07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.1965-1970, San Jose, CA, USA, April 28-May 03, 2007.
- [22] E. Schweikardt and M. D. Gross, "roBlocks: a robotic construction kit for mathematics and science education," *Proc. of the 8th inter. conference on Multimodal interfaces*, Banff, Alberta, Canada, pp. 72-75, Nov. 2006.
- [23] A. Bdeir, "Electronics as material: littleBits," *Proc. of the 3rd Inter. Conference on Tangible and Embedded Interaction*, Cambridge, United Kingdom, pp. 16-18, Feb. 2009.
- [24] <http://littlebits.cc/>
- [25] A. Bdeir, US Patent app. 20130343025: Modular electronic building systems with magnetic interconnections and methods of using the same, Dec. 2013.
- [26] www.picocricket.com/
- [27] arduino.cc/en/Main/arduinoBoardLilyPad
- [28] L. Buechley and M. Eisenberg, "The lilyPad arduino: Toward wearable engineering for everyone," *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 7, no. 2, pp. 12 -15, 2008
- [29] mindstorms.lego.com/
- [30] M. Resnick, F. Martin, R. Sargent and B. Silverman, "Programmable bricks: Toys to think with," *IBM Syst. Journal*, vol. 35, no. 3, pp. 443 -452, 1996.
- [31] <http://www.ni.com/academic/mindstorms/>
- [32] T. Karp, R. Gale, L. Lowe, V. Medina and E. Beutlich, "Generation NXT: Building young engineers with LEGOs," *IEEE Trans. Educ.*, vol. 53, no. 1, pp.80 -87, 2010.
- [33] F. Klassner and S. Anderson, "LEGO MindStorms: Not just for K-12 anymore," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 10, no. 2, pp. 12 -18 2003.
- [34] B. I. Marcus and W. S. Heit, US patent 7214066: Computer software and portable memory for an electronic educational toy having a contact sensitive display screen, May 2007.
- [35] B. I. Marcus and W. S. Heit, US patent 7217135: Electronic educational toy having a contact-sensitive display screen, May 2007.
- [36] J.C. Hsieh, E. G. Liang and E. Yin, US patent 7316567: Physical programming toy, Jan 2008.
- [37] A. Regan, US patent 7927103: Mathematics teaching kit, May 2011.
- [38] A. Khalsa and E. Murphy, US patent app.20130295536: A Apparatus and method for tools for mathematics instruction, May 2013.
- [39] G. Gandhi, Gy. Cserey, J. Zbrozek and T. Roska, "Anyone can build Chua's circuit: hands-on-experience with chaos theory for high school students," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol.19, no.4, pp. 1113-1125, 2009.

- [40] F. Bertacchini, E. Bilotta, L. Gabriele, P. Pantano and A. Tavernise, "Toward the use of Chua's Circuit in education, art and interdisciplinary research: Some implementation and opportunities," *Leonardo*, vol. 46, no. 5, pp. 456-463, 2013.
- [41] J.S. Walker and S. Terence, "Chaos in a simple impact oscillator: The Bender bouncer." *Am. J. Phys.*, vol.64, pp. 397-400, 1996.
- [42] J. E. Berger and G. Nunes, "mechanical Duffing oscillator for the undergraduate laboratory," *Am. J. Phys.*, vol. 65, no. 9, pp. 841-846, 1997.
- [43] D.C. Hamill, "Learning about chaotic circuits with Spice," *IEEE Trans. on Education*, vol.36, pp.28-35, 1993.
- [44] L.A.B. Tôrres and L.A Aguirre, "PCCHUA - a Laboratory setup for Real-Time Control and Synchronization of Chaotic oscillations," *Internal Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 15, pp. 2349-2360, 2005.
- [45] R.Kiliç and B. Karauz, "Implementation of a Laboratory Tool for Studying Mixed-Mode Chaotic Circuit," *Internal Journal of Bifurcation and Chaos*, vol.17, no.10, pp. 3633-3638, 2007.
- [46] R.Rocha, L.S. Martins-Filho and R.F. Machado, "A methodology for the teaching of dynamical systems using analogous electronic circuits," *Inter Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 43, no.4, pp. 334-345, 2006.
- [47] R.Kiliç, F.Y. Dalkiran "Utilizing SIMULINK in modeling and simulation of generalized chaotic systems with multiple nonlinear functions," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 18, no.4, pp 684-693,2010.
- [48] P. Sooraksa and K. Klomkarn, "No-CPU" chaotic robots: from classroom to commerce, *IEEE Circuits and Systems Magazine*, Vol.10 no.1, p.46-53, 2010.
- [49] K. Klomkarn and P. Sooraksa, "Simple Self Instructional Modules Based on Chaotic Oscillator: A Few blocks generate many patterns" *Inter Journal of Bifurcation and Chaos*, May, pp.1469-1491, 2011.
- [50] G.Chen G and T. Ueta, "Yet another chaotic attractor," *Int J Bifur Chaos*, Vol. 9, pp.1465-1466,1999.
- [51] J.Lü , G.Chen G and D. Cheng, "Bridge the gap between the Lorenz system and the Chen system,". *Int J Bifur Chaos*, Vol.12, pp. 2917-2926,2002,
- [52] S.Čelikovský and G.Chen, "On a generalized lorenz canonical form of chaotic systems," *Int J Bifur Chaos*, Vol. 12, pp. 1789-1812,2002
- [53] X.Wang , G.Chen and J. Lu, "A simple yet complex one-parameter family of generalized Lorenz-like systems.," *Int J Bifur Chaos*, Vol.22.2012
- [54] L.O. Chua, M. Komuro and T. Matsumoto, "The double scroll family," *IEEE Trans Circuits Syst.*, vol. 33 , pp. 1072-1118, 1986.
- [55] P.ACook, "Simple feedback systems with chaotic behavior," *Syst. Contr. Lett.*, vol. 6, pp. 223-227,1985.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [56] J.C.Sprott, *Chaos and Time-Series Analysis*, Oxford University Press, New York,2003.
- [57]M. P. Kennedy, "Robust op amp implementation of Chua's circuit", *Frequenz*," vol. 46, pp. 66-80, Mar.-Apr 1992.
- [58] L. A. B. Torres and L. A. Aguirre, "Inductorless Chua's circuit," *Electron. Lett.*, 2000, vol. 36, pp.1915-1916.
- [59]S. C. D. Roy, V. Nagarajan, "On inductor simulation using a unity-gain amplifier", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-5, pp. 95-98, June 1970.
- [60]A. Jansri, K. Klomkarn and P. Sooraksa, "Further investigation on trajectory of chaotic guiding signals for robotics systems," *Proc. Int. Symp. on Communications and Information Technology*, 2004, pp. 1166-1170.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปค่าใช้จ่ายในดำเนินการวิจัย

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
1 งบบุคลากร	-
2. งบดำเนินงาน	
2.1 ค่าตอบแทน วัสดุและวัสดุ	-
2.1.1 ค่าตอบแทน เช่น ค่าอาหารทำการนอกเวลา	-
ค่าตอบแทน ผู้ปฏิบัติงานให้ราชการ ค่าเบี้ยประชุมกรรมการ	-
2.1.2 ค่าใช้สอย เช่น	
1) ค่าจ้างเหมาออกแบบ PCB และทำจัดทำต้นแบบ	20,000
แผงวงจร ทั้งหมด	
2) ค่าจ้างเหมากัดลายแผ่น PCB และลายวงจร	20,000
3) ค่าจ้างทำบล็อกรุ่น	20,000
2.1.3 ค่าวัสดุ เช่น	
1) วัสดุสำนักงาน	10,000
เช่นหมึกพิมพ์ กระดาษพิมพ์	
2) วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ เช่นทรานซิสเตอร์ วงจรรวม	150,000
อุปกรณ์ตัวทานทานและตัวเก็บประจุ	
3) วัสดุเชิงกลเช่น ก่อโลหะ แผ่น PCB แผ่นพลาสติก	150,000
4) วัสดุหนังสือ วารสารและตำรา	20,000
5) วัสดุคอมพิวเตอร์	30,000
2.2 ค่าสาธารณูปโภค	-
3. งบลงทุน	
ค่าครุภัณฑ์	-
รวมงบประมาณที่เสนอขอ	420,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย

นายกฤตากร กล่อมการ

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

การศึกษา

อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์) สจล.

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (ไฟฟ้า) สจล.

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (ไฟฟ้า) สจล.

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Information security, Nonlinear electronics

ผลงานวิจัยตีพิมพ์

1. K. Klomkarn, A. Jansri and P. Sooraksa, "A design of stream cipher based on multi-chaotic functions," *Proc. Int. Symp. IEEE Communications and Information Technology*, pp. 931 – 935, 2004.
2. A. Jansri, K. Klomkarn and P. Sooraksa, "Further investigation on trajectory of chaotic guiding signals for robotic systems," *Proc. Int. Symp. IEEE Comm. and Inform. Tech.* 2004, pp.1166 – 1170, 2004.
3. A. Jansri, K. Klomkarn and P. Sooraksa, "On comparison of attractors for chaotic mobile robots," *Proc IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2536 – 2541, 2004, .
4. K. Klomkarn and P. Sooraksa, "Implement of A true Random Number Generator Using Chen's Attractor," *Proc. Int. Conf. Robot, Vision, Information, and Signal Processing*, pp.781-784, 2005.

Journal

1. P. Sooraksa and K. Klomkarn, "No-CPU" chaotic robots: from classroom to commerce, *IEEE Circuits and Systems Magazine*, Vol.10 no.1, p.46-53, 2010.
2. K. Klomkarn, P. Sooraksa and G. Chen, "New Construction of Mixed-Mode Chaotic Circuits," *Inter Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol.20 May, pp.1485-1497, 2010.
3. K. Klomkarn and P. Sooraksa, "Simple Self Instructional Modules Based on Chaotic Oscillator: A Few blocks generate many patterns" *Inter Journal of Bifurcation and Chaos*, May, pp.1469-1491, 2011.

สิทธิบัตร

P. Sooraksa, K. Klomkarn , AN AUTHENTICATION DEVICE patent application The World Intellectual Property Organization 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฤตากร กล่อมการ, วิธีการและอุปกรณ์แสดงตนสำหรับไฟล์ (Self authenticating file) เพื่อความมั่นคงของข้อมูล, ยื่นจดสิทธิบัตรไทย อยู่ในระหว่างตรวจสอบ

กฤตากร กล่อมการ, วงจรสร้างสัญญาณอลวนแบบหลากหลายรูปแบบ, ยื่นจดสิทธิบัตรไทย, หมายเลขคำขอ 1401000739 พ.ศ. 2557

กฤตากร กล่อมการ, วงจรอลวนแบบปีกผีเสื้อที่ความถี่สูง, ร่างสิทธิบัตรเพื่อขอจดสิทธิบัตรไทย

หนังสือ

กฤตากร กล่อมการ, การสื่อสารข้อมูล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542

กฤตากร กล่อมการ, วิทยากรรหัสลับสำหรับความมั่นคงปลอดภัยสารสนเทศ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558

รางวัลงานวิจัย

1.งานวิจัยเด่นของ สกว. ปี 51 “การสร้างตัวดึงดูดอลวนและการประยุกต์”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

2. นวัตกรรมโทรคมนาคมยอดเยี่ยมประเภทต้นแบบโทรคมนาคม (Telecom Prototype) สถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม พ.ศ. 2553

รางวัลวิชาชีพ

1.ข้าราชการพลเรือนดีเด่น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กระทรวงศึกษาธิการ ประจำปี พ.ศ. 2554

2. รางวัลยกย่องเชิดชูเกียรติเป็นผู้ทำคุณประโยชน์ทางการศึกษาระดับจังหวัด พ.ศ. 2555 สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมสวัสดิการและสวัสดิภาพครูและบุคลากรทางการศึกษา

รางวัลนานาชาติ

“Lectureship Award” in The 10th International symposium on Advances in Techonology Education, 13-16 Sept. 2016, Sendai Japan.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้