

ตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบสองโหมดเพื่อแนวทางการประยุกต์ทางด้านศิลปะ

DUAL-MODE CHAOTIC OSCILLATOR : POTENTIAL APPLICATIONS FOR ART



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-070-132

ตัวกำเนิดสัญญาณอววนแบบสองโหมดเพื่อแนวทางการประยุกต์ทางด้านศิลปะ

DUAL-MODE CHAOTIC OSCILLATOR : POTENTIAL APPLICATIONS FOR ART



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-070-132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DUAL-MODE CHAOTIC OSCILLATOR : POTENTIAL APPLICATIONS FOR ART



MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

KMITL-2018-EN-M-070-132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

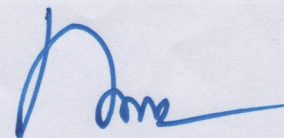
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลเตอร์แบบสองโหมดเพื่อแนวทางการประยุกต์ทางด้านศิลปะ
Thesis Title Dual-mode Chaotic Oscillator : Potential Applications for Art
นักศึกษา นายอุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล
รหัสประจำตัว 57601305
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-070-132

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.วีระพล	โมนะยะกุล	
รศ.ดร.สุรพันธ์	เอื้อไพบูลย์	
รศ.ดร.อรรถสิทธิ์	หล้าสกุล	
รศ.ดร.ชวลิต	เบญจางคประเสริฐ	
รศ.ดร.ปิติเขต	สุรักษา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-302 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวกำเนิดสัญญาณอลวนแบบสองโหมดเพื่อแนวทางการประยุกต์ทางด้านศิลปะ
นักศึกษา	นายอุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล
รหัสประจำตัว	57601305
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอตัวตั้งดูอลวนสองโหมดแบบใหม่ โดยระบบอลวนแบบสองโหมดนี้ประกอบด้วยวงจร Chua แบบไร้ตัวเหนี่ยวนำและตัวกำเนิดสัญญาณอลวนแบบ Wien bridge ซึ่งวัตถุประสงค์ของวงจรที่นำเสนอคือค้นหาแนวทางการประยุกต์ในงานศิลปะ วงจรที่นำเสนอทำได้ง่ายและสามารถสร้างขึ้นได้อย่างรวดเร็วในห้องปฏิบัติการ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวงจรที่นำเสนอมีศักยภาพสามารถประยุกต์กับงานศิลปะนามธรรมได้

Thesis	Dual-mode Chaotic Oscillator : Potentail Applications for Art
Student	Mr.Udomsit Tangtrakunphaisan
Student ID.	57601305
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Pitikhate Sooraksa

ABSTRACT

This thesis presents new dual chaotic attractors. The dual-mode chaotic system comprises inductorless Chua's circuit and a chaotified Wien bridge oscillator. The objective of the proposed circuit is to find potential applications in art. The proposed circuit is simple and can be rapidly constructed in the laboratory. The results show that the proposed circuits has potential to be applied for abstract art.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาในการทำงาน ซึ่งข้าพเจ้าต้องขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา และ ผศ.ดร.กฤตากร กล่อมการ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความรู้ ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ นายศักดา สาครตานันท์ และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ได้ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้า มาโดยตลอด ทำให้สามารถผ่านพ้นอุปสรรคต่าง ๆ ไปได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ข้าพเจ้ามีวันนี้ คือ บิดา มารดา พี่ชายต่างมารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูอบรมสั่งสอนข้าพเจ้ามาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่ในทุก ๆ ด้าน ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนข้าพเจ้ามีวันนี้ได้ ข้าพเจ้าขอรำลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และสำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับ บิดา มารดา พี่ชายต่างมารดา และครูอาจารย์ของข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

อุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของงานวิจัย.....	2
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.7 ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	3
1.8 เนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 นิยามตัวดึงดูด.....	6
2.3 วงจร Chua.....	7
2.4 ตัวกำเนิดสัญญาณ Wein bridge.....	11
2.5 ศิลปะนามธรรม (Abstract Art).....	12
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย.....	14
3.1 หลักการออกแบบการสร้างสัญญาณออสซิลเลชันแบบสองโหมด.....	14
3.2 ตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบคู่ (Couple chaotic oscillator).....	18
3.2.1 ระบบ x-couple.....	18
3.2.2 ระบบ y-couple.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	30
4.1 ผลการทดลองการต่อวงจร chua.....	31
4.2 ผลการทดลองการต่อวงจร x-couple.....	35

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการทดลองการต่อวงจร y-couple.....	36
4.4 ผลการทดลองวงจรอวลวนแบบ Wein bridge.....	37
4.5 แนวทางการนำหุ่นยนต์อวลวนกับงานวาดรูปนามธรรม.....	40
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	44
5.1 สรุปผลวิจัย.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะในการนำไปประยุกต์ใช้.....	45
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก ก.....	49
ภาคผนวก ข.....	56
ประวัติผู้เขียน.....	63



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้จำลองวงจร x-couple.....	20
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้จำลองวงจร y-couple.....	25
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวงจร Chua.....	31
ก.1 การสร้างสัญญาณออลวน third-order ODE systems และ Lyapunov exponents.....	53



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Leon Ong Chua (ค.ศ. 1984 – ปัจจุบัน).....	5
2.2 วงจร Chua.....	7
2.3 v-i characteristic ของ Chua ไดโอด.....	8
2.4 ตัวตึงดูดแบบ Chua แบบ 3 มิติ (ก. การม้วนอลวน ข. การม้วนอลวน 2 ลูก).....	10
2.5 วงจรตัวกำเนิดสัญญาณ Wein bridge	11
2.6 Max Karl Werner Wien (ค.ศ. 1866 – 1938).....	12
2.7 ตัวอย่างผลงานของ Clippa ชื่อภาพ spirale วาดใน ค.ศ. 1951.....	13
2.8 ตัวอย่างผลงานของ Tobey ชื่อภาพ Morning Glass วาดใน ค.ศ. 1975.....	13
3.1 วงจรสร้างสัญญาณ Wein bridge.....	15
3.2 ฮิสเทอรีซิสฟังก์ชัน (The hysteresis function).....	16
3.3 วงจร Chua โดยใช้อปแอมป์ (op-amp).....	17
3.4 ลักษณะเฉพาะการไม่เป็นเชิงเส้นของตัวต้านทาน.....	17
3.5 วงจรตัวกำเนิดสัญญาณอลวนแบบสองโหมด (Dual mode chaotic oscillator).....	18
3.6 วงจร x-couple กำหนดค่า $R_{17} = 10k\Omega$	19
3.7 วงจร x-couple ที่ใช้ในการจำลอง.....	21
3.8 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(x), V(y)$ (1).....	22
3.9 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(x), V(x)$ (2).....	22
3.10 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(x1), V(y1)$ (1).....	23
3.11 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(x1), V(x1)$ (2).....	23
3.12 วงจร y-couple กำหนดค่า $R_{17} = 10k\Omega$	24
3.13 วงจร y-couple ที่ใช้ในการจำลอง.....	26
3.14 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(x), V(y)$ (1).....	27
3.15 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(y), V(y)$ (2).....	27
3.16 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(x1), V(y1)$ (1).....	28
3.17 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(y1), V(y1)$ (2).....	28
4.1 การทดลองต่ออุปกรณ์ลงบอร์ดทดลองแบบ synchronization	30
4.2 วงจร Chua.....	31
4.3 ผลการใช้ค่าความต้านทาน $R_8 = 0\Omega$ ในวงจร Chua	32
4.4 ผลการใช้ค่าความต้านทาน $R_8 = 400\Omega$ ในวงจร Chua.....	32
4.5 ผลการใช้ค่าความต้านทาน $R_8 = 800\Omega$ ในวงจร Chua.....	33
4.6 ผลการใช้ค่าความต้านทาน $R_8 = 1200\Omega$ ในวงจร Chua.....	33
4.7 ผลการใช้ค่าความต้านทาน $R_8 = 1600\Omega$ ในวงจร Chua.....	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ผลการใช้ค่าความต้านทาน $R_8 = 2000\Omega$ ในวงจร Chua.....	34
4.9 การระบายความร้อนของหลอด 2 หลอด ที่ค่า $R_{17} \geq 2.72k\Omega$	35
4.10 x-couple ซิงโครไนซ์.....	36
4.11 การระบายความร้อนของหลอด 2 หลอด ที่ค่า $R_{17} \leq 100\Omega$	36
4.12 y-couple ซิงโครไนซ์.....	37
4.13 วงจรอลวนแบบ Wein bridge.....	37
4.14 สัญญาณอลวนแบบ Wien bridge ในโดเมนเวลา ความถี่ = 2.36476 kHz.....	38
4.15 สัญญาณอลวนแบบ Wien bridge ตัวตั้งจุดอลวน ความถี่ = 2.16678 kHz.....	38
4.16 สัญญาณอลวนแบบ Wien bridge ในโดเมนเวลา ความถี่ = 1.97359 kHz.....	39
4.17 สัญญาณอลวนแบบ Wien bridge ตัวตั้งจุดอลวน ความถี่ = 2.20368 kHz.....	39
4.18 หุ่นยนต์ Doodle.....	40
4.19 รูปวาดจากหุ่นยนต์ Doodle แบบที่ 1.....	41
4.20 รูปวาดจากหุ่นยนต์ Doodle แบบที่ 2.....	41
4.21 รูปวาดจากหุ่นยนต์ Doodle แบบที่ 1 ใส่เฟรม Fibonacci.....	42
4.22 รูปวาดจากหุ่นยนต์ Doodle 2 ใส่เฟรม Fibonacci โดยการสุมตำแหน่งโดยใช้สัญญาณอลวน.....	43
ก.1 ตัวตั้งจุดแบบ Chen.....	52
ก.2 ตัวตั้งจุดแบบ Chen ในแกนเวลา.....	53
ก.3 การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ที่แทนด้วยวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์.....	54
ก.4 สัญญาณอลวนจากตัวตั้งจุด Sprott ในลักษณะ 2 มิติระหว่างระนาบ x กับ x'	55

VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การประยุกต์การใช้งานทฤษฎีออลวนกับสาขาวิศวกรรม ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลก คุณสมบัติของการประสานหรือเข้ากันแบบออลวนด้วยระบบพารามิเตอร์เดียวกันและสัมพันธ์สัญญาณรบกวน สามารถนำมาปรับใช้สำหรับการแพร่กระจายของคลื่นความถี่และความปลอดภัยในการสื่อสาร [1-3] โดยใช้เทคนิคการเข้ารหัสแบบใหม่ที่มีความอ่อนไหวต่อคุณสมบัติของเงื่อนไขเริ่มต้น จะเป็นประโยชน์สำหรับการเข้ารหัสข้อความเสียงภาพและสัญญาณวิดีโอ[4] ซึ่งปรากฏการณ์ออลวนที่เกิดขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบไม่เป็นเชิงเส้นในวงจรหรือระบบ มีความสำคัญต่อระบบควบคุมและระบบไฟฟ้ากำลัง[5,6] ไม่เพียงแต่ในวงการวิศวกรรม พฤติกรรมของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ออลวนที่รู้จักกันดีหรือวงจรของ Chua สามารถรับชมภาพความงามได้โดยใช้คอมพิวเตอร์จำลอง[7]

ในด้านวิศวกรรมดนตรี ระบบออลวนยังสามารถนำไปใช้ในการสร้างและควบคุมสัญญาณเสียง ซึ่งมีนักวิจัยบางท่าน[8] ใช้วงจรออลวนในการสร้างเครื่องดนตรี ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น หัวข้อการศึกษาพลศาสตร์ออลวนแบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่น การสื่อสารโทรคมนาคม ข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงวิศวกรรมดนตรี เป็นสิ่งจำเป็น ในด้านวิศวกรรมศึกษา[9] แสดงให้เห็นถึงวิธีการศึกษาทฤษฎีของ Wien bridge, วงจร Chua และวงจรออลวนง่าย ๆ โดยการจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE การใช้ฮาร์ดแวร์ของ Wein bridge และวงจร Chua สำหรับนักเรียนในห้องทดลองนำเสนอ[10] อย่างไรก็ตามระบบเหล่านี้ไม่เหมาะสำหรับการทดสอบในระยะเวลาสั้นและต้นทุนต่ำ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงวงจรออลวนแบบสองโหมดแบบง่าย ๆ ที่สามารถทำงานได้จากความต้านทานเชิงลบและจุดการสร้างสัญญาณแบบย้อนกลับในมุมมองที่ง่ายต่อการสร้าง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งศึกษาการสร้างสัญญาณออลวนแบบสองโหมดด้วยอุปกรณ์แอนะล็อก เช่น ออปแอมป์ (op-amp) ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อหาค่าความกว้างของช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้แทนสมการออลวนด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขแบบต่าง ๆ ที่เหมาะสมที่สุด ในการสร้างสัญญาณออลวนแบบคู่ด้วยออปแอมป์ (op-amp) มากที่สุด และหาแนวทางในการนำมาประยุกต์กับศิลปะ การออกแบบด้วยอุปกรณ์แอนะล็อก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำได้ง่ายและเหมาะสมสำหรับเป็นสื่อการเรียนรู้และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ดีอีกทั้งมีต้นทุนต่ำ

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ตั้งสมมุติฐานไว้ว่าระเบียบวิธีที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสัญญาณอลวนแบบสองโหนดนั้น คือ ระเบียบวิธีของ Chua และระเบียบวิธีของ Wein bridge เมื่อเปรียบเทียบเชิงประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้ได้จริง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

จากปัญหาและสมมุติฐานที่ได้กล่าวไปข้างต้นนั้น จึงเป็นที่มาของขอบเขตงานวิจัยนี้ คือ การใช้สมการ Wein bridge และสมการอลวน Chua เท่านั้น ไม่ครอบคลุมสมการอลวน Lorenz, สมการอลวน Rossler และสมการอลวน Ueta โดยใช้อุปกรณ์สร้างตัวกำเนิดสัญญาณ คือ ออปแอมป์ (op-amp) เป็นหลัก ซึ่งสมการอลวนแบบไหนมีความเหมาะสมกับการใช้ออปแอมป์ (op-amp) และสามารถนำไปเป็นแนวทางการประยุกต์ทางศิลปะ

1.5 ขั้นตอนของงานวิจัย

โดยการศึกษาวิจัยได้เริ่มการวิจัยโดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.5.1 ขั้นตอนการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานและการใช้งานออปแอมป์ (op-amp)

- ศึกษาทฤษฎีระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อเป็นพื้นฐานการออกแบบและสร้างวงจรอลวน
- ศึกษาตัวดึงดูดอลวนแบบต่าง ๆ
- ศึกษาการเปรียบเทียบเชิงประสิทธิภาพ
- ศึกษาทฤษฎีและการใช้งานออปแอมป์ (op-amp)

1.5.2 ขั้นตอนการทดลอง

- ออกแบบวงจร
- ดำเนินการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลและเปรียบเทียบเชิงประสิทธิภาพ
- ประเมินและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- ประยุกต์ใช้งานกับศิลปะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น

การศึกษานี้มุ่งเน้นใช้อุปกรณ์ออปแอมป์ (op-amp) ที่สามารถหาอุปกรณ์ได้ง่าย เนื่องจากศึกษาได้อย่างสะดวกรวดเร็วเข้าใจง่าย ซึ่งเหมาะกับศิลปินที่มีองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมพื้นฐาน สามารถนำไปใช้ต่อยอดได้

1.7 ข้อจำกัดของงานวิจัย

อุปกรณ์ใช้ออกแบบสำหรับ Wein bridge และตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบ Chua เท่านั้น ไม่ครอบคลุมสมการออสซิลเลชันแบบอื่น ๆ

1.8 เนื้อหาวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีเนื้อหา ดังนี้ บทที่ 1 บทนำ แสดงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมุติฐานของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ข้อจำกัดงานวิจัย และเนื้อหาวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวข้อง แสดงทฤษฎีออสซิลเลชันและวงจรที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ในการสร้างสัญญาณออสซิลเลชันด้วยการใช้ความต้านทานเชิงลบและเทคนิคการสร้างสัญญาณแบบย้อนกลับ

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย หลักการออกแบบและสร้างสัญญาณออสซิลเลชันแบบสองโหมด และตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบคู่ในแบบต่าง ๆ

บทที่ 4 ผลการทดลอง แสดงการนำผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มาทดลองลงบอร์ดทดลอง เพื่อให้ได้สัญญาณออสซิลเลชันตามทีออกแบบไว้ในบทที่ 3

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ แสดงการสรุปเนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้และแนวทางการประยุกต์การนำมาใช้ในหุ่นยนต์วาดภาพ

บทนี้ได้แสดงภาพรวมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในบทต่อไปจะเป็นวรรณกรรมปริทัศน์ (Literature Review) โดยจะนำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขับเคลื่อนหุ่นยนต์ลาดตระเวนให้เคลื่อนที่ครอบคลุมพื้นที่ในเวลาจำกัดในเอกสารอ้างอิง[14] การใช้เป็นสัญญาณสุ่มจริงเพื่องานวิทยาการรหัสลับหรือการจำลองทางวิทยาศาสตร์ในเอกสารอ้างอิง[6] และการใช้ขีดความเร็วรอบมอเตอร์เพื่อประหยัดพลังงานในงานปั้นผลสมอุตสาหกรรมในเอกสารอ้างอิง[22] โดยวงจรที่ใช้สร้างสัญญาณดังกล่าวอาจใช้วงจรของ Chua[20] หรือวงจรที่สร้างจากสมการอนุพันธ์ที่สามารถกำเนิดพฤติกรรมในเอกสารอ้างอิง[20] โดยผู้วิจัยได้เสนอวงจรสร้างสัญญาณแบบหลากหลายรูปแบบในเอกสารอ้างอิง[1] ที่ทำงานในย่านความถี่ 10 kHz – 1 MHz เพื่อใช้สำหรับงานในย่านความถี่ต่ำข้างต้น ด้วยลักษณะของสัญญาณเหมือนค่าสุ่มทำให้การสื่อสารแบบมีคุณสมบัติเข้ารหัสลับได้โดยตัวสัญญาณเองในเอกสารอ้างอิง[22] หรือสัญญาณมีความถี่แถบกว้าง ดังนั้นจึงสามารถใช้สัญญาณเป็นคลื่นพาห้สำหรับการสื่อสารแบบมอดูเลตด้วย[17] และด้วยที่ลักษณะของสัญญาณคล้ายสัญญาณรบกวน แต่สามารถวัดค่าคุณสมบัติทางโดเมนของเวลาได้ เช่น ค่า Lyapunov และค่า correlation dimension จึงทำให้สามารถใช้สัญญาณเป็นคลื่นพาห้เรดาร์[22] และสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมระยะไกลที่ป้องกันการรบกวน (Jamming) ดังในสิทธิบัตร[17] ได้เช่นกัน



รูปที่ 2.1 Leon Ong Chua (ค.ศ. 1984 – ปัจจุบัน)[17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 นิยามตัวดึงดูด

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

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

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

$$\lim_{t \rightarrow 0} \varphi(x, t) = A \quad (2.1)$$

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 ห่างกันเล็กน้อยดังนั้น attractor มีรายคาบยาวมาก ๆ

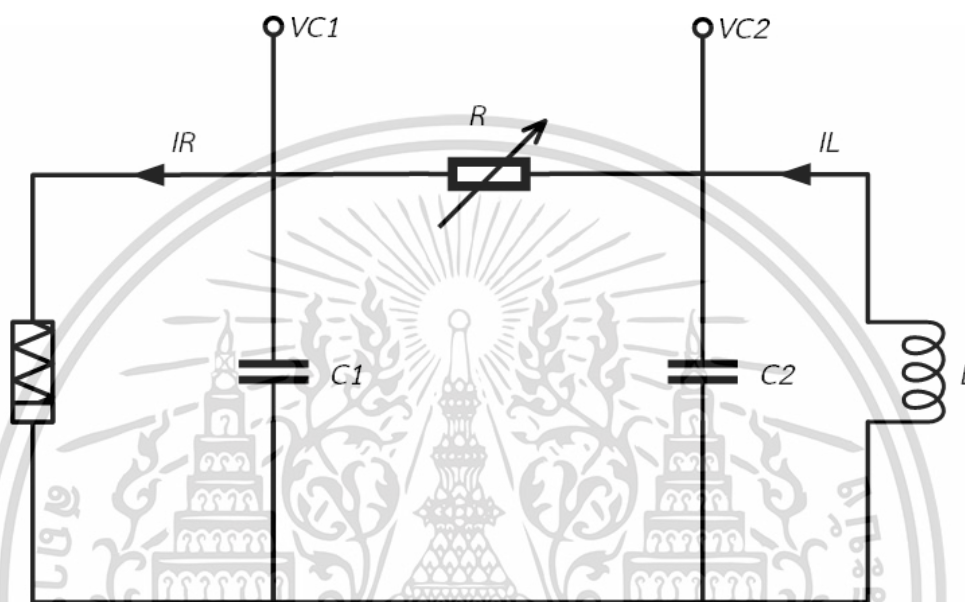
สำหรับคุณสมบัติที่สำคัญที่แสดงว่าตัวดึงดูดเป็นอลวน คือ คุณสมบัติที่ไวต่อค่าเริ่มต้น ซึ่งเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้นให้ต่างกันเพียงเล็กน้อย เส้นทางโคจรก็จะให้ลักษณะที่ต่างกันโดยสิ้นเชิงนั้นสามารถวัดค่าความไวนี้ได้ โดย Lyapunov exponents ซึ่งแสดงเส้นทางโคจรของ x เมื่อ เวลา t ได้คือ

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

โดย λ เป็นค่า Lyapunov เนื่องจากตัวดึงดูดอลวน เกิดขึ้นในมิติขนาด 3 มิติ ดังนั้นเงื่อนไขที่แสดงความไวต่อค่าเริ่มต้น ของสมการที่ (2.2) ค่า Lyapunov ของทิศทางของการเคลื่อนที่ใน 3 มิติ (x, y, z) จะต้องมีค่าเป็นบวก 1 ค่า เพื่อแสดงทิศทางของการแยกจากกัน (stretch) ของเส้นโคจรของตัวดึงดูด และเพื่อให้ตัวดึงดูดอยู่ในขอบเขต จะต้องมีค่า Lyapunov เป็นลบหนึ่งค่า เพื่อแสดงการพับเข้า (fold) และมีค่า Lyapunov เป็น 0 อยู่หนึ่งค่า เพื่อแสดงทิศทางของการไหลของตัวดึงดูด หรือกล่าวได้ว่า ถ้าตัวดึงดูดเกิดขึ้นใน 3 มิติและเป็นอลวนแล้ว ถ้า λ_1 เป็น Lyapunov ที่มากที่สุด และ λ_3 เป็นค่า Lyapunov ที่น้อยที่สุด แล้วค่า Lyapunov ของระบบจะแสดงค่า $\lambda_1 > \lambda_2 = 0 > \lambda_3$ ซึ่งมีค่า (+, 0, -) โดยในระบบที่มีขอบเขตค่า $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 < 0$

2.3 วงจรของ Chua

วงจร Chua[7] เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถสร้างสัญญาณออสซิลเลชันที่มีความหลากหลายมากที่สุด และสร้างได้ง่าย โดยวงจรประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว และอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีก 1 ตัว



รูปที่ 2.2 วงจร Chua

วงจร Chua แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว คือตัวเก็บประจุ 2 ตัว, ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว, ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว และตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตัว แสดงสมการของระบบได้ดังสมการที่ (2.20)

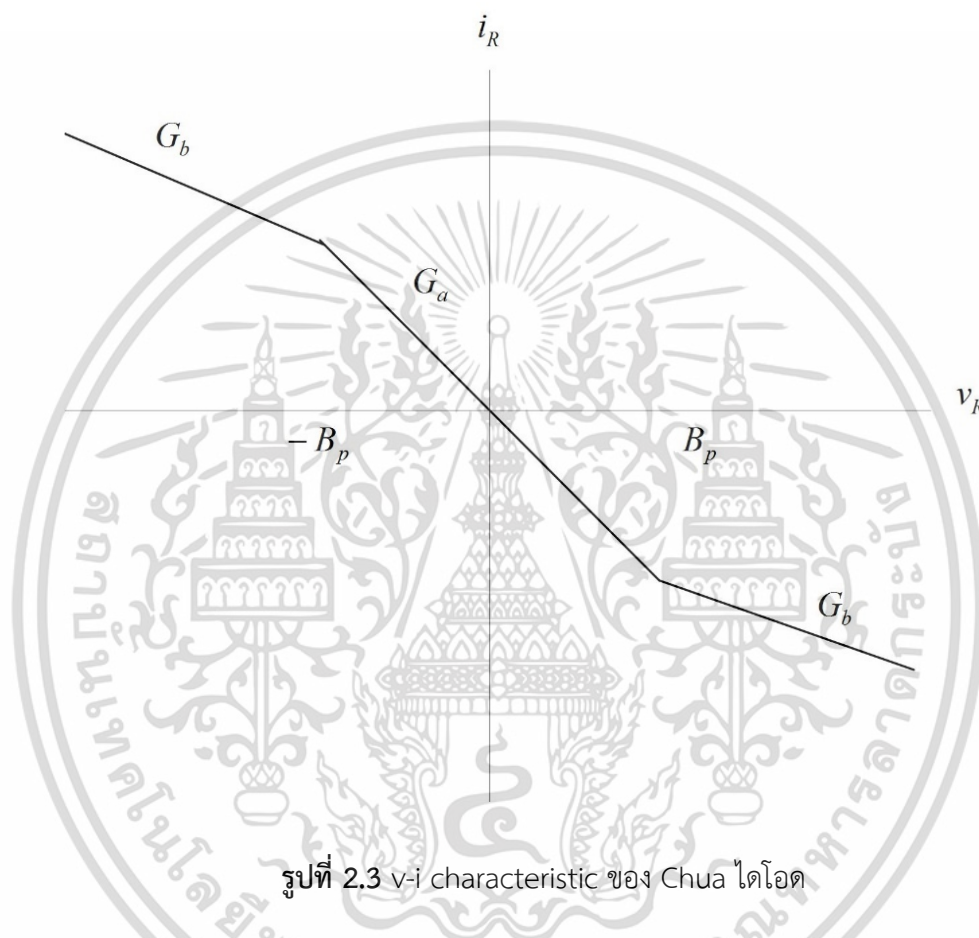
$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_{c_1}}{dt} &= \frac{1}{R}(v_{c_2} - v_{c_1}) - f(v_{c_1}) \\ C_2 \frac{dv_{c_2}}{dt} &= \frac{1}{R}(v_{c_1} - v_{c_2}) + i_L \\ L \frac{di_L}{dt} &= -v_{c_2} \end{aligned} \quad (2.20)$$

โดย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.21) เป็นการแสดงคุณสมบัติของความต้านทานแบบ 3-segment (3-segment odd-symmetric voltage-current characteristic) ของตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือ Chua ไดโอด โดยมีความชันเป็น G_a, G_b และจุดแรงดัน breakpoint อยู่ที่ $v_R = -B_p$ และ $v_R = B_p$ โดยที่ $v-i$ characteristic ของ Chua ไดโอด แสดงดังรูปที่ 2.6



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)

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

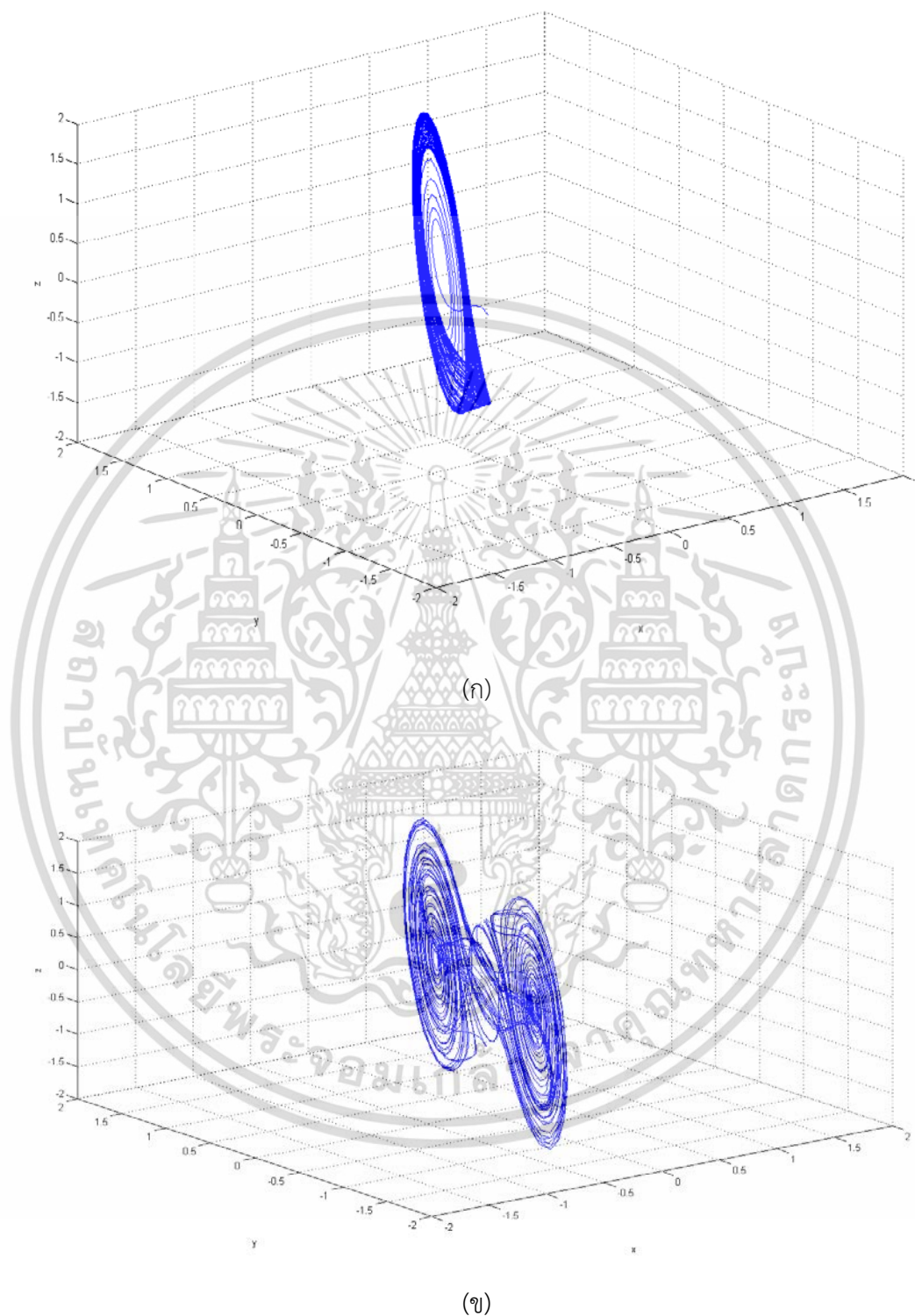
โดย

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

และ

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

จากรูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างตัวดึงดูดแบบ Chua (ก) แบบ scroll เดี่ยว (ข) แบบ scroll คู่ จากโปรแกรมภาษาทางคณิตศาสตร์ระดับสูง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามลำดับ ดังจะกล่าวถึงโดยละเอียดในบทที่ 4



รูปที่ 2.4 ตัวดึงดูดแบบ Chua แบบ 3 มิติ (ก) แบบ scroll เดี่ยว (ข) แบบ scroll คู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ตัวกำเนิดสัญญาณ Wein bridge

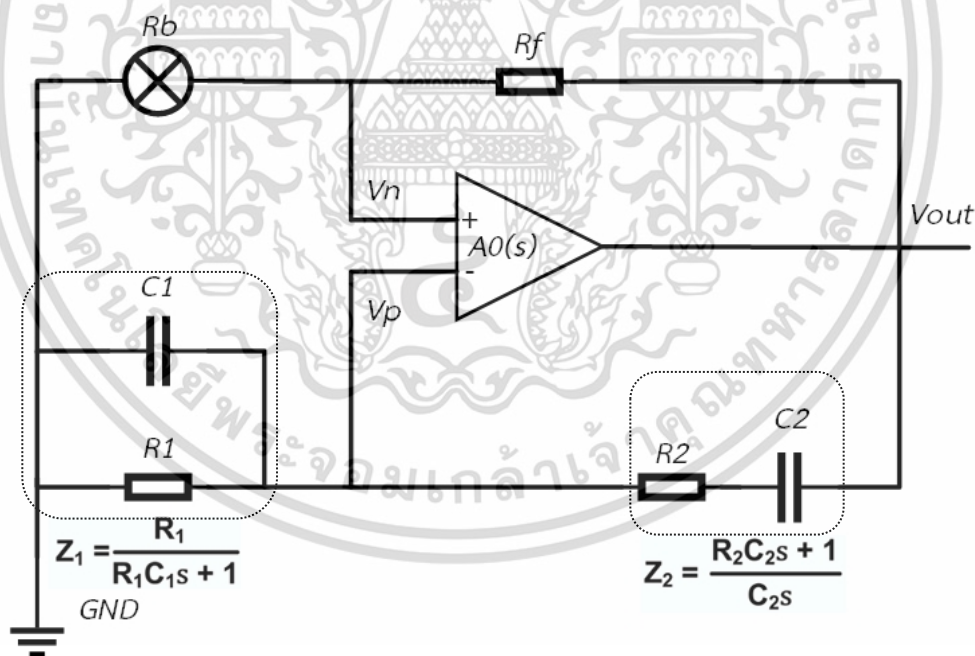
ตัวกำเนิดสัญญาณ Wein bridge เป็นประเภทตัวกำเนิดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (sine wave) ตัวกำเนิดสัญญาณ Wein bridge สามารถสร้างระยะของความถี่ที่กว้างมาก โดยตัวกำเนิดสัญญาณพื้นฐานจะมีต้นแบบมาจาก bridge circuit ซึ่งถูกพัฒนาโดย Max Karl Werner Wien ใน ค.ศ. 1891 สำหรับการวัดค่าความต้านทานภายใน โดยวงจรประกอบด้วยอุปกรณ์ ตัวต้านทานจำนวน 4 ตัว และตัวเก็บประจุ จำนวน 2 ตัว ทำให้สามารถสร้างอัตราการขยายทางด้านบวกรวมกับวงจรกรองแถบความถี่เฉพาะ (Bandpass filter) ให้กับวงป้อนกลับแบบบวก (Positive feedback)

วงจรที่แสดงดังรูปที่ 2.5 ทางด้านขวาแสดงการใช้งานออสซิลเลเตอร์โดยทั่วไปพร้อมการควบคุมการรับสัญญาณโดยอัตโนมัติโดยใช้หลอดไส้ ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า $R_1 = R_2 = R$ และ $C_1 = C_2 = C$ ความถี่ของการสั่นจะได้ดังสมการที่ (2.7)

$$f_{hz} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.7)$$

โดยมีเงื่อนไขตัวกำเนิดสัญญาณเสถียรให้คือ

$$R_b = \frac{R_f}{2} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.5 วงจรตัวกำเนิดสัญญาณ Wein bridge



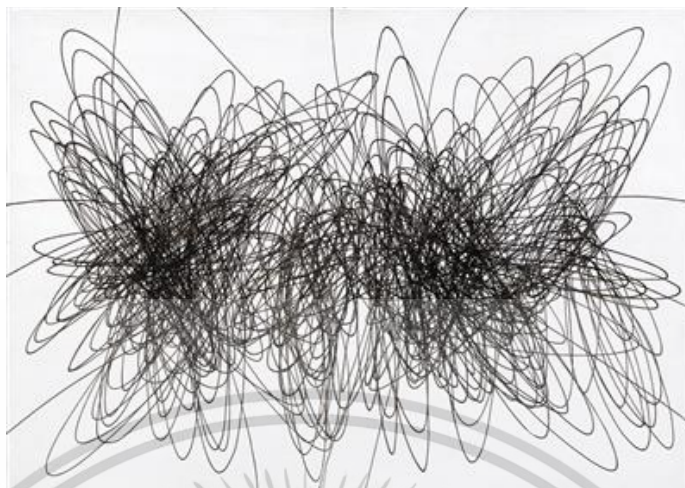
รูปที่ 2.6 Max Karl Werner Wien (ค.ศ. 1866 – 1938)[25]

2.5 ศิลปะนามธรรม (Abstract Art)

ความหมายของคำว่า ศิลปะ (Art) วิทยานิพนธ์นี้ หมายถึง การกระทำหรือการแสดงออกใด ๆ ที่เกิดจากการมนุษย์ เนื่องจากมนุษย์สามารถคิด วิเคราะห์ แยกแยะ จินตนาการ รู้สึก สัมผัสและสรรค์สร้าง ให้ผู้อื่นเห็น รับทราบ เข้าใจและสัมผัสได้ ถึงการสร้างสรรคผลงาน โดยเห็นว่าเป็นความสวยงาม ความงดงาม ความประณีต วิจิตรบรรจงและควมมีชั้นเชิงมากกว่าบุคคลทั่วไป ศิลปะเกิดจากการกระทำ ซึ่งแสดงออกด้วยการผลิตหรือการกระทำด้วยมือ อาทิ การปั้น การวาดภาพ การแกะสลัก จึงทำให้เกิดผลงานที่ใช้ความสามารถส่วนตัวเป็นพิเศษที่มีเพียงหนึ่งเดียวหรือการใช้ร่างกายส่วนต่าง ๆ และน้ำเสียงอันมีเอกลักษณ์เฉพาะ การขับร้อง การฟ้อนรำ หรือผลงานที่ใช้จินตนาการและความคิด อย่างการประพันธ์เพลง การแต่งนวนิยายเรื่องสั้นและการแต่งบทละครเวที โดยเป็นพื้นฐานการทำความเข้าใจถึงความหมายของคำว่า ศิลปะ ระหว่างผู้ศึกษากับผู้เรียบเรียงวิทยานิพนธ์

ศิลปะนามธรรม (Abstract Art) เป็นการวาดภาพในการสื่อสารถึงความหมายด้วย สี และลายเส้น เพื่อสร้างสัดส่วนหรือไม่เป็นสัดส่วน ไม่มีรูปร่าง รูปแบบที่ชัดเจนและตายตัว โดยที่ศิลปะนามธรรมเป็นความแตกต่างระหว่างความนิยมในการสร้างสรรค์ภาพสมจริงของวงการงานทางด้านศิลปะ โดยรูปวาดในสิ่งต่าง ๆ จะผิดหรือแปลกออกไปอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งทำให้ผู้ที่ต้องการศึกษายากแก่การเข้าถึง รับรู้ และเข้าใจในแก่นแท้ จุดประสงค์ของศิลปินที่สร้างสรรค์ผลงาน

ศิลปินท่านแรกที่มีตัวอย่างการวาดภาพนามธรรมเป็นภาพวาดของ Roboto Crippa ศิลปินสัญชาติอิตาลี ซึ่งมีชีวิตอยู่ในช่วง ค.ศ. 1921-1972 ถ้าพิจารณาภาพวาดที่คล้ายคลึงกับสัญลักษณ์ลวนที่มีลักษณะลายเส้นไม่ต่างจากเส้นทางการโคจรของสัญลักษณ์ลวนที่มีวงโคจรวิ่งรอบตัวตั้งจุดสองหลุมและวิ่งระหว่างสองหลุมนั้น ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างผลงานของ Clippa ชื่อภาพ spirale วาดใน ค.ศ. 1951[2]

ซึ่งศิลปินที่มีชื่อเสียงทางการวาดภาพเชิงนามธรรม คือ Mark George Tobey ศิลปินสัญชาติอเมริกัน ซึ่งมีชีวิตอยู่ในช่วง ค.ศ. 1890-1976 ที่สร้างผลงานดูล้ำสมัยลวดลายลวงดังตัวอย่างรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างผลงานของ Tobey ชื่อภาพ Morning Glass วาดใน ค.ศ. 1975[2]

บทนี้กล่าวถึงวรรณกรรมปริทัศน์ (Literature Review) ซึ่งเป็นการนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง วิทยานิพนธ์เท่านั้น เช่น นิยามตัวดิ่งดูด ประวัติความเป็นมาและวงจรของของ Chua และตัวกำเนิด สัญญาณ Wein bridge เป็นต้น ในบทต่อไปเป็นวิธีการดำเนินการวิจัยซึ่งนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจากบทที่ 2 มาใช้ในการดำเนินการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 หลักการออกแบบและสร้างสัญญาณอลวนแบบสองโหมด

ในวิทยานิพนธ์นำเสนอวิธีการสร้างสัญญาณอลวนแบบสองสถานะ โดยใช้ตัวสร้างสัญญาณอลวนแบบ Wien bridge[25] ร่วมกับวงจรใหม่โดยใช้วงจร Chua[8] ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณเพียงสองตัวเท่านั้น

วงจรที่นำเสนอที่แสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งมีแกนหลักร่วมกันของแต่ละโหมดคือ ตัวสร้างสัญญาณ Wien bridge ประกอบไปด้วยอุปกรณ์สร้างสัญญาณ : U_2 และ $R_1, R_2, R_3, R_4, C_2, C_3$ ในการดำเนินงานและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของ Wien bridge ประกอบไปด้วยอุปกรณ์สร้างสัญญาณในการดำเนินงาน : U_3 และ R_5, R_6, R_7 สมการของวงจรสร้างสัญญาณ Wein bridge คือ

$$C_2 \frac{dV_2}{dt} = \frac{(K_0 - 1)V_2}{R_2} - \frac{V_2}{R_1} - \frac{V_3}{R_2} \quad (3.1)$$

$$C_3 \frac{dV_3}{dt} = \frac{(K_0 - 1)V_2}{R_2} - \frac{V_3}{R_2}$$

เพื่อหาเงื่อนไขของระบบที่ไม่เสถียรสำหรับ $C_2 = C_3$ และ $K_0 = \frac{R_4}{R_3} + 1$

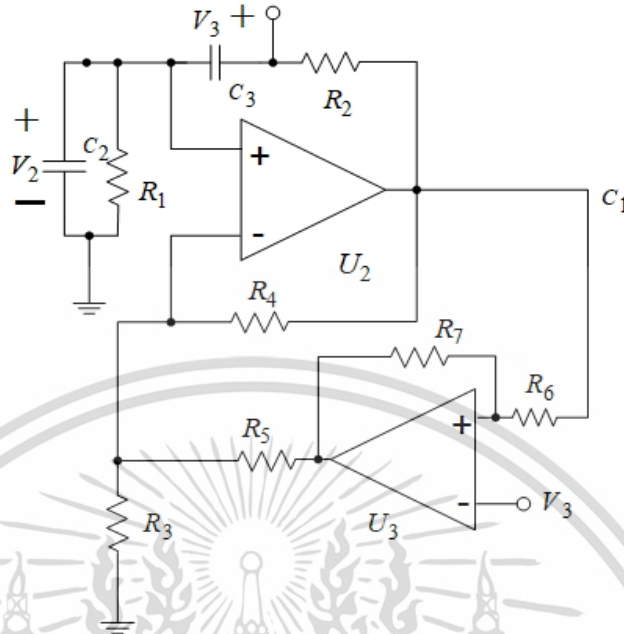
เราจัดเรียงใหม่ (3.1) ให้เป็นรูปแบบ

$$\begin{bmatrix} V_2' \\ V_3' \end{bmatrix} = \frac{1}{R_2 C} \begin{bmatrix} K_0 - 2 & -1 \\ K_0 - 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

วงจรจะมีตัวสร้างสัญญาณอลวนแบบ Wein bridge โดยมี สมการที่เกี่ยวกับฮิสเทอรีซิส สามารถเขียนเป็น

$$\begin{bmatrix} V_2' \\ V_3' \end{bmatrix} = \frac{1}{R_2 C} \begin{bmatrix} K_0 + K_1 - 2 & -1 \\ K_0 + K_1 - 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 + K_2 H_{ys}(v) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



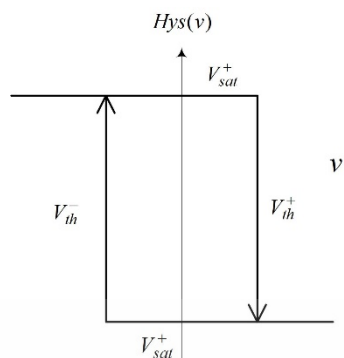
รูปที่ 3.1 วงจรสร้างสัญญาณ Wein bridge

โดยวงจรจะมีตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบ Wein bridge สมการของรัฐที่มีข้อเสนอนี้เกี่ยวข้องกับฮิสเทอรีซิส สามารถเขียนเป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{R_2 C} \begin{bmatrix} K_0 + K_1 - 2 & -1 \\ K_0 + K_1 - 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 + K_2 Hys(v) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$K_1 = \frac{R_4}{R_5} + 1$ คืออัตราขยายวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสและ $K_2 = -\frac{R_4}{R_5}$ อัตราขยายวงจรขยายแบบกลับเฟสของ U_2 ที่ลดลงตามลำดับ ฟังก์ชัน hysteresis ที่แสดงในรูปที่ 3.2 กำหนดระดับความอิ่มตัวของออปแอมป์ (op-amp) คือ v_{sat}^{\pm} ค่าช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำและสูง v^+, v^- ตามลำดับ จากวงจรในรูปที่ 3.5 ค่าช่วงแรงดันไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ว่าเป็น $\left(\frac{R_2 K_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) v_{sat}^{\pm}$ กำหนด $p = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ ขณะนี้เราสามารถค่าช่วงแรงดันไฟฟ้าเป็น $v^{\pm} = (1 - p - pK_1)v^{\pm}$ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจรฮิสเทอรีซิส คือ $v = V_3 - p(k_0 + k_1)V_2$ ใน [27] โดยมีเงื่อนไขของตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันตั้งเป็น $p = \frac{1 - K_2}{1 + K_2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

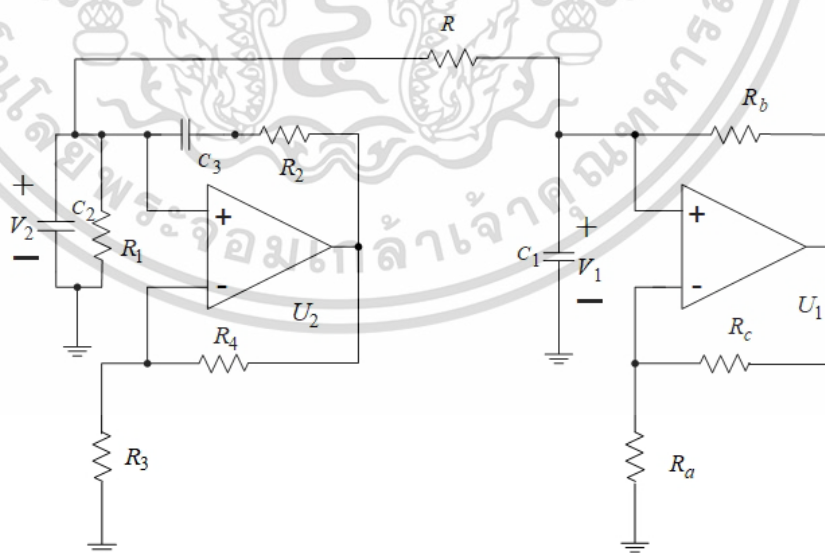


รูปที่ 3.2 ฮิสเทอรีซิสฟังก์ชัน (The hysteresis function)

วงจรที่นำเสนอที่แสดงในรูปที่ 3.3 คือ วงจรสร้างสัญญาณออสซิลเลชันแบบ Chua ประกอบไปด้วย อุปกรณ์สร้างสัญญาณ : U_2 และ $R_1, R_2, R_3, R_4, C_2, C_3$ ในส่วนของ : U_1 และ R_a, R_b, R_c, C_1 ดำเนินการสร้างสำหรับวงจร Chua

วงจรจะแสดงวงจรของ Chua โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dV_1}{dt} &= -\frac{V_1}{R} + \frac{V_2}{R} - h(V_1) \\ C_2 \frac{dV_2}{dt} &= \frac{V_1}{R} + \left\{ \frac{k}{R_2} - \frac{1}{R'} \right\} V_2 - \frac{V_3}{R_2} \\ C_3 \frac{dV_3}{dt} &= \frac{(K_0 - 1)V_2}{R_2} - \frac{V_3}{R_2} \end{aligned} \quad (3.5)$$



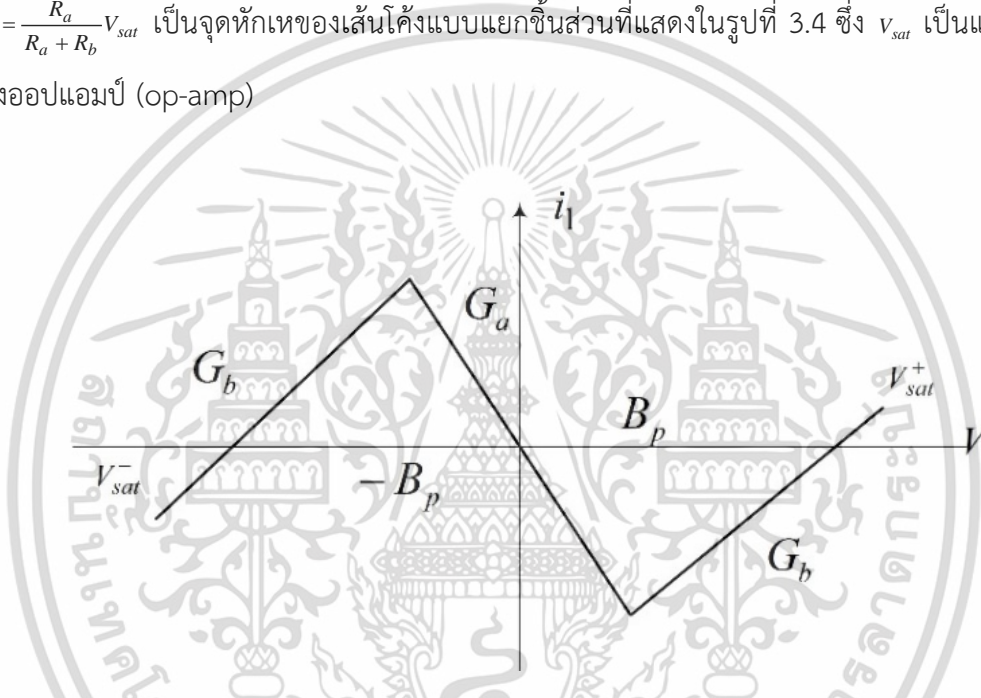
รูปที่ 3.3 วงจร Chua โดยใช้โอปแอมป์ (op-amp)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R' = \frac{RR_1}{(R+R_1)}$ ลักษณะของความต้านทานไม่เชิงเส้นสามารถแสดงเป็น

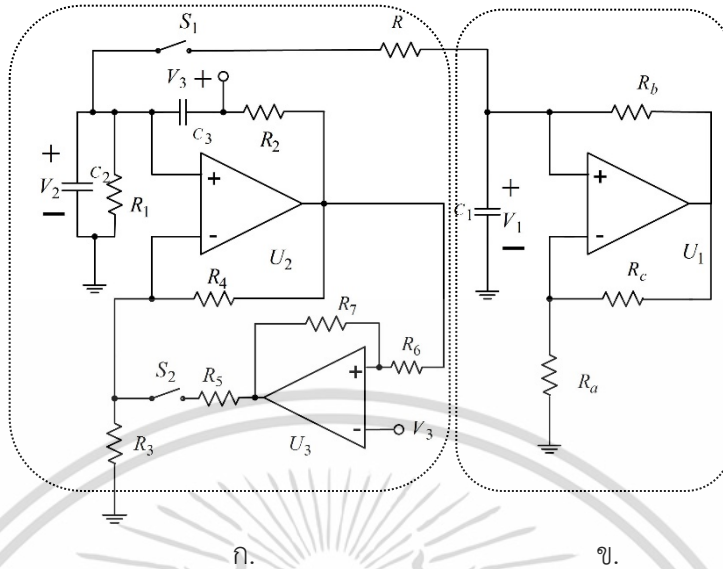
$$h(v_1) = G_b V_1 + \frac{1}{2}(G_a - G_b)(|v_1 + B_p| - |v_1 - B_p|) \quad (3.6)$$

ที่ไหน $G_a = -\frac{1}{R_a}$ และ $G_b = \frac{1}{R_b}$ เป็นจุดที่ลาดของบริเวณด้านในและด้านนอกตามลำดับและ $B_p = \frac{R_a}{R_a + R_b} V_{sat}$ เป็นจุดหักเหของเส้นโค้งแบบแยกชิ้นส่วนที่แสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่ง v_{sat} เป็นแรงดันอิ่มตัวของออปแอมป์ (op-amp)



รูปที่ 3.4 ลักษณะเฉพาะของการไม่เป็นเชิงเส้นของตัวต้านทาน

เมื่อนำวงจรดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 รวมกันจะได้วงจรสร้างสัญญาณออสซิลเลชันแบบสองโหมด (Dual-mode chaotic oscillator) สลับการทำงานโดยใช้ สวิตช์ S_1 และ S_2 โดยเมื่อสวิตช์การทำงานที่ S_1 เปิด, สวิตช์การทำงานที่ S_2 ปิด วงจรสร้างสัญญาณ Chua ทำงาน ในกรณีเดียวกันถ้าโดยเมื่อสวิตช์การทำงานที่ S_1 ปิด, สวิตช์การทำงานที่ S_2 เปิด วงจรสร้างสัญญาณ Wein bridge ทำงาน



รูปที่ 3.5 วงจรตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบสองโหมด (Dual mode chaotic oscillator)
(ก. วงจร Wein bridge ข. วงจรของ Chua)

3.2 ตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบคู่ (Couple chaotic oscillator)

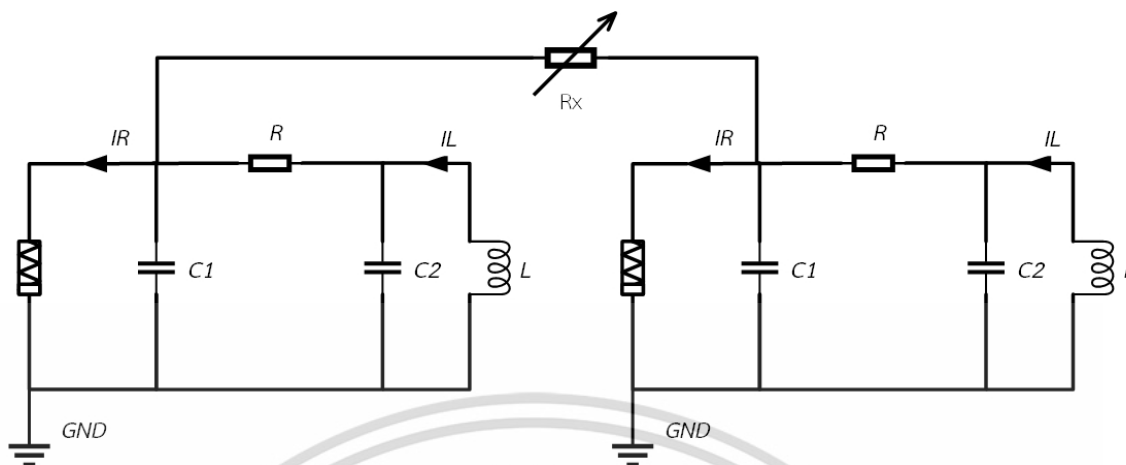
ในวิทยานิพนธ์นี้จะเริ่มพิจารณาจากสมการพื้นฐานของตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบคู่ โดยใช้วงจร Chua สองวงจร โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \alpha(y-x-f(x)) + \delta_x(x'-x) \\
 \dot{y} &= x-y-z + \delta_y(y'-y) \\
 \dot{z} &= -\beta y + \delta_z(z'-z) \\
 \dot{x}' &= \alpha(y'-x'-f(x')) + \delta_x(x-x') \\
 \dot{y}' &= x'-y'-z' + \delta_y(y-y') \\
 \dot{z}' &= -\beta y' + \delta_z(z-z')
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

โดยกำหนดค่า x (resp. y, z) ให้ใช้กับตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบคู่เท่านั้น และ δ_x (resp. δ_y, δ_z) คือ มีค่าต่างจากศูนย์

3.2.1 ระบบ x-couple

การจำลองนี้เป็นการซิงโครไนซ์วงจร Chua จำนวน 2 วงจรโดยการนำจุด x จากวงจร Chua ทางซ้ายมือ และทำการการนำจุด x_1 จากวงจร Chua ทางด้านขวามาทำการเชื่อมต่อผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้วงจร Chua ทั้งสองซิงโครไนซ์ได้



รูปที่ 3.6 วงจร x-couple กำหนดค่า $R_{17} = 10 \text{ K}\Omega$

จากรูปที่ 3.6 แสดงการทดลองการตั้งค่า โดยตั้งค่าสมการคือ

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha(y-x-f(x)) + \delta_x(x'-x) & \dot{x}' &= \alpha(y'-x'-f(x')) + \delta_x(x-x') \\ \dot{y} &= x-y+z & \dot{y}' &= x'-y'-z' \\ \dot{z} &= -\beta y & \dot{z}' &= -\beta y' \end{aligned} \tag{3.8}$$

เมื่อ $\delta_x = R_\alpha / R_x$ มีระบบที่ต่างกันคือ

$$\begin{aligned} \dot{p} &= \alpha q - \alpha p - S_i \alpha p - 2\delta_x P \\ \dot{q} &= p - q + r \\ \dot{r} &= -\beta q \end{aligned} \tag{3.9}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha - S_i - 2\delta_x & \alpha & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & -\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

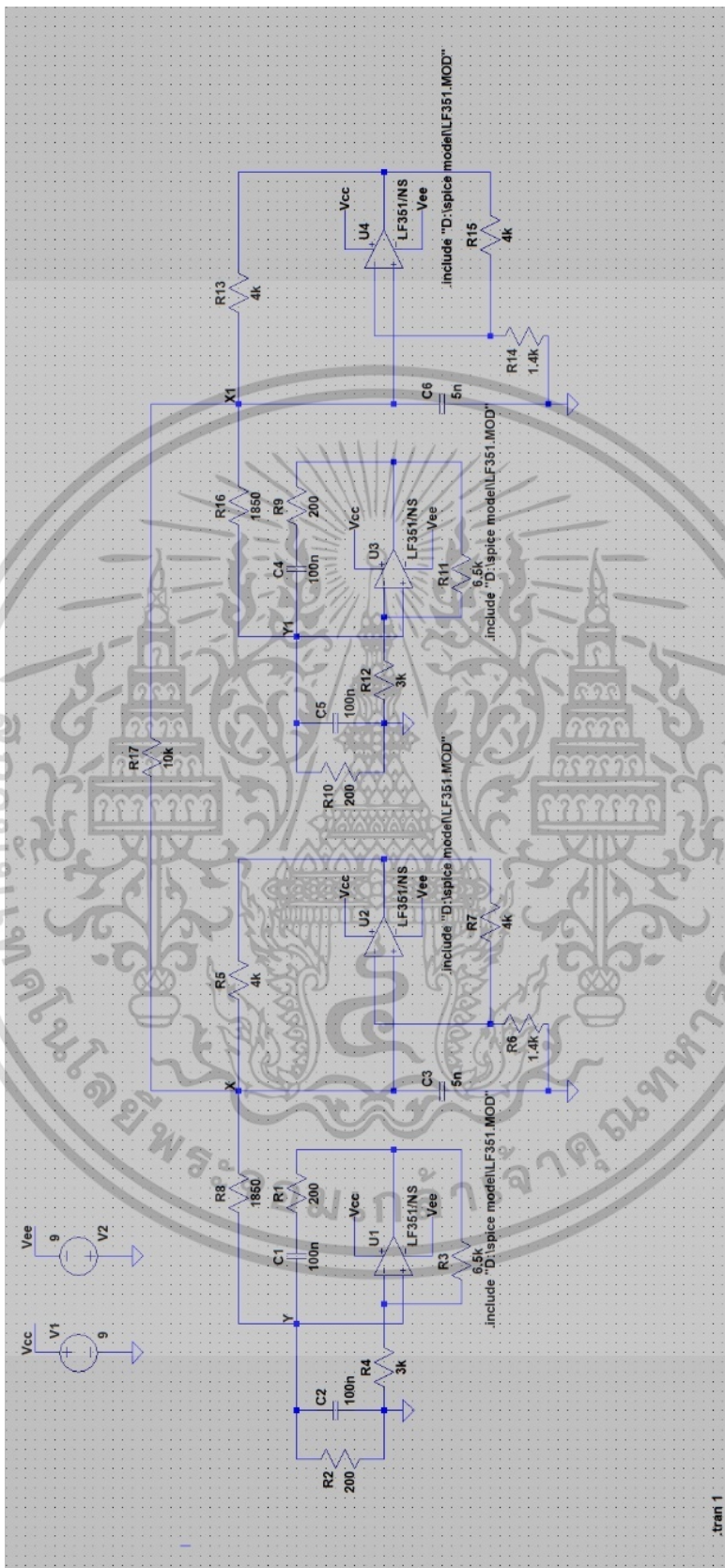
โดยทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดค่าตัวอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้จำลองวงจร x-couple

ความต้านทาน (R)	ตัวเก็บประจุ (C)	ออปแอมป์ (op-amp)
$R_1 = 200\Omega$	$C_1 = 100\text{nF}$	$U_1 = \text{LF351}$
$R_2 = 200\Omega$	$C_2 = 100\text{nF}$	$U_2 = \text{LF351}$
$R_3 = 6.5\text{k}\Omega$	$C_3 = 5\text{nF}$	$U_3 = \text{LF351}$
$R_4 = 3\text{k}\Omega$	$C_4 = 100\text{nF}$	$U_4 = \text{LF351}$
$R_5 = 4\text{k}\Omega$	$C_5 = 100\text{nF}$	
$R_6 = 1.4\text{k}\Omega$	$C_6 = 5\text{nF}$	
$R_7 = 4\text{k}\Omega$		
$R_8 = 1850\text{k}\Omega$		
$R_9 = 200\Omega$		
$R_{10} = 200\Omega$		
$R_{11} = 6.5\text{k}\Omega$		
$R_{12} = 3\text{k}\Omega$		
$R_{13} = 4\text{k}\Omega$		
$R_{14} = 1.4\text{k}\Omega$		
$R_{15} = 4\text{k}\Omega$		
$R_{16} = 1850\text{k}\Omega$		
$R_{17} = 10\text{k}\Omega$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



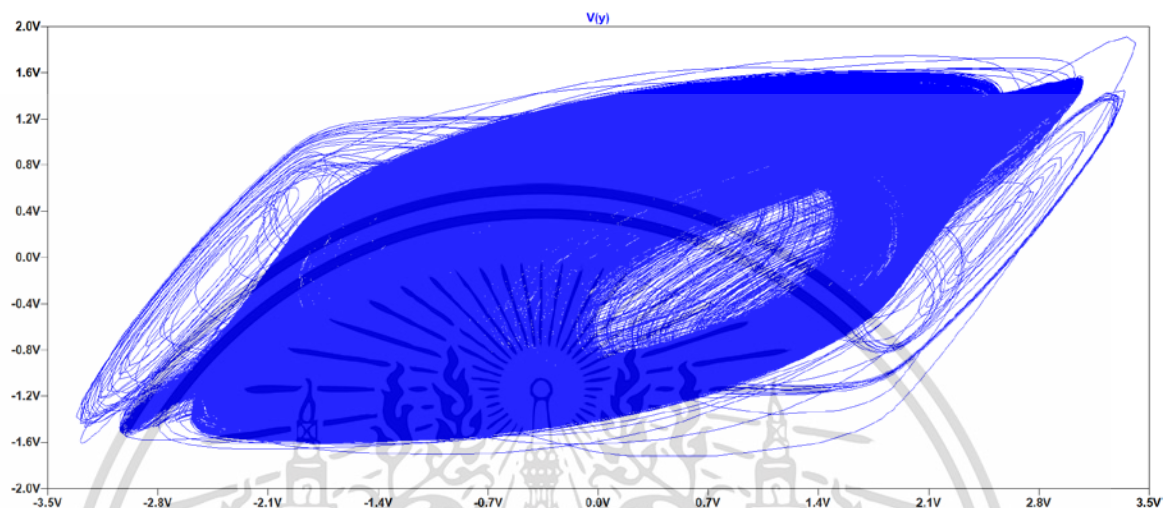
(ภาพหมื่น 90 องศา)

รูปที่ 3.7 วงจร x-couple ที่ใช้ในการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

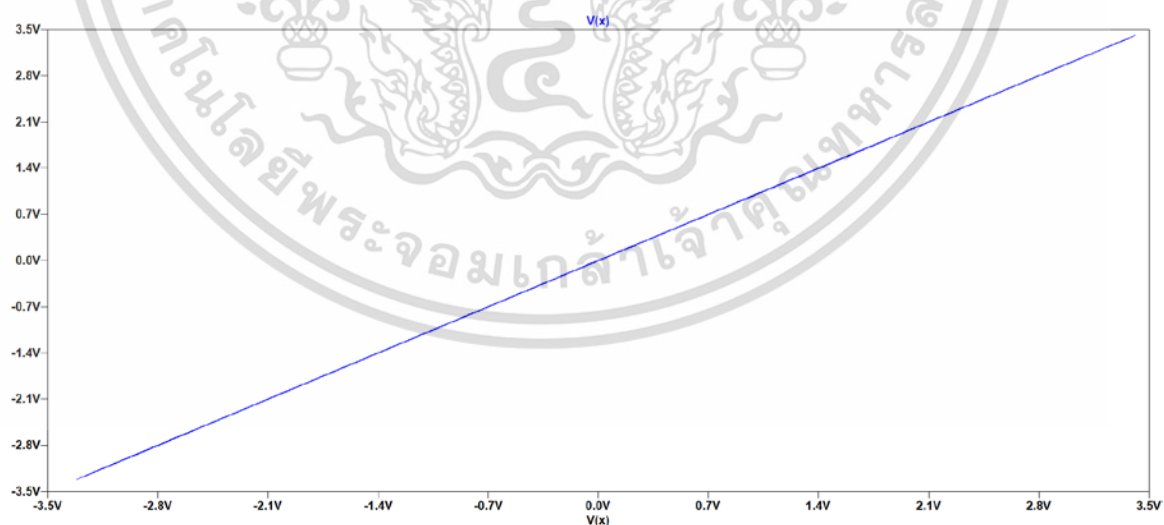
โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 3.8 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ เมื่อค่า $R_{17} = 10k\Omega$ โดยทำการวัดจุด $V(x), V(y)$ ทำให้เกิดการซิงโครไนซ์แบบ x-coupled



รูปที่ 3.8 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(x), V(y)$ (1)

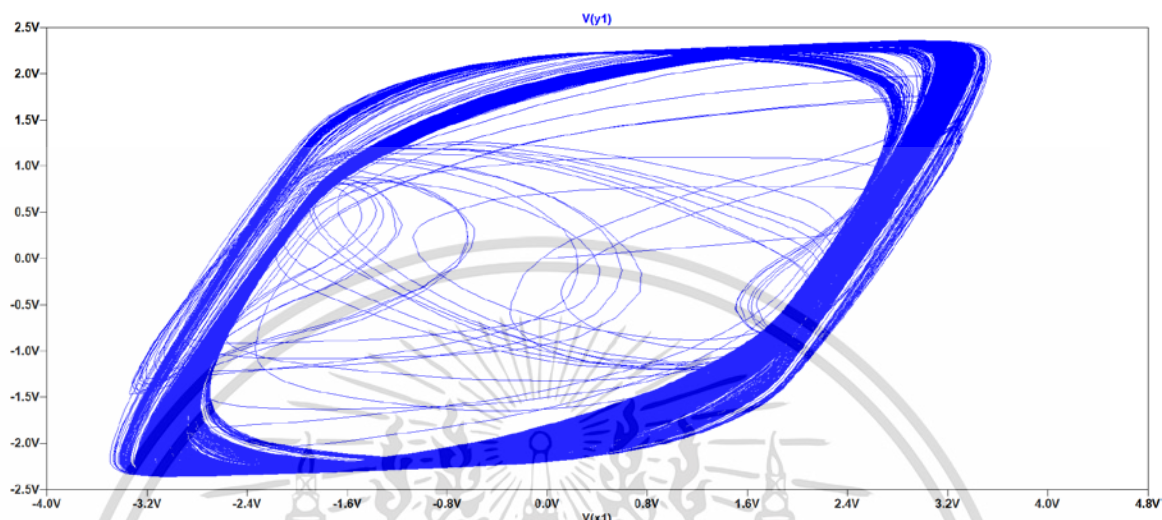
จากรูปที่ 3.9 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ เมื่อค่า $R_{17} = 10k\Omega$ โดยทำการวัดจุด $V(x), V(x)$ ทำให้เกิดการซิงโครไนซ์แบบคู่ (Coupled synchronization)



รูปที่ 3.9 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(x), V(x)$ (2)

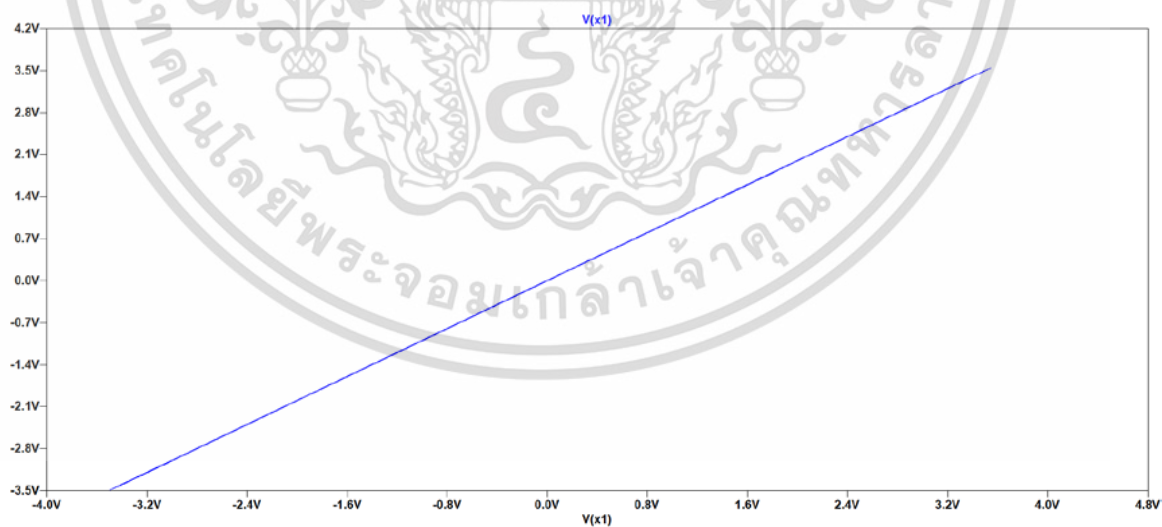
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ เมื่อค่า $R_{17} = 10k\Omega$ โดยทำการวัดจุด $V(x1),V(y1)$ ทำให้เกิดการซิงโครไนซ์แบบ x-coupled



รูปที่ 3.10 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(x1),V(y1)$ (1)

จากรูปที่ 3.11 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ เมื่อค่า $R_{17} = 10k\Omega$ โดยทำการวัดจุด $V(x1),V(x1)$ ทำให้เกิดการซิงโครไนซ์แบบคู่ (Coupled synchronization)

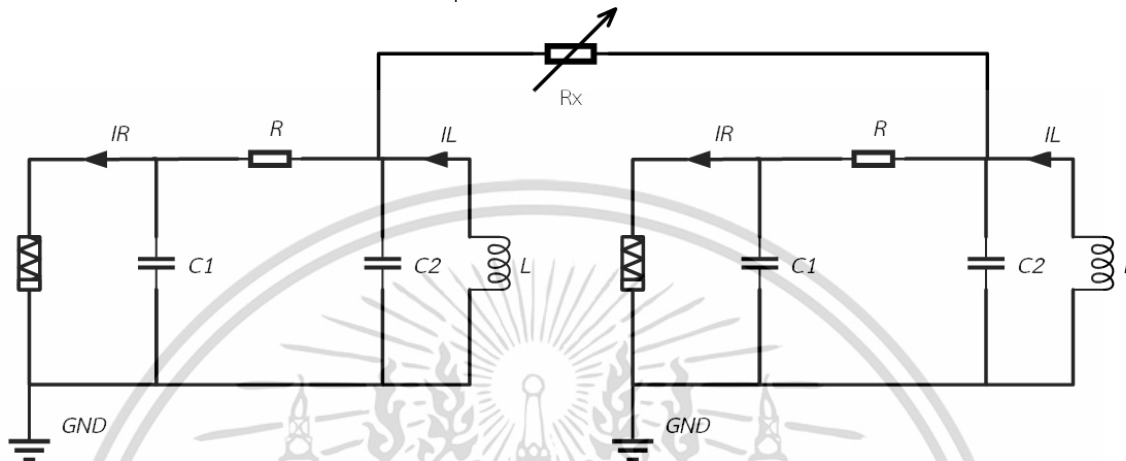


รูปที่ 3.11 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(x1),V(x1)$ (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ระบบ y-couple

การจำลองนี้เป็นการซิงโครไนซ์วงจร Chua จำนวน 2 วงจรโดยการนำจุด y จากวงจร Chua ทางซ้ายมือ และทำการการนำจุด y_1 จากวงจร Chua ทางด้านขวามาทำการเชื่อมต่อผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้ เพื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้วงจร Chua ทั้งสองซิงโครไนซ์ได้



รูปที่ 3.12 วงจร y-couple กำหนดค่า $R_{17} = 10k\Omega$

จากรูปที่ 3.12 แสดงการทดลองการตั้งค่า โดยตั้งค่าสมการคือ

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha(y-x-f(x)) & \dot{x}' &= \alpha(y'-x'-f(x')) \\ \dot{y} &= x-y+z+\delta_x(y'-y) & \dot{y}' &= x'-y'-z'+\delta_x(x-x') \\ \dot{z} &= -\beta y & \dot{z}' &= -\beta y' \end{aligned} \quad (3.10)$$

เมื่อ $\delta_x = R_a / R_x$ มีระบบที่ต่างกันคือ

$$\begin{aligned} \dot{p} &= \alpha q - \alpha p - S_i \alpha p - 2\delta_x P \\ \dot{q} &= p - q + r \\ \dot{r} &= -\beta q \end{aligned} \quad (3.11)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha - S_i - 2\delta_x & \alpha & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & -\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

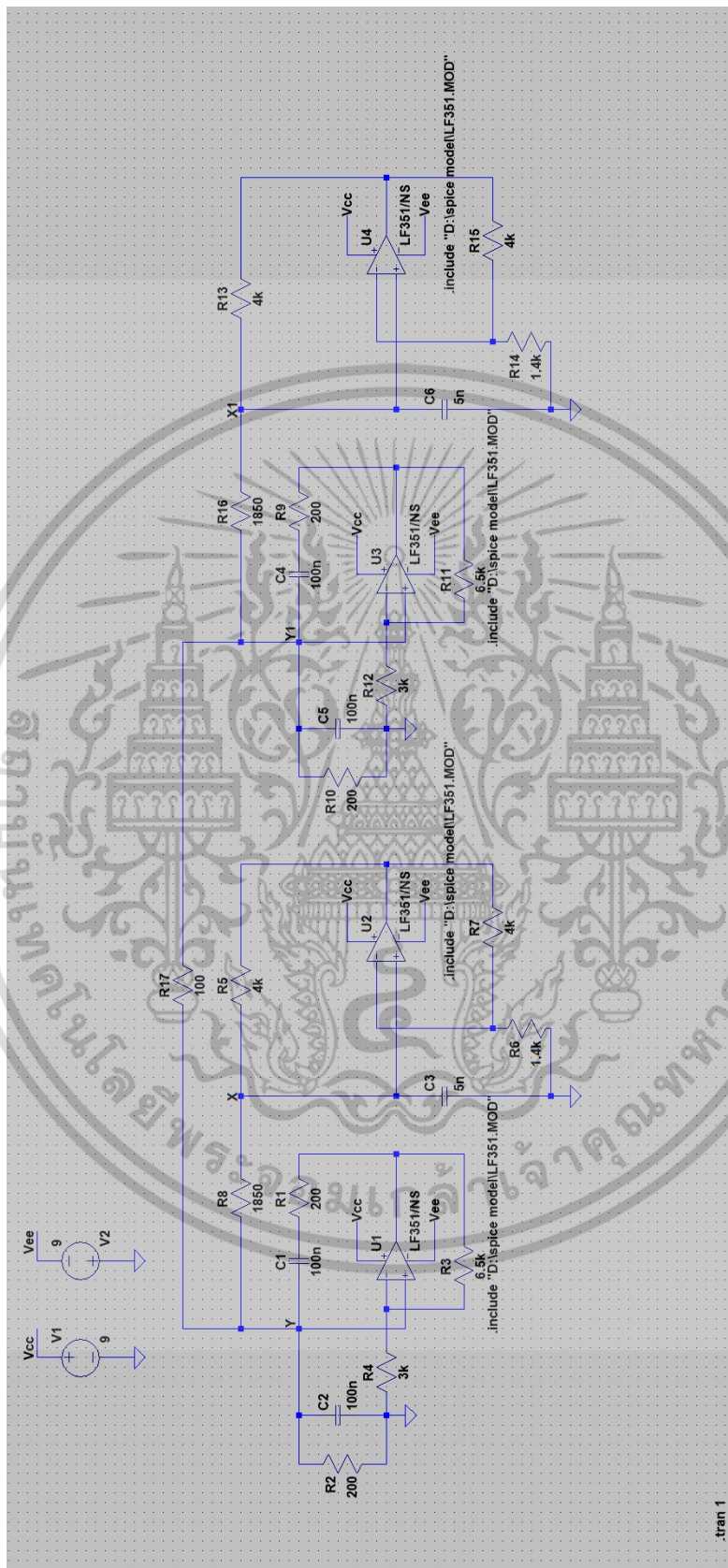
โดยทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยกำหนดค่าตัวอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้จำลองวงจร y-couple

ความต้านทาน (R)	ตัวเก็บประจุ (C)	ออปแอมป์ (op-amp)
$R_1 = 200\Omega$	$C_1 = 100\text{nF}$	$U_1 = \text{LF351}$
$R_2 = 200\Omega$	$C_2 = 100\text{nF}$	$U_2 = \text{LF351}$
$R_3 = 6.5\text{k}\Omega$	$C_3 = 5\text{nF}$	$U_3 = \text{LF351}$
$R_4 = 3\text{k}\Omega$	$C_4 = 100\text{nF}$	$U_4 = \text{LF351}$
$R_5 = 4\text{k}\Omega$	$C_5 = 100\text{nF}$	
$R_6 = 1.4\text{k}\Omega$	$C_6 = 5\text{nF}$	
$R_7 = 4\text{k}\Omega$		
$R_8 = 1850\text{k}\Omega$		
$R_9 = 200\Omega$		
$R_{10} = 200\Omega$		
$R_{11} = 6.5\text{k}\Omega$		
$R_{12} = 3\text{k}\Omega$		
$R_{13} = 4\text{k}\Omega$		
$R_{14} = 1.4\text{k}\Omega$		
$R_{15} = 4\text{k}\Omega$		
$R_{16} = 1850\text{k}\Omega$		
$R_{17} = 100\Omega$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

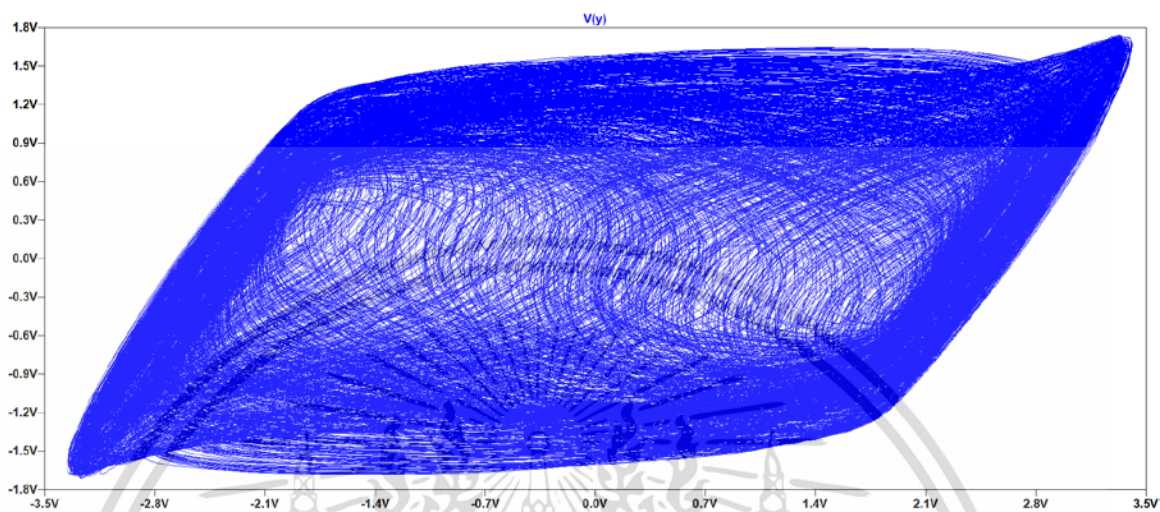


(ภาพหมุน 90 องศา)

รูปที่ 3.13 วงจร y-couple ที่ใช้ในการจำลอง

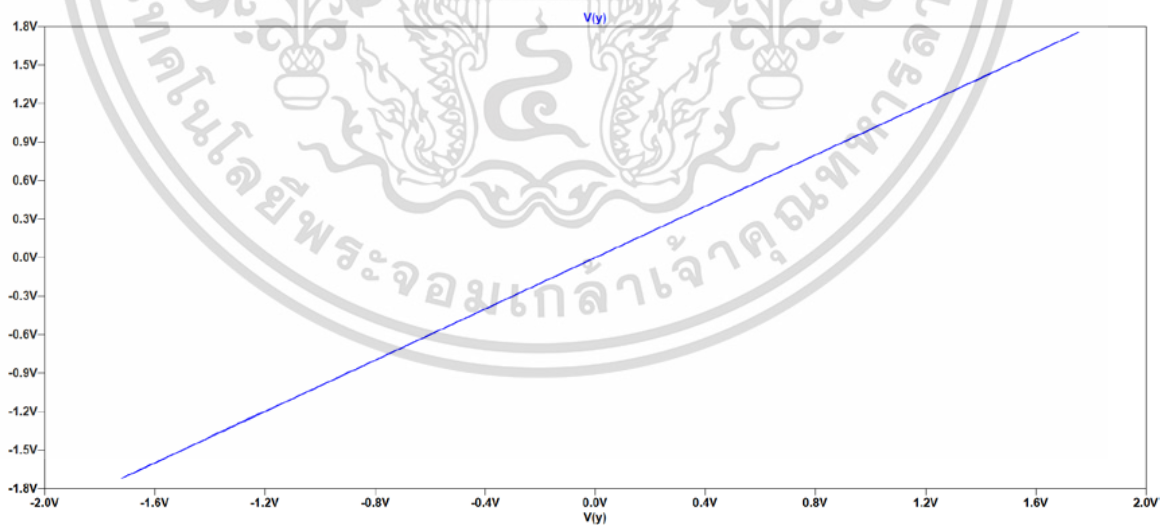
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.8 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ เมื่อค่า $R_{17} = 100\Omega$ โดยทำการวัดจุด $V(x), V(y)$ ทำให้เกิดการซิงโครไนซ์แบบ y -coupled



รูปที่ 3.14 ผลการทดลองจากรัดจุด $V(x), V(y)$ (1)

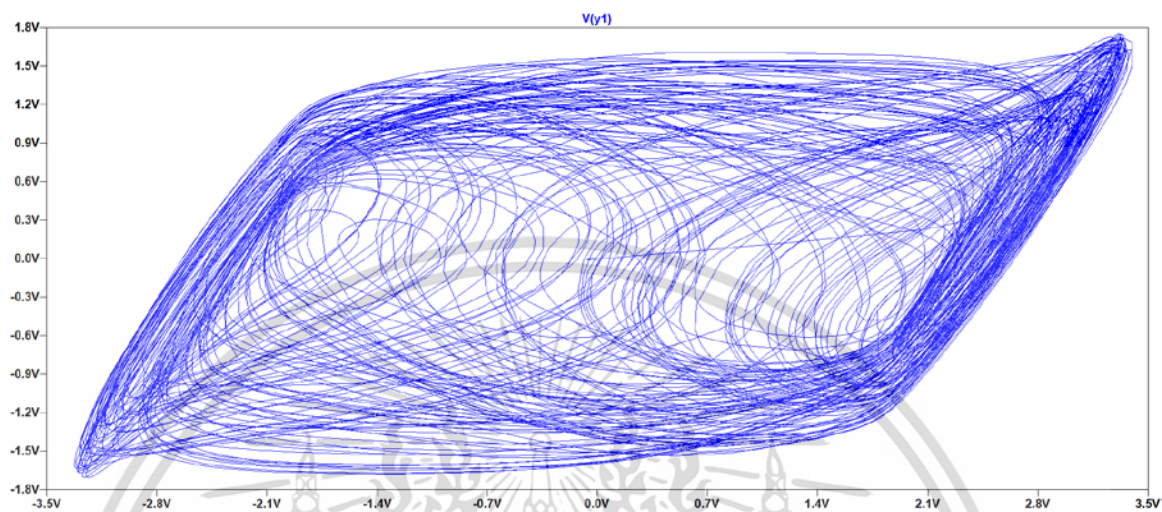
จากรูปที่ 3.11 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ เมื่อค่า $R_{17} = 100\Omega$ โดยทำการวัดจุด $V(y), V(y)$ ทำให้เกิดการซิงโครไนซ์แบบคู่ (Coupled synchronization)



รูปที่ 3.15 ผลการทดลองจากรัดจุด $V(y), V(y)$ (2)

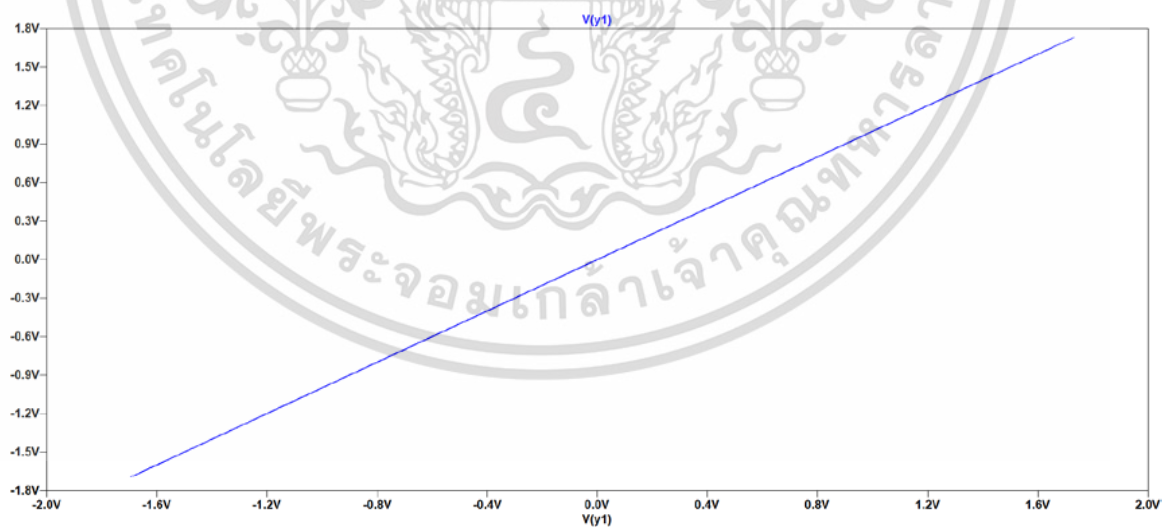
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.8 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ เมื่อค่า $R_{17} = 100\Omega$ โดยทำการวัดจุด $V(x1),V(y1)$ ทำให้เกิดการซิงโครไนซ์แบบ x-coupled



รูปที่ 3.16 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(x1),V(y1)$ (1)

จากรูปที่ 3.17 ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ เมื่อค่า $R_{17} = 100\Omega$ โดยทำการวัดจุด $V(y1),V(y1)$ ทำให้เกิดการซิงโครไนซ์แบบคู่ (Coupled synchronization)



รูปที่ 3.17 ผลการทดลองจากวัดจุด $V(y1),V(y1)$ (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

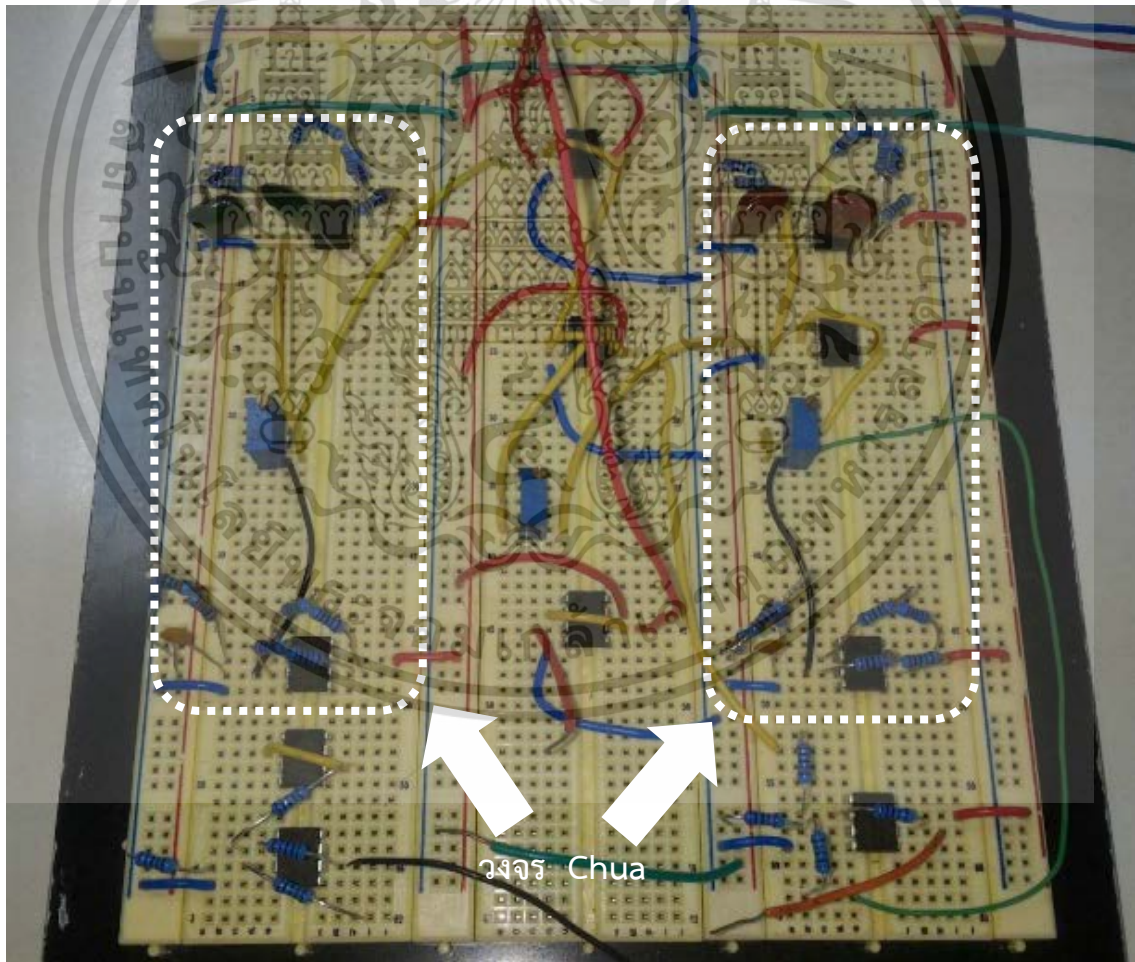
บทนี้กล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย ซึ่งแบ่งเป็น 2 หัวข้อ คือ 1) หลักการออกแบบและสร้างสัญญาณออสซิลเลชันแบบสองโหมด โดยมีเนื้อหาประกอบ เช่น ตัวสร้างสัญญาณ Wien bridge, ฮิสเทอรีซิสฟังก์ชัน (The hysteresis function), วงจร Chua, ลักษณะเฉพาะของการไม่เป็นเชิงเส้นของตัวต้านทาน และ วงจรตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบสองโหมด (Dual-mode chaotic oscillator) 2) ใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ วงจรออสซิลเลชันแบบคู่ เช่น วงจร x-couple วงจร y-couple เป็นต้น เพื่อนำผลการใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ที่ได้ เป็นตัวอย่างในการนำอุปกรณ์จริงลงบอร์ดทดลอง ในบทต่อไปเป็นการนำผลที่ใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์จากบทที่ 3 มาใช้ในผลการทดลอง



บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการนำวิธีการดำเนินการวิจัย ในบทที่ 3 ซึ่งแบ่งเป็น 2 หัวข้อ คือ 1) หลักการออกแบบ และสร้างสัญญาณอลวนแบบสองโหมด โดยมีเนื้อหาประกอบ เช่น ตัวสร้างสัญญาณ Wien bridge, ฮิสเทอรีซิสฟังก์ชัน (The hysteresis function), วงจร Chua, ลักษณะเฉพาะของการไม่เป็นเชิงเส้นของ ตัวต้านทาน และวงจรตัวกำเนิดสัญญาณอลวนแบบสองโหมด (Dual mode chaotic oscillator) 2) ใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ วงจรอลวนแบบคู่ เช่น วงจร x-couple วงจร y-couple เป็นต้น มาทดลองลงอุปกรณ์บอร์ดทดลอง เพื่อให้ได้สัญญาณอลวนจากวงจรของ Chua จำนวน 2 วงจร และการนำวงจรอลวนของ Chua มาทำตัวกำเนิดสัญญาณอลวนแบบสองโหมด ในรูปแบบต่าง ๆ อาทิ x-couple, y-couple, Chaotic Communication Systems, Chaotic masking system เป็นต้น ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การทดลองต่ออุปกรณ์ลงบอร์ดทดลองแบบ synchronization

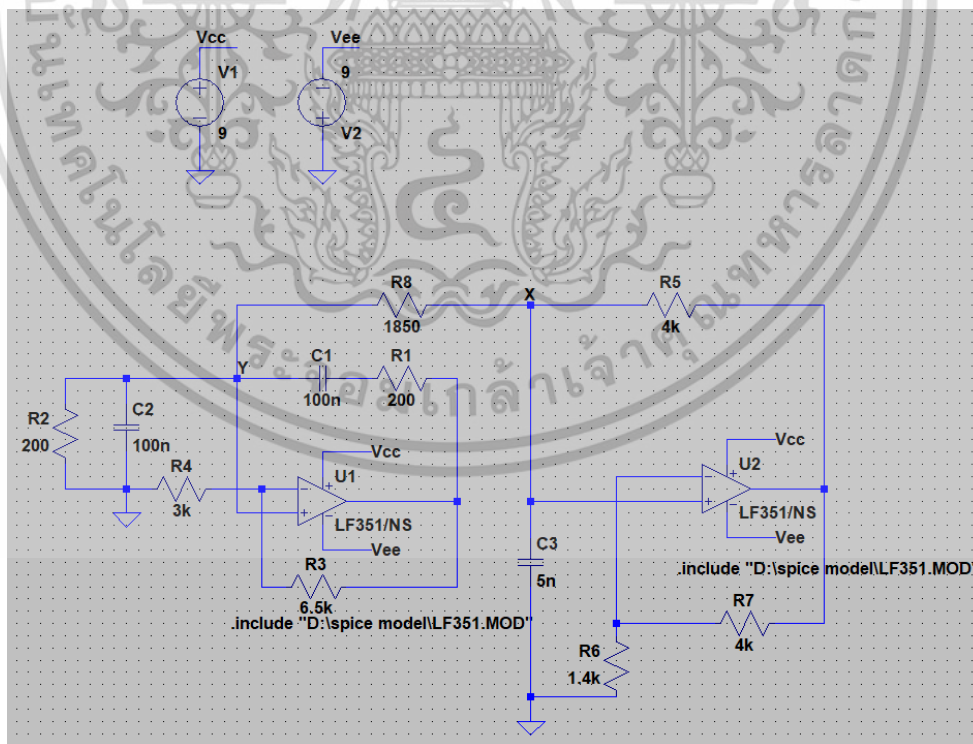
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลการทดลองการต่อวงจร Chua

ผลการทดลองแรกจะเป็นผลการทดลองการต่อวงจร Chua ในเบื้องต้น เพื่อเป็นการทำความเข้าใจถึงตัวกำเนิดสัญญาณอลวนขั้นพื้นฐาน โดยมีอุปกรณ์ดังตารางที่ 4.1 เก็บผลการทดลอง โดยการเปลี่ยนค่า $R_8 = 0\Omega, 800\Omega, 1.2k\Omega, 1.6k\Omega, 2k\Omega$ ตามลำดับ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านบวก (Vcc) มีค่าเท่ากับ +9 โวลต์ และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านลบ (Vee) มีค่าเท่ากับ -9 โวลต์ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวงจร Chua

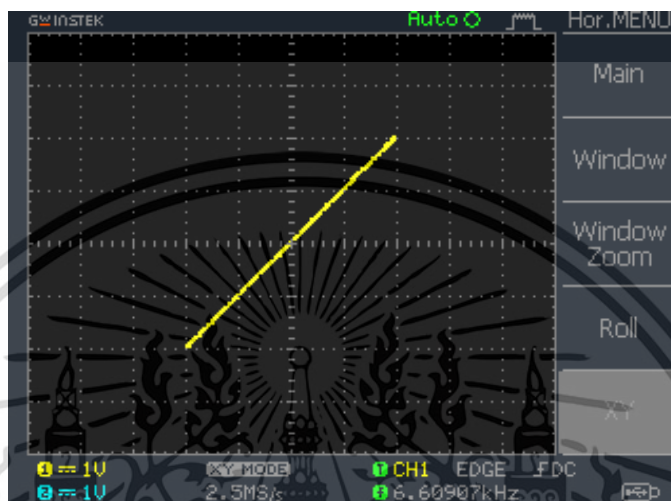
ความต้านทาน (R)	ตัวเก็บประจุ (C)	ออปแอมป์ (op-amp)
$R_1 = 200\Omega$	$C_1 = 100nF$	$U_1 = LF351$
$R_2 = 200\Omega$	$C_2 = 100nF$	$U_2 = LF351$
$R_3 = 6.5k\Omega$	$C_3 = 5nF$	
$R_4 = 3k\Omega$		
$R_5 = 4k\Omega$		
$R_6 = 1.4k\Omega$		
$R_7 = 4k\Omega$		
$R_8 = 0-2k\Omega$		



รูปที่ 4.2 วงจร Chua

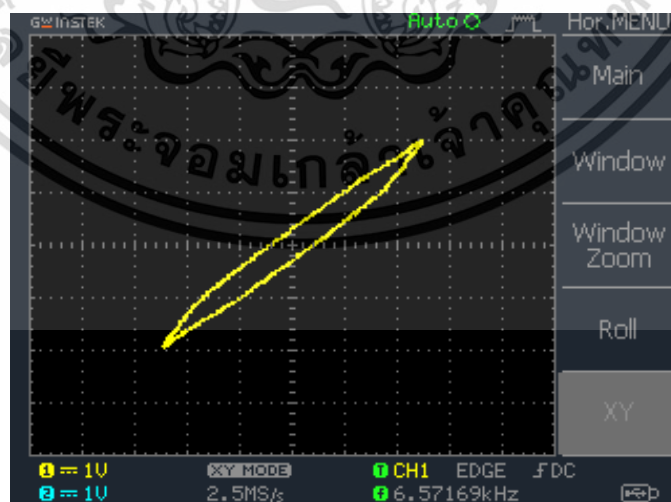
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 การทดลองวงจร Chua เมื่อค่าความต้านทาน $R_g = 0\Omega$ กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div 1 V/div ตามลำดับ ผลที่ได้ยังไม่ปรากฏผลการม้วนอลวน



รูปที่ 4.3 ผลการใช้ค่าความต้านทาน $R_g = 0\Omega$ ในวงจร Chua

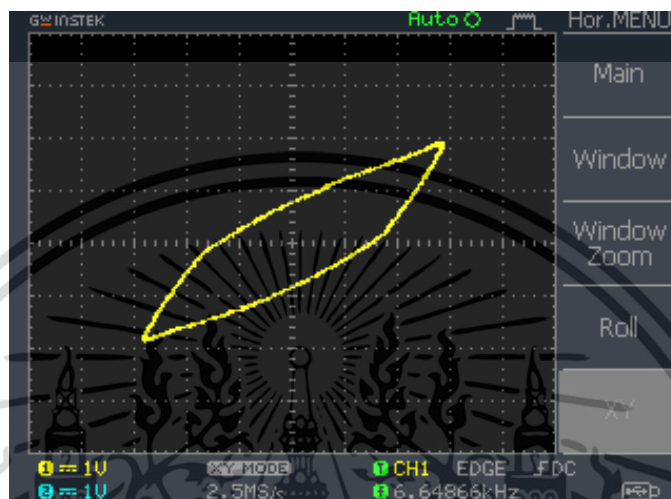
จากรูปที่ 4.4 การทดลองวงจร Chua เมื่อค่าความต้านทาน $R_g = 400\Omega$ กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div 1 V/div ตามลำดับ ผลที่ได้เริ่มปรากฏผลการม้วนอลวน



รูปที่ 4.4 ผลการใช้ค่าความต้านทาน $R_g = 400\Omega$ ในวงจร Chua

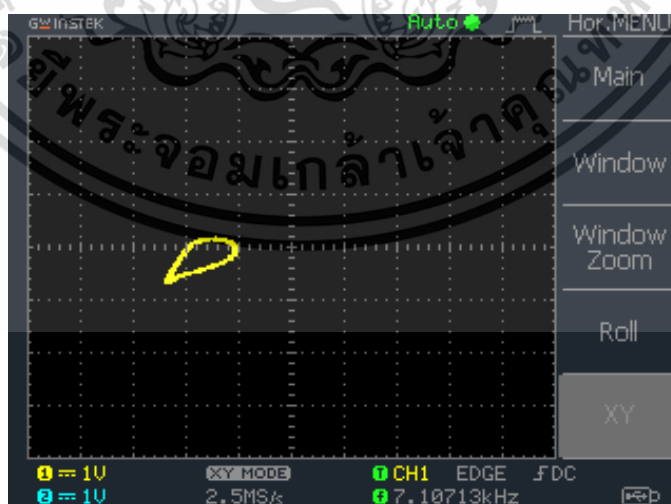
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 การทดลองวงจร Chua เมื่อค่าความต้านทาน $R_g = 800\Omega$ กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div 1 V/div ตามลำดับ ผลที่ได้เริ่มปรากฏผลการม้วนอลวนที่มีขนาดมากกว่ารูปที่ 4.4



รูปที่ 4.5 ผลการใช้ค่าความต้านทาน $R_g = 800\Omega$ ในวงจร Chua

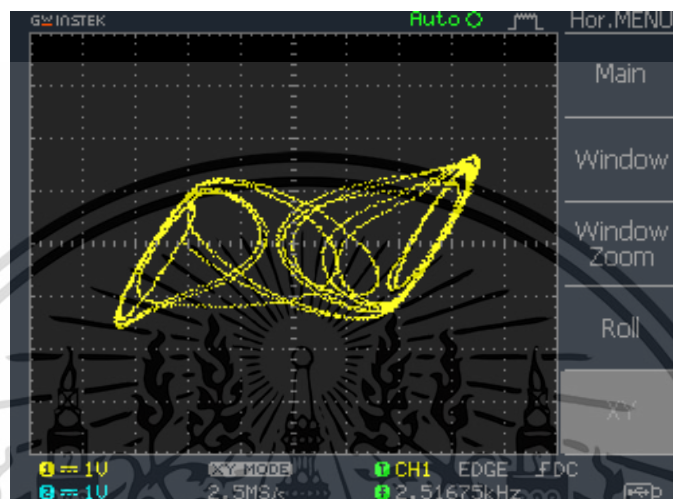
จากรูปที่ 4.6 การทดลองวงจร Chua เมื่อค่าความต้านทาน $R_g = 1200\Omega$ กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div 1 V/div ตามลำดับ ผลที่ได้เริ่มปรากฏผลการม้วนอลวนมีขนาดเล็กลง จากรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 ผลการใช้ค่าความต้านทาน $R_g = 1200\Omega$ ในวงจร Chua

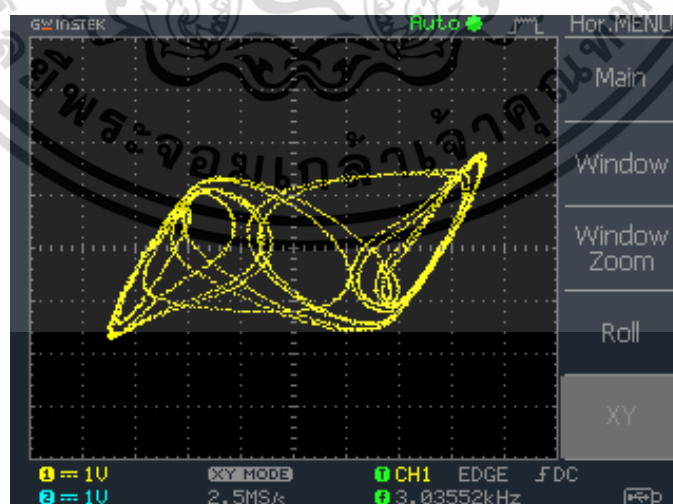
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 การทดลองวงจร Chua เมื่อค่าความต้านทาน $R_8 = 1600\Omega$ กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div 1 V/div ตามลำดับ ผลที่ได้เริ่มปรากฏผลการม้วนอลวน 2 ลูก



รูปที่ 4.7 ผลการใช้ค่าความต้านทาน $R_8 = 1600\Omega$ ในวงจร Chua

จากรูปที่ 4.8 การทดลองวงจร Chua เมื่อค่าความต้านทาน $R_8 = 2000\Omega$ กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div 1 V/div ตามลำดับ ผลที่ได้เริ่มปรากฏผลการม้วนอลวน 2 ลูก คล้ายกับรูปที่ 4.7 แตกต่างกันที่ค่าความถี่ที่ปรากฏดังรูปที่ 4.8



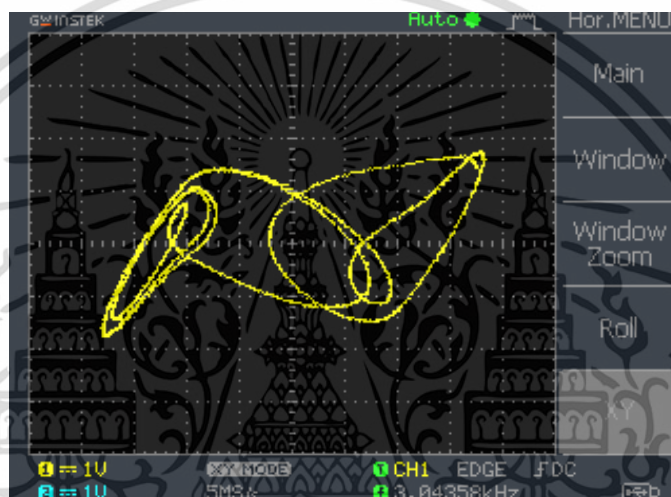
รูปที่ 4.8 ผลการใช้ค่าความต้านทาน $R_8 = 2000\Omega$ ในวงจร Chua

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองการต่อวงจร x-couple

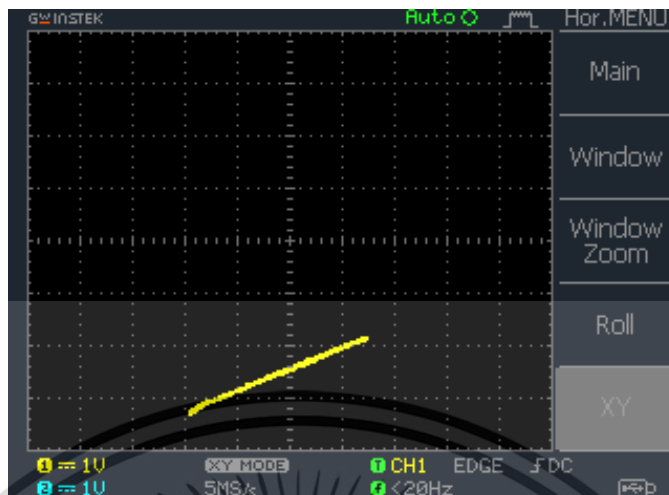
ผลการทดลองจะเป็นการต่อวงจร Chua จำนวน 2 วงจร ดังได้กล่าวถึงในข้างต้นแล้วในบทที่ 3 โดยมีการกำหนดค่าดังตารางที่ 3.1 เก็บผลโดยการเปลี่ยนค่า $R_{17} \geq 2.72k\Omega$ จึงจะทำให้วงจร Chua ทั้งสองเกิดการซิงโครไนซ์กัน โดยได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 4.9 การทดลองวงจร x-couple ซิงโครไนซ์ เมื่อค่าความต้านทาน $R_{17} \geq 2000\Omega$ กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div 1 V/div ตามลำดับ ผลที่ได้เริ่มปรากฏผลการร่ายคาบเสมือนอลวน 2 ลูก



รูปที่ 4.9 การร่ายคาบเสมือนอลวน 2 ลูก ที่ค่า $R_{17} \geq 2.72k\Omega$

จากรูปที่ 4.10 การทดลองวงจร x-couple ซิงโครไนซ์ เมื่อค่าความต้านทาน $R_{17} \geq 2000\Omega$ กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div 1 V/div ตามลำดับ แสดงผลเป็นเหมือนเส้นตรงสองเส้นทับเสมอกัน การเกิดการซิงโครไนซ์

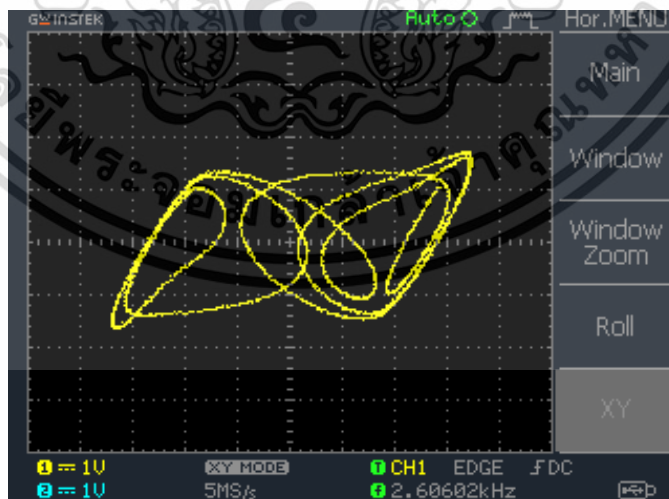


รูปที่ 4.10 x-couple ซิงโครไนซ์

4.3 ผลการทดลองการต่อวงจร y-couple

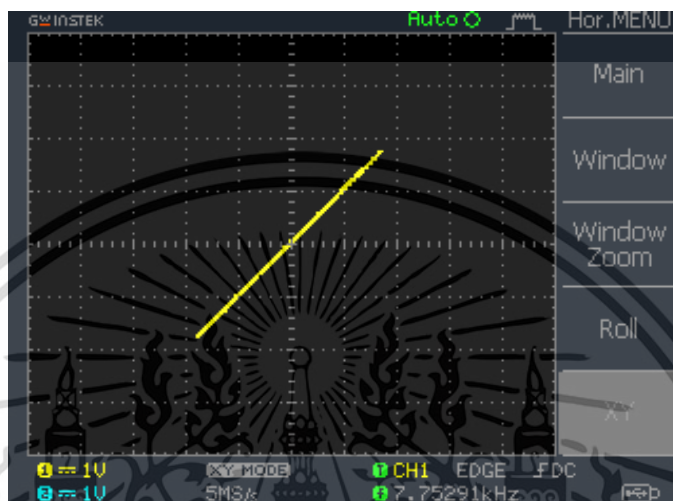
ผลการทดลองจะเป็นการต่อวงจร Chua จำนวน 2 วงจร ดังได้กล่าวถึงในข้างต้นแล้วในบทที่ 3 โดยมีการกำหนดค่าดังตารางที่ 3.2 เก็บผลโดยการเปลี่ยนค่า $R_{17} = < 100\Omega$ จึงจะทำให้วงจร Chua ทั้งสองเกิดการซิงโครไนซ์กัน โดยได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 4.11 การทดลองวงจร x-couple ซิงโครไนซ์ เมื่อค่าความต้านทาน $R_{17} \geq 2000\Omega$ กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div 1 V/div ตามลำดับ ผลที่ได้เริ่มปรากฏผลการร่ายคาบเสมือนอลวน 2 ลูก

รูปที่ 4.11 การร่ายคาบเสมือนอลวน 2 ลูก ที่ค่า $R_{17} \leq 100\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

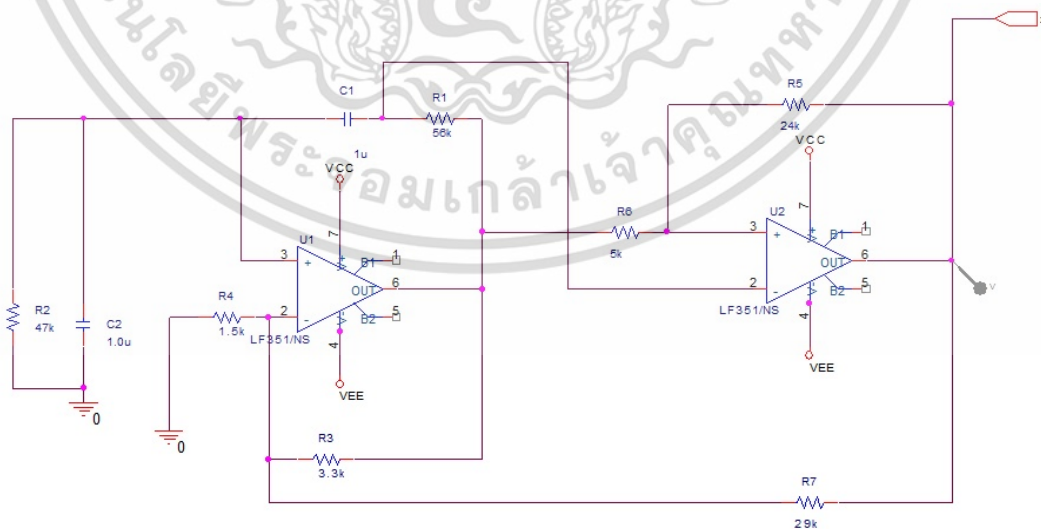
จากรูปที่ 4.12 การทดลองวงจร y-couple ซิงโครไนซ์ เมื่อค่าความต้านทาน $R_{17} \geq 100\Omega$ กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 2.5 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div 1 V/div ตามลำดับ แสดงผลเป็นเหมือนเส้นตรงสองเส้นทับเสมอกัน การเกิดการซิงโครไนซ์



รูปที่ 4.12 y-couple ซิงโครไนซ์

4.4 ผลการทดลองวงจรออสซิลเลชันแบบ Wein bridge

หัวข้อนี้จะเป็นการทดลองต่อวงจรออสซิลเลชันแบบ Wein bridge ศึกษาผลการทดลองเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรออสซิลเลชันต่าง ๆ ที่นำเสนอมาในข้างต้น

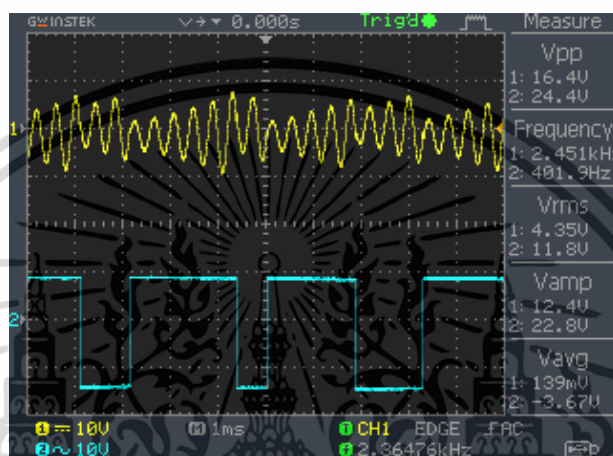


รูปที่ 4.13 วงจรออสซิลเลชันแบบ Wein bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

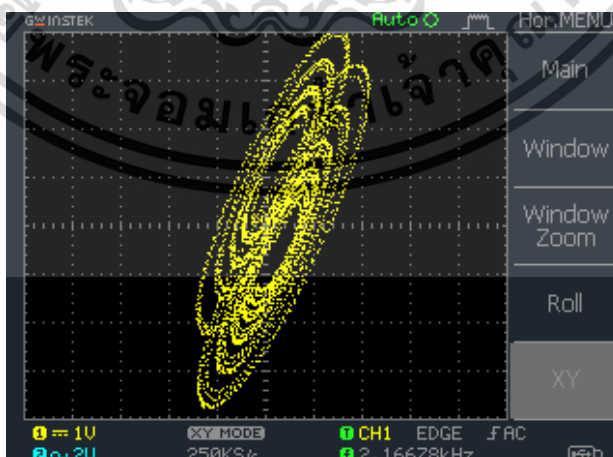
จากวงจรสำหรับเป็นตัวกำเนิดสัญญาณสั้นสะท้อนให้หุ่นยนต์ขีดเส้น ผลการทดลองโดยการปรับ R_7 ในวงจรออสซิลโลสโคปแบบ Wein bridge รูปที่ 4.13

จากรูปที่ 4.14 การทดลองวงจรออสซิลโลสโคปแบบ Wein bridge กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 1 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 10 V/div 10 V/div ตามลำดับ แสดงผลสัญญาณออสซิลโลสโคปแบบ Wien bridge ในโดเมนเวลา ความถี่ = 2.36476 kHz



รูปที่ 4.14 สัญญาณออสซิลโลสโคปแบบ Wien bridge ในโดเมนเวลา ความถี่ = 2.36476 kHz

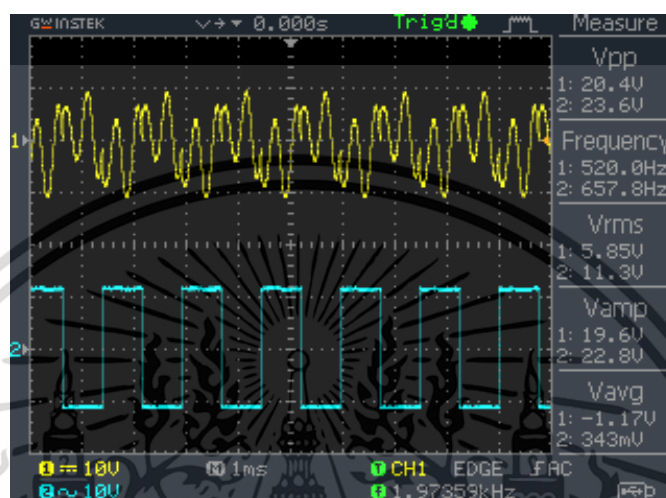
จากรูปที่ 4.15 การทดลองวงจรออสซิลโลสโคปแบบ Wein bridge กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 250 ks/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div 2 V/div ตามลำดับ แสดงผลสัญญาณออสซิลโลสโคปแบบ Wien bridge ตัวดึงดูดออสซิลโลสโคป ความถี่ = 2.16678 kHz



รูปที่ 4.15 สัญญาณออสซิลโลสโคปแบบ Wien bridge ตัวดึงดูดออสซิลโลสโคป ความถี่ = 2.16678 kHz

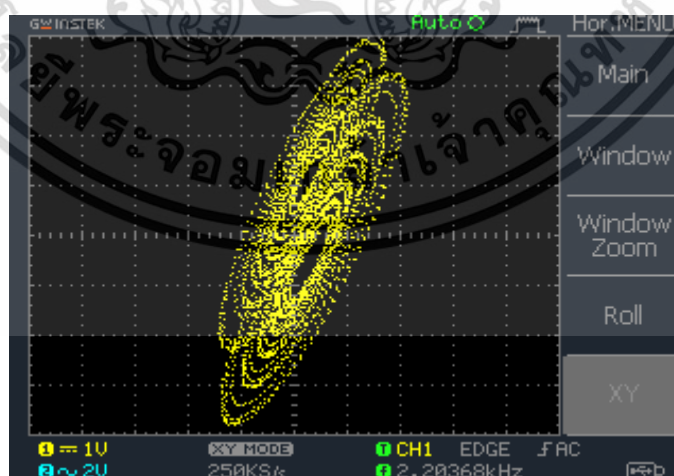
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 การทดลองวงจรออสซิลเลชันแบบ Wien bridge กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 1 ms/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 10 V/div 10 V/div ตามลำดับ แสดงผลสัญญาณออสซิลเลชันแบบ Wien bridge ในโดเมนเวลา ความถี่ = 1.97359 kHz



รูปที่ 4.16 สัญญาณออสซิลเลชันแบบ Wien bridge ในโดเมนเวลา ความถี่ = 1.97359 kHz

จากรูปที่ 4.17 การทดลองวงจรออสซิลเลชันแบบ Wien bridge กรณีที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำในโดเมนเวลา แกนนอนคือแกนเวลา(ms) ที่มาตราส่วน 250 ks/div และแกนตั้งคือค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ v_1 และ v_2 (V) ที่มาตราส่วน 1 V/div 2 V/div ตามลำดับ แสดงผลสัญญาณออสซิลเลชันแบบ Wien bridge ตัวดึงดูคออสซิลเลชัน ความถี่ = 2.20368 kHz

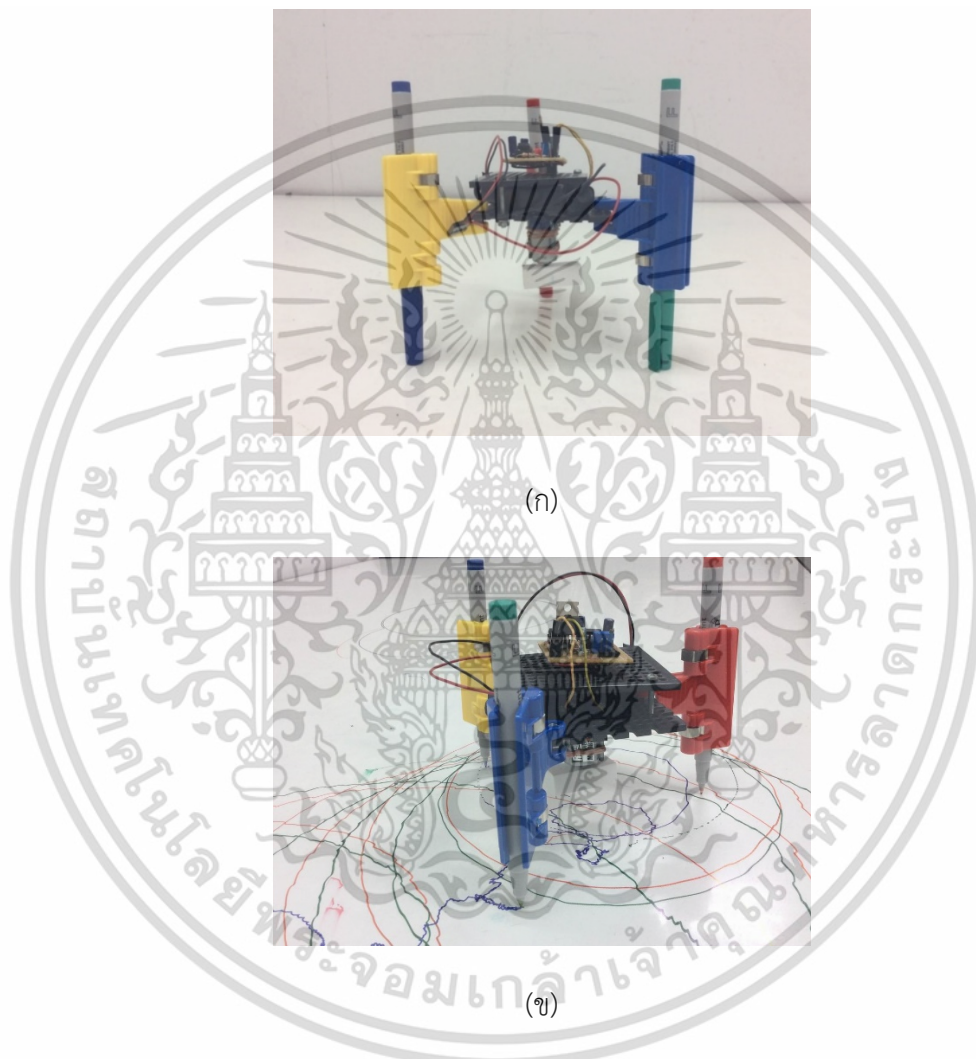


รูปที่ 4.17 สัญญาณออสซิลเลชันแบบ Wien bridge ตัวดึงดูคออสซิลเลชัน ความถี่ = 2.20368 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

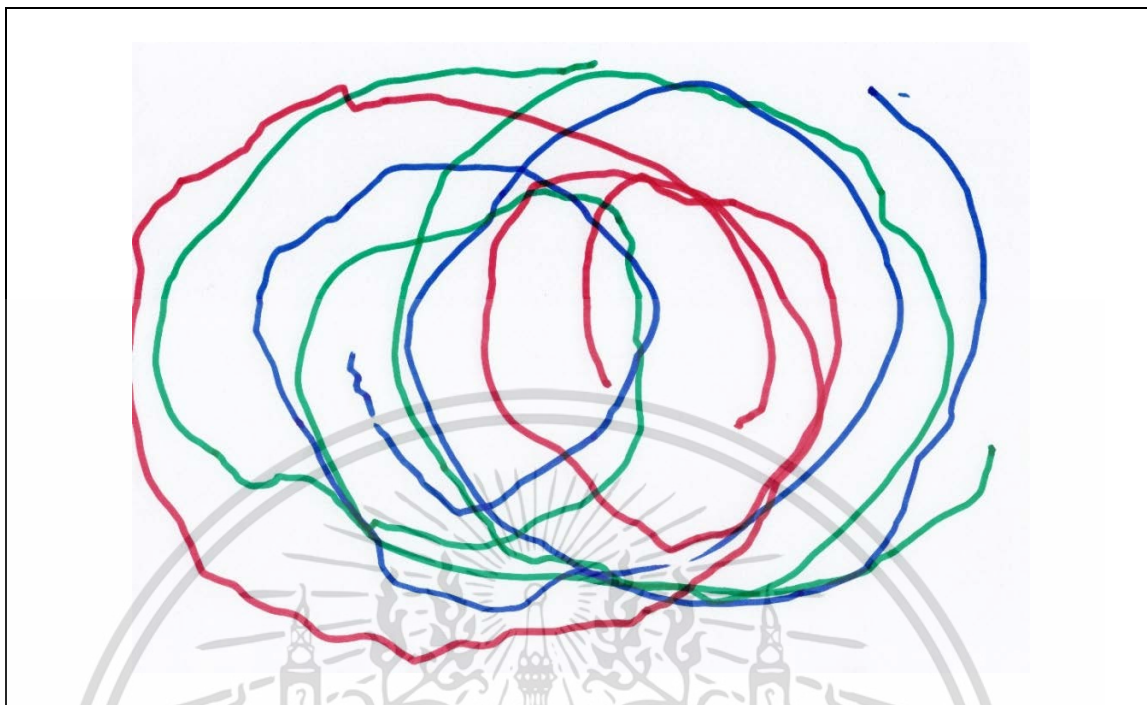
4.5 แนวทางการนำหุ่นยนต์อลวนกับงานวาดรูปนามธรรม

หัวข้อนี้เป็นการนำผลการวิจัยตัวกำเนิดสัญญาณอลวนแบบสองโหมดเพื่อแนวทางการประยุกต์ทางด้านศิลปะ โดยนำขนาดความถี่ของสัญญาณมาใช้สามารถใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อใช้เป็นโมดูลสำหรับสร้างหุ่นยนต์ Doodle ซึ่งแสดงตัวหุ่นดังรูปที่ 4.18 และ ผลการทดลองเป็นเพียงการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาแนวทางและหาศักยภาพของการประยุกต์สัญญาณอลวนที่นำเสนอในงานวิจัยนี้กับศิลปะ

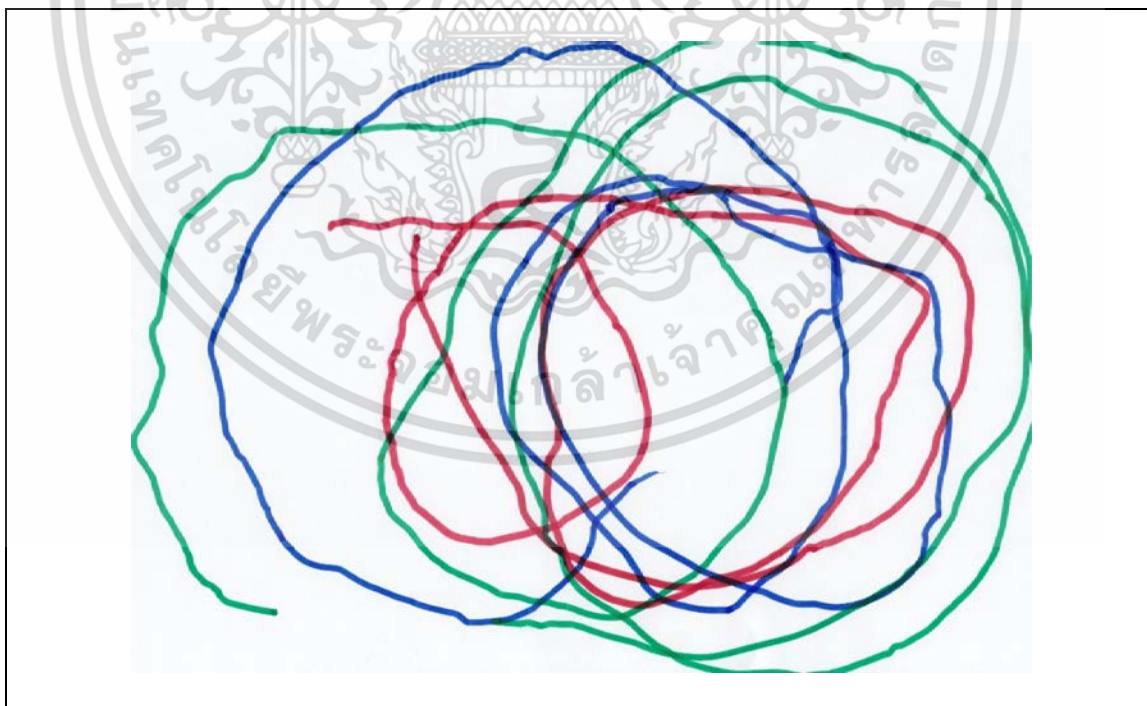


รูปที่ 4.18 หุ่นยนต์ Doodle (ก. แสดงลักษณะก่อนทำงาน ข. แสดงลักษณะการทำงาน)

เมื่อนำขนาดความถี่ของสัญญาณมาใช้สามารถใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อใช้เป็นโมดูลสำหรับสร้างหุ่นยนต์ Doodle ที่สามารถวาดรูปนามธรรม ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.19 – 4.22 ดังจะเห็นได้ว่าภาพดังกล่าวมีลักษณะเป็นนามธรรมซึ่งอาจใช้เป็นภาพพื้นหลังได้ อนึ่งรูปที่ 4.21 กับรูปที่ 4.22 นั้นมีภาพจริงที่วางซ้อนจากภาพที่ไม่ได้อยู่ในรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงระหว่างจินตนาการของการใช้ภาพจริงในภาพนามธรรม



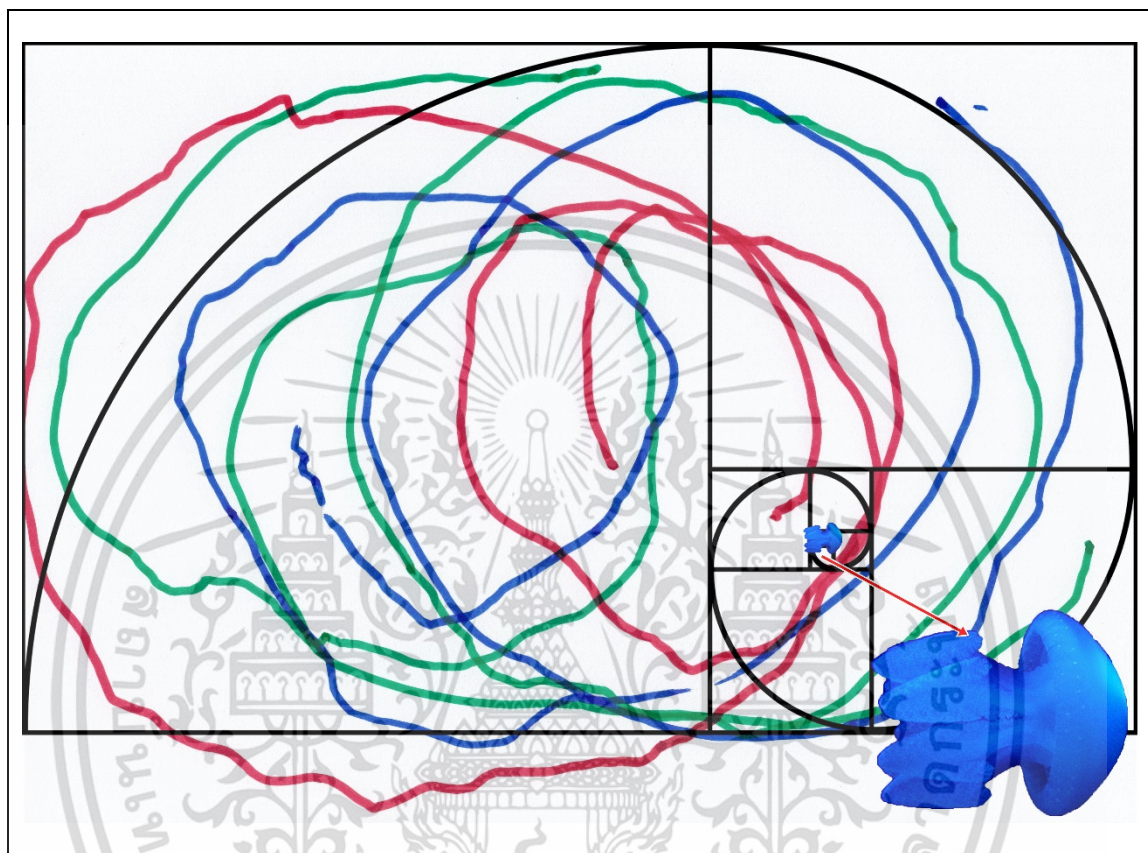
รูปที่ 4.19 รูปวาดจากหุ่นยนต์ Doodle แบบที่ 1



รูปที่ 4.20 รูปวาดจากหุ่นยนต์ Doodle แบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

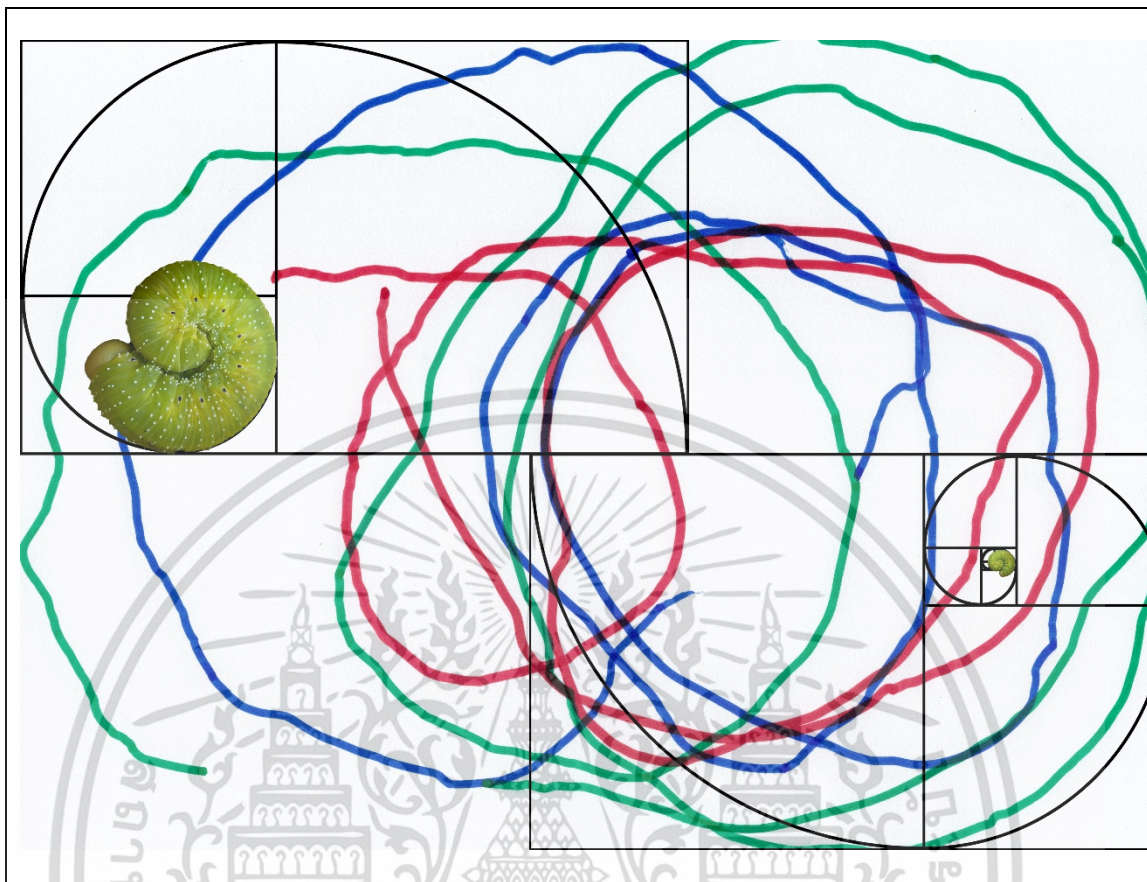
โดยตำแหน่งในภาพ 4.21 นั้นใส่เฟรม Fibonacci และภาพที่ใส่อยู่ในตำแหน่งของจุดกันหอย Fibonacci คือ รูปแมงกะพรุน (jellyfish)



รูปที่ 4.21 รูปวาดจากหุ่นยนต์ Doodle แบบที่ 1 ใส่เฟรม Fibonacci

สำหรับจุดเสริมภาพจริงจากรูปที่ 4.22 อาศัยการสุ่มตำแหน่งโดยใช้สัญญาณอลวนแบบสองโหมดซึ่งได้จากการคำนวณโดยสมการ Chua จากระนาบ $x-y$ โดยที่ได้คือ $(-8/7, -5/7)$ ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์ $(\alpha=15.6, \beta=1)$ และค่าเริ่มต้น $(x_0, y_0) = [0.1, 0.1]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 รูปวาดจากหุ่นยนต์ Doodle 2 ใส่เฟรม Fibonacci โดยการสุ่มตำแหน่งโดยใช้สัญญาณคลื่นแบบสองโหมด

บทนี้กล่าวถึงผลการทดลอง ซึ่งแบ่งเป็น 5 หัวข้อ คือ 1) ผลการทดลองการต่อวงจร Chua โดยมีเนื้อหาประกอบ เช่น 2) ผลการทดลองการต่อวงจร x -couple 3) ผลการทดลองการต่อวงจร y -couple 4) ผลการทดลองวงจรคลื่นแบบ Wein bridge 5) แนวทางการนำหุ่นยนต์คลื่นกับงานวาดรูปนามธรรม โดยมีการยกตัวอย่างผลงานการวาดภาพเชิงนามธรรมเปรียบเทียบกับผลงานการวาดของหุ่นยนต์ Doodle รูปที่ 4.19 เพื่อแนวทางการประยุกต์ใช้ทางด้านศิลปะ ในบทต่อไปเป็นการสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะที่ได้ศึกษาและวิจัยในบทที่ 1-4 เพื่อให้ผู้ที่สนใจได้ศึกษาและต่อยอดงานวิจัยฉบับนี้ได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบคู่เพื่อแนวทางการประยุกต์ทางด้านศิลปะ โดยได้นำเอาคุณสมบัติของวงจร Chua และ Wein bridge มาใส่ในตัวหุ่นยนต์ Doodle สรรค์สร้างงานศิลปะนามธรรม เพื่อเป็นแนวทางให้กับศิลปินที่มีองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมพื้นฐาน สามารถนำไปใช้ต่อยอดได้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยนี้อ้างอิงข้อจำกัดของงานวิจัยที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 1 โดยสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

ผลการทำงานของหุ่นยนต์ใช้ทฤษฎีเบื้องต้นมีองค์ประกอบหัวข้อที่สำคัญคือ นิยามตัวดึงดูด วงจรของ Chua ตัวกำเนิดสัญญาณ Wein bridge และศิลปะนามธรรม (Abstract Art) โดยมีหลักการออกแบบและสร้างสัญญาณออสซิลเลชันแบบสองโหมด โดยมีองค์ประกอบ เช่น ตัวสร้างสัญญาณ Wien bridge, ฮิสเทอรีซิสฟังก์ชัน (The hysteresis function), วงจร Chua, ลักษณะเฉพาะของการไม่เป็นเชิงเส้นของตัวต้านทาน และวงจรตัวกำเนิดสัญญาณออสซิลเลชันแบบสองโหมด (Dual mode chaotic oscillator) โดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยทดลองกับวงจรออสซิลเลชันแบบคู่ เช่น วงจร x-couple วงจร y-couple เป็นต้น เพื่อนำผลการใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ที่ได้ เป็นตัวอย่างในการนำอุปกรณ์จริงลงบอร์ดทดลอง หลักการออกแบบและสร้างสัญญาณออสซิลเลชันแบบสองโหมด ซึ่งได้ผลการทดลองมีองค์ประกอบ 5 หัวข้อที่สำคัญคือ 1) ผลการทดลองการต่อวงจร Chua โดยมีเนื้อหาประกอบ เช่น 2) ผลการทดลองการต่อวงจร x-couple 3) ผลการทดลองการต่อวงจร y-couple 4) ผลการทดลองวงจรออสซิลเลชันแบบ Wein bridge และ 5) แนวทางการนำหุ่นยนต์ออสซิลเลชันกับงานวาดรูปนามธรรม โดยมีการยกตัวอย่างผลงานการวาดภาพเชิงนามธรรมเปรียบเทียบกับผลงานการวาดของหุ่นยนต์ Doodle รูปที่ 4.16 เพื่อแนวทางการประยุกต์ใช้ทางด้านศิลปะ

หลังจากที่ได้ทำการทดลอง ตามเนื้อหาบทที่ 1-4 หุ่นยนต์ Doodle สามารถทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนดในข้างต้นได้ และแสดงผลงานทางด้านศิลปะนามธรรม โดยการวาดรูปดังตัวอย่างในบทที่ 4 พร้อมเปรียบเทียบงานศิลปะนามธรรมจากศิลปินที่มีชื่อเสียง โดยนำผลงานที่มีความคล้ายคลึงกับผลงานศิลปะนามธรรมที่หุ่นยนต์ได้สรรค์สร้างขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะในการนำไปประยุกต์ใช้

งานในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวอย่างสองตัวอย่างของการประยุกต์การใช้งานที่สามารถเป็นหุ่นยนต์วาดภาพแบบง่าย ๆ โดยอาศัยแนวทางในวิทยานิพนธ์นี้อาจขยายผลโดยใช้ความถี่ที่สูงหรือต่ำกว่า 10Hz เพื่อให้หุ่นยนต์วาดภาพสร้างสรรค์ผลงานที่มีความแตกต่างต่อยอดจากวิทยานิพนธ์นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กฤตากร กล่อมการ. *วงจรสร้างสัญญาณอววนแบบหลากหลายรูปแบบ*. เอกสารนำจดสิทธิบัตรไทย. 2556.
- [2] ปิติเขต สุรักษา. *หุ่นยนต์อววน Chaotic Robots*. คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด มีน
เซอร์วิส. 2560.
- [3] M. P. Kennedy, R. Rovatti and G. Setti, “*Chaotic Electronics in Telecommunications*,”
FL, Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [4] L. Kocarev and L. Shiguo (Eds.), “*Chaos-Based Cryptography. Theory, Algorithms and
Applications*,” Springer, 2011.
- [5] W. Perruquetti and J.-P. Barbot, *Chaos in automatic control*, CRC Press, Taylor &
Francis, 2006.
- [6] S. Banerjee and G. C. Verghese, *Nonlinear Phenomena in Power Electronics*, NJ,
Piscataway: IEEE Press, 2001.
- [7] E. Bilotta and P. Pantano, “A Gallery of Chua attractor,” *World Scientific Series on
Nonlinear Science Series A*, vol.61, 2008.
- [8] G. Mayer-Kress, I. Choi, N. Weber, R. Barger and A. Hubler, “Musical signals from
Chua's circuit,” *IEEE Trans on Circuits and Systems I*, vol.44, no.10, 1997.
- [9] D.C. Hamill, “Learning about chaotic circuits with Spice,” *IEEE Trans. on Education*,
vol.36, pp.28-35, 1993.
- [10] R. Rocha, L.S. Martins-Filho and R.F. Machado, “A methodology for the teaching of
dynamical systems using analogous electronic circuits,” *Int. J of Electrical
Engineering Education*, vol.43, no.4, pp.334-345, 2006.
- [11] P. Stavroulakis, *Chaos Applications in Telecommunications*, CRC Press, 2006.
- [12] W. Perruquetti and J. P. Barbot, *Chaos in Automatic Control*, CRC Press, 2005.

- [13] G. Chen and T. Ueta, "Chaos in Circuits and Systems," World Scientific, Singapore, 2002.
- [14] P. Sooraksa and K. Klomkarn, "No-CPU Chaotic Robots: From Classroom to Commerce," *IEEE Circuits and Systems Mag*, vol.10, pp.46 – 53, First Quarter 2010.
- [15] M.E. Yalcın, "True Random Bit Generation from a Double-Scroll Attractor," *IEEE Trans. on Circuit and Systems*, vol.51, no. 7, pp.1395-1404, 2004.
- [16] Z. Zhang and G. Chen, "Chaotic liquid shaker: design, implement and application," *Int. J Bifurcat. Chaos*, vol.17, pp.4443–4451, 2007.
- [17] J. Kawata, Y. Nishio and A. Ushida "Analysis of Chua's circuit with transmission line," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol.44, no.6, pp.556 -558, 1997.
- [18] Q. Li and X.S Yang, "Chaotify Wien-bridge Harmonic Oscillators," *Proc ICCAS.*, vol.4, Chongqing, China pp.2361-2364, 2006.
- [19] B. C. Bao, N. Wang, M. Chen, Q. Xu and J. Wang, "Inductor-free simplified Chua's circuit only using two-op-amps-based realization," *Nonlin. Dyn.*, vol.84, no.2, pp.511-525, Apr. 2016.
- [20] G. Mykolaitis, A. Tamasevicius and S. Bumeliene, "Experimental demonstration of chaos from Colpitts oscillator in VHF and UHF ranges," *Electron. Lett.*, vol.40, no. 4, pp.91-92, 2004.
- [21] K. Short, "Method and apparatus for remote digital key generation," 8 May 2007.
- [22] Z. Liu, X. ZHU, W. Hu and F. Jiang, "Principles of chaotic signal radars," *Int. J of Bifurcat. Chaos*, vol.17, no.5, pp.1735-1739, 2007.
- [23] S. Christopher and P Young, "Implementing RF broadband chaotic oscillators: design issues and results," *Proc. of the 1998 IEEE Int. Symp. on Circuit and system*, vol.4, pp.489-493, 1998.

- [24] J. Guckenheimer and P. Holmes, *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*, Springer-Verlag, 1983.
- [25] A. S. Elwakil and M. P. Kennedy, “High frequency wien-type chaotic oscillator,” *Electron. Lett.*, vol.34, pp.1161-1162, 1998.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก. การสร้างตัวดึงดูดแบบต่าง ๆ

ก.1 ตัวดึงดูดแบบ Lorenz

เป็นตัวดึงดูดแรกที่เราจักกันที่ค้นพบโดย E.N Lorenz[15] จากการสร้างแบบจำลองพยากรณ์อุตุนิยมวิทยาของการแปรผันของสภาวะอากาศ โดยแบบจำลองแสดงได้ ด้วยสมการอนุพันธ์ลำดับ 3 คือ

$$x' = -ax + ay \quad (ก.1)$$

$$y' = rx - y - xz \quad (ก.2)$$

$$z' = -bz + xy \quad (ก.3)$$

จากสมการเป็นการแสดงการไหลของอากาศจากการนำความร้อน โดยอากาศร้อนจะไหลขึ้นที่สูง และอากาศเย็นจะตกสู่ระดับล่าง เนื่องจากแรงดึงดูดของโลก โดยการเคลื่อนที่ในลักษณะวงแหวน ตัวแปร x ขึ้นอยู่กับการนำความร้อน และตัวแปร y และ z จะเป็นการวัดการกระจายของความร้อนรอบ ๆ วงแหวนในงานวิจัย Lorenz ได้ให้ $a=10$, $b = 8/3$ และค่า r . กำหนดให้เป็นพารามิเตอร์ควบคุมโดยปรับให้มีขนาดต่าง ๆ

จากสมการ (ก.4) หาจุดสมดุลของระบบ โดย $x'=y'=z'=0$ จะได้ $y=x, z=r-1$ และ $x^2 = y^2 = b(r-1)$ ดังนั้นระบบจะมีจุดสมดุลอยู่ 3 จุด คือที่ $P^0 = (0,0,0)$ และ $P^\pm = (\pm\sqrt{b(r-1)}, \pm\sqrt{b(r-1)}, r-1)$ โดยจุดสมดุลที่ P^+ และ P^- จะเกิดขึ้น เมื่อค่า $r > 1$ จากสมการที่ (ก.4) เพื่อหาคุณสมบัติของระบบ ทำการหาค่า Jacobian matrix ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial x} & \frac{\partial f_x}{\partial y} & \frac{\partial f_x}{\partial z} \\ \frac{\partial f_y}{\partial x} & \frac{\partial f_y}{\partial y} & \frac{\partial f_y}{\partial z} \\ \frac{\partial f_z}{\partial x} & \frac{\partial f_z}{\partial y} & \frac{\partial f_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (ก.4)$$

โดยค่า Jacobian matrix ของสมการที่ (ก.4) มีค่า

$$J = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ r-z & -1 & -x \\ y & x & -b \end{bmatrix}. \quad (ก.5)$$

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

$$\lambda^3 + (a+b+1)\lambda^2 + (a-ar+ab+b)\lambda + ab(1-r) \quad (ก.6)$$

และที่จุดสมดุล P^\pm มีสมการคุณสมบัตินี้คือ

$$\lambda^3 + (a+b+1)\lambda^2 + b(a+r)\lambda + 2ab(r-1) \quad (ก.7)$$

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 n 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 ระบบจะมีเสถียรภาพภายใต้เงื่อนไข เมื่อ $a_1 > 0$, $a_2 > 0$, $a_3 > 0$ หรือ $a_1 a_2 - a_3 > 0$ ซึ่งเขียนได้

$$(a+b+1)(a+r)b - 2ab(r-1) > 0 \quad (ก.8)$$

ดังนั้นที่จุดสมดุล P^\pm ระบบจะมีเสถียรภาพ ถ้า

$$r < \frac{a(a+b+3)}{a-b-1} \quad (ก.9)$$

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

ที่จุดสมดุล P^\pm จะมีค่ารากเป็นบวก 1 ค่า อยู่ทางด้านซ้ายของระนาบ S และมีรากเป็น $\sigma \pm j\omega$ 1 คู่อยู่ด้านขวามือของระนาบ S ซึ่งที่จุดสมดุล P^\pm นี้ เส้นทางโคจรจะแสดงการไหลเข้าและหมุนออกหรือเรียกว่า eigen มีลักษณะเป็น Spiral saddle index 2 ดังนั้นจากจุดสมดุล ถ้าที่ P^0 แทนการไหลเข้าและไหลออกและที่จุด P^\pm แทนการไหลเข้าและหมุนออกแล้ว หลังจากค่าเริ่มต้นเส้นทางโคจรไม่สามารถออกจากตัวดึงดูดได้ ดังนั้นเมื่อตัวดึงดูดไหลออกจากจุดสมดุล P^0 แล้วจะไหลเข้าสู่สมดุล P^+ หรือ P^- และที่สองจุดนี้จะแทนจุดหมุนออกซึ่งอาจจะหมุนรอบจุดสมดุลนี้หรือไหลกลับเข้าสู่จุดสมดุล P^0 ซึ่งพฤติกรรมนี้จะเกิดการไหลวนในลักษณะหลากหลายหรือแสดงสภาวะ (Chaotic attractor) และเพื่อแสดงว่าระบบ Lorenz เป็นระบบที่มีขอบเขตค่า divergence ของการไหลของตัวดึงดูด ต้องอยู่ในเงื่อนไข

$$\nabla F = \frac{\partial Fx}{\partial x} + \frac{\partial Fy}{\partial y} + \frac{\partial Fz}{\partial z} < 0 \quad (\text{ก.10})$$

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

ก.2 ตัวดึงดูดของ Chen

เป็นตัวดึงดูดค้นพบโดย Chen[20] โดยเกิดจากการควบคุมระบบ Lorenz ให้ไปในทิศทางที่ขาดเสถียรภาพยิ่งขึ้นหรือ ทำให้ระบบที่เป็นอนลวนอยู่แล้วให้เป็นอนลวนมากขึ้น ซึ่งโดยกระทำด้วยการให้ค่าควบคุมเข้าที่ y' ของระบบ Lorenz หรือแสดงได้

$$x' = -ax + ay \quad (\text{ก.11})$$

$$y' = cx - y - xz + u \quad (\text{ก.12})$$

$$z' = -bz + xy \quad (\text{ก.13})$$

โดยค่าควบคุมมีค่า $u = k_1x + k_2y + k_3z$ จากสมการ (ก.12) สามารถหาจุดสมดุลของระบบโดยให้ $x' = y' = z' = 0$ แล้วจะได้จุดสมดุลจุดแรกคือที่ $P^0 = (0,0,0)$ และเมื่อให้ $x = y$ จะได้ $z = \frac{1}{b}x^2$ ดังนั้นระบบจะมีจุดสมดุลอีก 2 จุดที่ P^\pm คือ $x = y = \frac{1}{2}k_3 \pm \frac{1}{2}\sqrt{k_3^3 + 4(b+k_1+k_2-11)}$, $z = \frac{1}{b}x^2$ จากสมการ(2.12) หาค่า Jacobian matrix ของระบบได้คือ

$$J = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c+k_1-z & k_2-1 & k_3-x \\ y & x & -b \end{bmatrix} \quad (\text{ก.14})$$

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

$$\lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 \quad (\text{ก.15})$$

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 $k_1 = a$ $k_2 = 1+c$ ดังนั้น ทำให้ได้ค่าตัวควบคุมใหม่คือ $u = -ax + (1+c)y$ ทำให้สมการของระบบ Chen แสดงได้

$$x' = -ax + ay \quad (\text{ก.16.1})$$

$$y' = (c - a)x - ay - xz \quad (\text{ก.16.2})$$

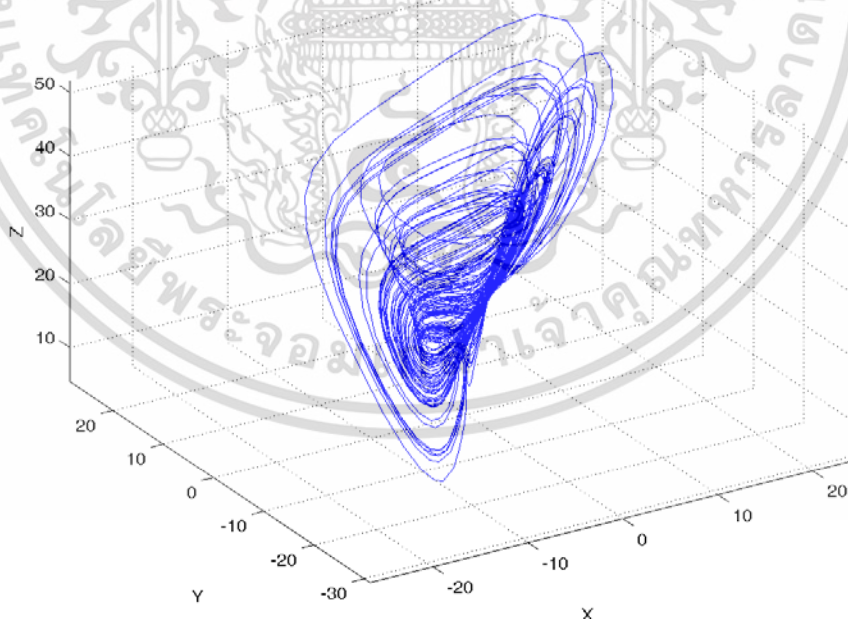
$$z' = -bz + xy \quad (\text{ก.16.3})$$

จากสมการเพื่อให้ระบบเป็นระบบ dissipative

$$\nabla F = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial F}{\partial z} = -a + c - b < 0 \quad (\text{ก.17})$$

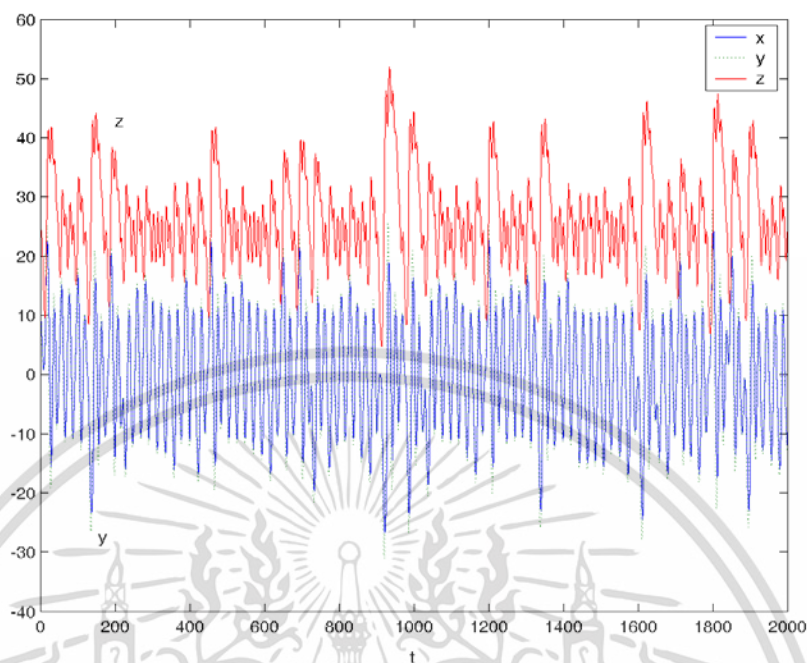
ระบบ Chen เลือกให้ $a = 35, b = 8/3, c = 28$ ซึ่งเป็นที่อยู่สมดุล P^0 จะมีค่า eigen เป็น saddle index 1 และที่จุดสมดุล P^\pm มีค่า eigen เป็น spiral saddle index 2 และระบบมีค่า $\lambda_1 = 2.18, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -11.85$

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 $\lambda_1 = 2.18, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -11.85$



รูปที่ ก.1 ตัวดึงดูดแบบ Chen

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 ตัวดึงดูดแบบ Chen ในแกนเวลา

ก.3 ตัวดึงดูด Sprott

หลังจากที่ Lorenz และ Rossler ได้ค้นพบสมการเกี่ยวกับการสร้างตัวดึงดูดสัญญาณอลวน ต่อมา มีผู้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างสัญญาณอลวนแบบใหม่ คือ J.C. Sprott ซึ่งได้ใช้คอมพิวเตอร์หาสมการอลวน ทั้งหมดที่เป็นไปได้โดยอยู่ในรูป Jerk function ($\ddot{x} = J(\dot{x}, \dot{x}, x)$) พร้อมด้วยฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้น แบบง่าย ๆ 1 ตัว โดยสมการที่ Sprott ค้นพบมีดังนี้

ตารางที่ ก.1 การสร้างสัญญาณอลวน third-order ODE systems และ Lyapunov exponents

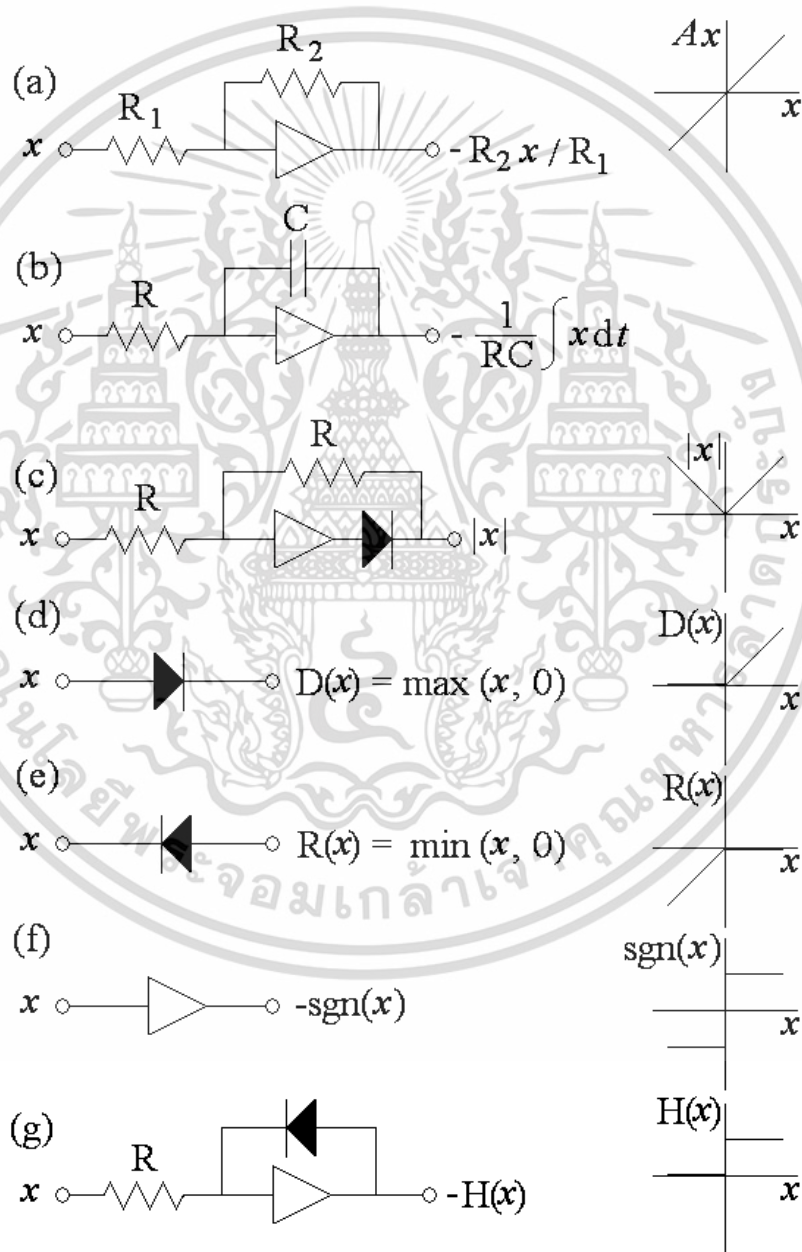
System	Initial conditions (x, \dot{x}, \ddot{x})	Lyapunov exponents (base e)
$\ddot{x} = -2.017 \dot{x} \pm x^2 - x$	(0, 0, ± 1)	0.055, 0, -2.072
$\ddot{x} = -2.8 \dot{x} \pm x + x^2$	($\pm 0.5, -1, 1$)	0.002, 0, -0.002
$\ddot{x} = -0.44 \dot{x} - 2 \dot{x} \pm (x^2 - 1)$	(0, 0, 0)	0.105, 0, -0.545
$\ddot{x} = -0.5 \dot{x} - \dot{x} \pm x + x^2$	(0, $\pm 1, 0$)	0.094, 0, -0.594
$\ddot{x} = -2 \dot{x} \pm (x - 1)$	($\pm(-1, -1, 1)$)	0.003, 0, -0.003
$\ddot{x} = -0.6 \dot{x} - \dot{x} \pm (x - 1)$	(0, 0, 0)	0.036, 0, -0.636
$\ddot{x} = -0.3 \dot{x} - 0.3 \dot{x} - D(x) + 1$	(0, 0, 0)	0.042, 0, -0.342
$\ddot{x} = -0.3 \dot{x} - 0.3 \dot{x} - R(x) - 1$	(0, 0, 0)	0.042, 0, -0.342
$\ddot{x} = -2.9 \dot{x} \pm (0.7x - D(x) + 1)$	($\pm(0, -0.5, 0.5)$)	0.003, 0, -0.003
$\ddot{x} = -2.9 \dot{x} \pm (0.7x - R(x) - 1)$	($\pm(0, 0.5, -0.5)$)	0.003, 0, -0.003
$\ddot{x} = -0.5 \dot{x} - \dot{x} - x + \text{sgn}(x)$	(0, 1, 0)	0.152, 0, -0.652
$\ddot{x} = -0.5 \dot{x} - \dot{x} + x - \text{sgn}(x)$	(0, 1, 0)	0.601, 0, -1.101
$\ddot{x} = -0.7 \dot{x} - \dot{x} - x + H(x)$	(0, 1, 0)	0.085, 0, -0.785
$\ddot{x} = -0.4 \dot{x} - \dot{x} - x + 2S(x)$	(0, 1, 0)	0.072, 0, -0.472
$\ddot{x} = -0.4 \dot{x} - \dot{x} + x - 2S(x)$	(0, 1, 0)	0.091, 0, -0.491
$\ddot{x} = -0.19 \dot{x} - \dot{x} - x + 2 \tanh(x)$	(0, 1, 0)	0.128, 0, -0.318
$\ddot{x} = -0.19 \dot{x} - \dot{x} + x - 2 \tanh(x)$	(0, 1, 0)	0.067, 0, -0.257
$\ddot{x} = -3.7 \dot{x} \pm (x - x^3)$	(0, $\pm 0.5, 1$)	0.002, 0, -0.002
$\ddot{x} = -0.6 \dot{x} + 2.8 \dot{x} - x^3 - x$	(0, 1, 0)	0.034, 0, -0.634
$\ddot{x} = -0.7 \dot{x} - \dot{x} + x - x^3$	(0, 1, 0)	0.138, 0, -0.838
$\ddot{x} = -0.35 \dot{x} - \dot{x} - x + x^3$	(0, 1, 0)	0.082, 0, -0.432
$\ddot{x} = -0.2 \dot{x} - \dot{x} \pm \sin(x)$	(0, 1, 0)	0.123, 0, -0.323

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ ก.1 แสดงสมการอลวนที่อยู่ในรูปแบบของพร้อมกับค่าเริ่มต้นและค่า Lyapunov exponents ที่ J.C. Sprott ค้นพบ

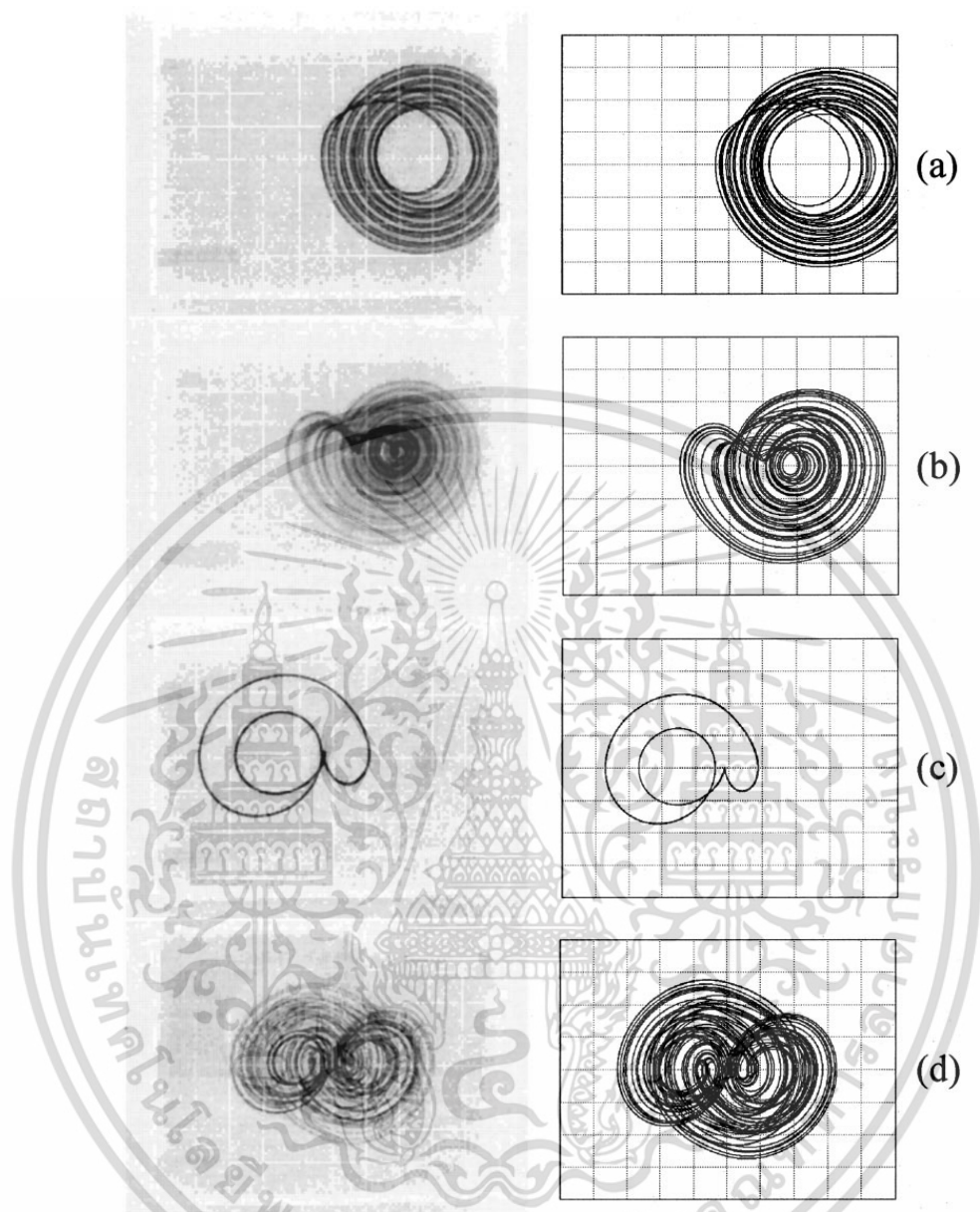
ในการสร้างวงจรในทางปฏิบัติจากสมการคณิตศาสตร์ใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ วงจรขยายและวงจรไม่เป็นเชิงเส้นแบบต่าง ๆ ซึ่งสร้างโดยอาศัยออปแอมป์และไดโอดแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

จากรูปเห็นได้ว่าสามารถสร้างวงจรขยายสัญญาณ วงจรอินทิเกรเตอร์ และวงจรแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ด้วยการใช้ออปแอมป์และไดโอดในระบบนี้ข้อกำหนดทางความถี่ขึ้นอยู่กับขนาด gain bandwidth ของออปแอมป์



รูปที่ ก.3 การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ที่แทนด้วยวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 สัญญาณอลวนจากตัวดึงดูด Sprott ในลักษณะ 2 มิติระหว่างระนาบ x กับ x'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Udomsit Tantrakunphaisan, Kitdakorn Klomkarn and Pitikhate Sookaksa, “Dual-mode Chaotic Oscillator : Applications for Art and Music”, **The 3rd International Conference on Digital Arts, Media and Technology 2018(ICDAMT 2018)**, Feb 25-28, 2018, pp 73-77.



iCDAMT

International Conference on Digital Arts, Media and Technology

Wisdom
for Community
Empowerment

2018

25-28 FEB 2018
UNIVERSITY OF PHAYAO
CHIANGRAI CAMPUS
THAILAND

www.icdamt.org



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดย Lanna Center for Digital Arts, Media and Technology (Lanna Center for Digital Arts, Media and Technology) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEEE Catalog Number: CFP17H33-DVD ISBN: 978-1-5386-0572-1

Dual-mode Chaotic Oscillator: Applications for Art and Music

Udomsit Tantrakunphaisan

Department of computer Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand

Kitdakorn Klomkarn

Department of computer Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand
kitdakorn.kl@kmitl.ac.th

Pitikhate Sooraksa

Department of computer Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand

Abstract This paper presents new dual chaotic attractors. The dual-mode chaotic system is comprised inductorless Chua's circuit and a chaotic Wien bridge chaotic oscillator. The objective of the proposed circuit is to teach undergraduate students. The proposed circuit is simple and can be rapidly constructed in the laboratory. Two potential applications are provided for arts and music.

Keywords—Chaotic oscillator, Engineering Education, Music Engineering.

I. INTRODUCTION

Applications of chaos theory to engineering fields has attracted attention from researchers in many areas. The property of chaotic synchronization with the same parameter system and random-like noise can be applied for modulation, spread spectrum and secure communication[1]. In modern cryptography technique, a sensitive to initial condition property is useful for encryption text, voice, image and video signal[2]. The chaotic phenomena due to the nonlinear element in circuits or systems are important in control and power electronics systems[3,4]. Not only in engineering society, the behaviors of well-known chaotic electronics or Chua's circuit can be obtained aesthetic picture gallery by using computer simulation[5].

In music engineering, chaotic systems are also applied for generating and controlling of sound signals, some researcher[6] used chaotic circuits for construction of music instrument.

As aforementioned, the topic of study of nonlinear chaotic dynamics for undergraduate engineering students such as telecommunication, information, electronics including music engineering are necessary. In engineering education, [7] demonstrated how to study the Lorenz, Rossler, Ueta and some simple chaotic circuits by PSPICE simulation. The hardware implementation of Lorenz, Rossler and Duffing system construction for students in laboratory experiments is

presented in [8], however, these systems are not simple for a short-time and low-cost experiment. Hence, in this paper, we show a simple dual-mode chaotic circuit that can be operated from negative resistance and feedback oscillator point of views which is simple to construct.

This paper is organized as follows. Section II reviews chaotic oscillators by using negative resistance and feedback oscillator techniques. In Sec.III, the proposed dual-modes are presented. All results of PSpice simulation are shown in Sec. IV . Applications of a drawing robot and a guitar effect are illustrated in Sec V, and finally, Sec.VI concludes of paper.

II. CHAOTIC OSCILLATOR

The report of Chua's circuit which is autonomous circuit invented by L.O Chua was published in 1984[9], Chua's circuit is the first chaotic circuit realized from passive electronic components and an active one which is a nonlinear negative resistor called Chua's diode. The double-scroll obtained from Chua's circuit that is rigorous mathematical proof is shown in[10]. Simple implementation on RLC resonant circuit to piecewise-linear circuits and Chua's circuit is presented in [11]. The first version of non-autonomous Chua's circuit[12] is modified from an original Chua's circuit by replacing LC resonant circuit with a sinusoidal driven source. In [13], the researcher implements an inductorless Chua's circuit using the same concept from [12] by exploiting Wien bridge oscillator for substituting RLC resonant. To construct a chaotic circuit from a linear system using nonlinear feedback, the system in [14] consisted of the unstable second-order linear system with hysteresis feedback is employed. In [15], the system is a double-scroll liked-chaotic dynamic system used three basic integrator circuits to implement the third-order stable linear system feedback with a comparator circuit. The chaotic circuit that can be exhibited two modes via a switching method called a mixed-mode chaotic oscillator is

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

proposed in[17] by combining an autonomous chaotic circuit [9] with non-autonomous Chua's circuit[12]. The inductorless Chua's circuit modified an autonomous circuit in the first mixed mode is constructed [13]. The feedback of linear circuits with a nonlinear element to generate a chaotic signal have been proposed by the authors in [18] with two mixed-mode as combination of autonomous/non autonomous second/third-order chaotic circuits.

III. DUAL-MODE CHAOTIC OSCILLAOR

In this paper, we present a dual-mode chaotic using a chaotic Wien bridge oscillator[20] combined with the new proposed of the Chua's circuit [19] consisting of only two operational amplifiers.

The proposed circuit shown in Fig.1 having the common core of each mode is a Wien bridge oscillator consisted of operational amplifier: U_2 and $R_1, R_2, R_3, R_4, C_2, C_3$. A hysteresis feedback chaotifying Wien bridge consists of operational amplifier: U_3 and R_5, R_6, R_7 . We use U_1 and R_a, R_b, R_c to implement a non-linear negative resistance for Chua's circuit.

The circuit equation of Wein bridge oscillator circuit is

$$\begin{aligned} C_2 \frac{dV_2}{dt} &= \frac{(K_0 - 1)V_2}{R_2} - \frac{V_2}{R_1} - \frac{V_3}{R_2} \\ C_3 \frac{dV_2}{dt} &= \frac{(K_0 - 1)V_2}{R_2} - \frac{V_3}{R_2} \end{aligned} \quad (1)$$

To find condition of the unstable system for $C_1 = C_2$ and

$K_0 = \frac{R_4}{R_3} + 1$, we rearrange (1) to the form

$$\begin{bmatrix} V_2' \\ V_3' \end{bmatrix} = \frac{1}{R_2 C} \begin{bmatrix} K_0 - 2 & -1 \\ K_0 - 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

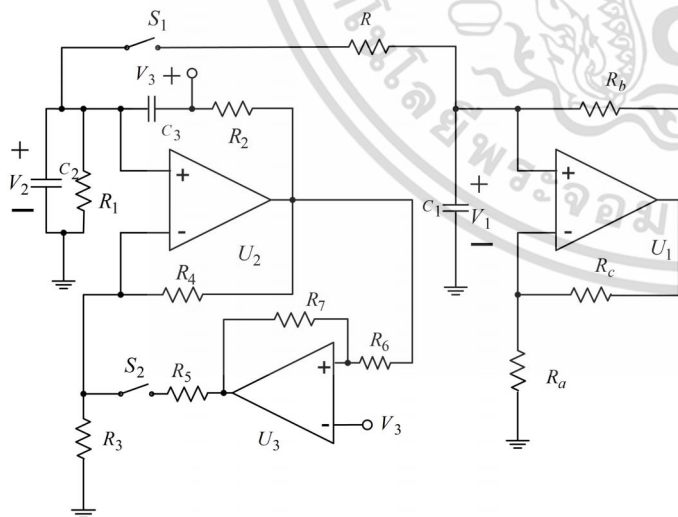


Fig. 1 Dual mode chaotic oscillator

The characteristic equation of the matrix (2) is

$\lambda^2 - (K_0 + 3)\lambda + 1$, the unstable condition is obtained when $K_0 > 3$. Consider when switch S_1 is on and switch S_2 is off. The circuit then exhibits Chua's circuit. The state equation is given by

$$\begin{aligned} C_2 \frac{dV_2}{dt} &= \frac{V_1}{R} + \left\{ \frac{k}{R_2} - \frac{1}{R'} \right\} V_2 - \frac{V_3}{R_2} \\ C_3 \frac{dV_2}{dt} &= \frac{(K_0 - 1)V_2}{R_2} - \frac{V_3}{R_2} \end{aligned} \quad (3)$$

where $R' = \frac{RR_1}{(R + R_1)}$. The characteristics of nonlinear resistance can be expressed as

$$h(v_1) = G_b V_1 + \frac{1}{2} (G_a - G_b) (|v_1 + B_p| - |v_1 - B_p|) \quad (4)$$

where $G_a = -\frac{1}{R_a}$ and $G_b = \frac{1}{R_b}$ are the slopes of the inner and outer regions respectively, and $B_p = \frac{R_a}{R_a + R_b} V_{sat}$ is the break point of the piecewise-linear curve shown in Fig. 2, where V_{sat} is saturation voltage of an operational amplifier.

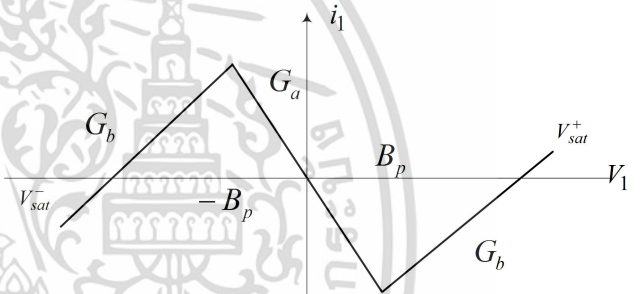


Fig. 2 Characteristics of the nonlinear resistor

When switch S_1 is off and switch S_2 is on, the circuit exhibits the chaotic Wien bridge oscillator. The state equation with hysteresis feedback can be written as

$$\begin{bmatrix} V_2' \\ V_3' \end{bmatrix} = \frac{1}{R_2 C} \begin{bmatrix} K_0 + K_1 - 2 & -1 \\ K_0 + K_1 - 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 + K_2 Hys(v) \end{bmatrix} \quad (6)$$

where $K_1 = \frac{R_4}{R_5} + 1$ is the non-inverting amplifier gain and

$K_2 = -\frac{R_4}{R_5}$ is the inverting amplifier gain of U_2 respectively.

The hysteresis function shown in Fig.3 defined saturation level of op-amp are V_{sat}^{\pm} . Voltage trip valve at low and high are V^+, V^- respectively. From the circuit in Fig.1, voltage trip valve can be explained as

$\left(\frac{R_2 K_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_{sat}^{\pm}$. Define

$p = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$, we now can rewrite voltage trip valve as

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V^\pm = (1 - p - pK_1)V^\pm$. Input voltage of hysteresis circuit is $v = V_3 - p(k_0 + k_1)V_2$. In [19], the condition of chaotic oscillation is set as $p = \frac{1 - K_2}{1 + K_2}$

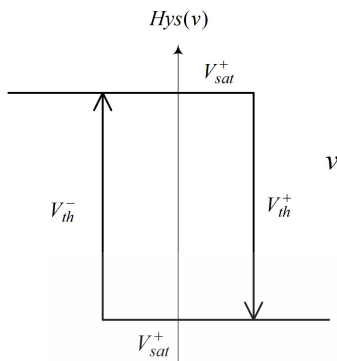


Fig. 3 The hysteresis function

IV. SIMULATION AND EXPERIMENT RESULTS

The construction of the proposed circuit is shown in Fig. 2. All operational amplifiers are LF351. Electronic switches are implemented using CD4066 with supply $\pm 9V$. The values of passive components are $R_1 = R_2 = 200\Omega, R_3 = 3K\Omega, R_4 = 6.8K\Omega, C_2 = C_3 = 0.1\mu F$ and $R_a = R_b = 4K\Omega, R_c = 1.4K\Omega, C_1 = 0.005\mu F$.

In the simulation using Pspice, to exhibit the double-scroll attractor, the waveforms of voltages are shown as following. When switch S_1 is on and switch S_2 is off the circuit is operated in inductorless Chua's circuit mode. The wave forms V_1 and V_2 are shown in Fig.4 and the double-scroll projection of real circuit construction for V_1 and V_2 with $R = 1.6K\Omega$ is shown in Fig.5. When switch S_1 is off and switch S_2 is on, the circuit exhibits in the chaotic Wein bridge circuit mode. The wave forms of V_2 and V_3 are shown in Fig.6 and the double-scroll projection of V_2 and V_3 of the real circuit construction is shown in Fig.7.

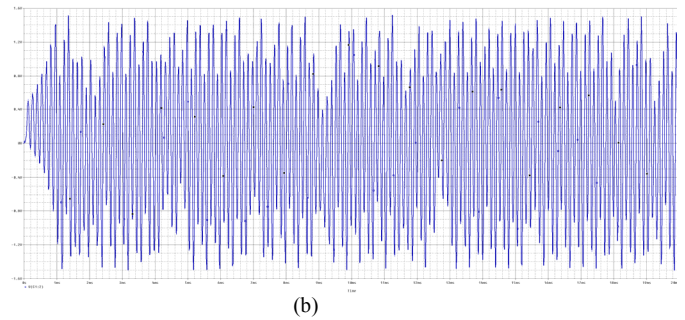
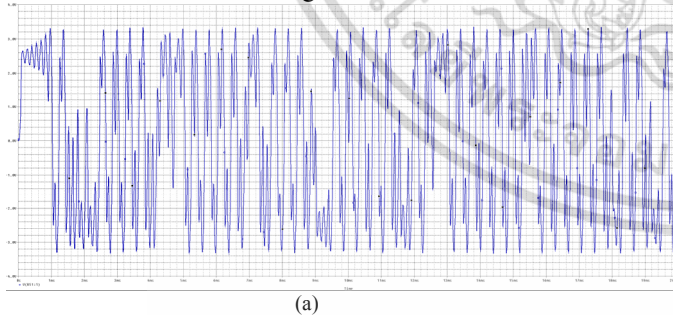


Fig. 4 Simulation results of inductorless Chua's circuit mode. (a) The wave forms of V_1 and (b) The wave forms of V_2

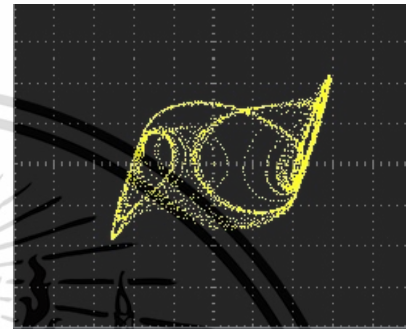


Fig. 5 Experiment result of chaotic attractor of inductorless Chua's circuit mode

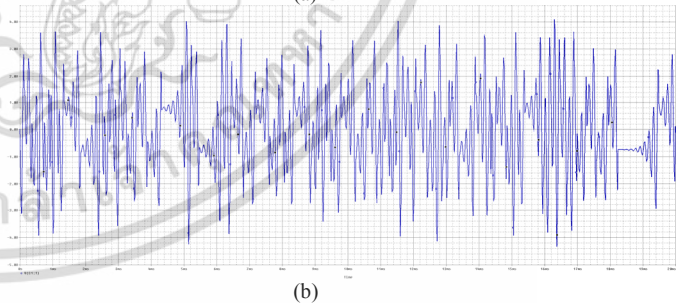
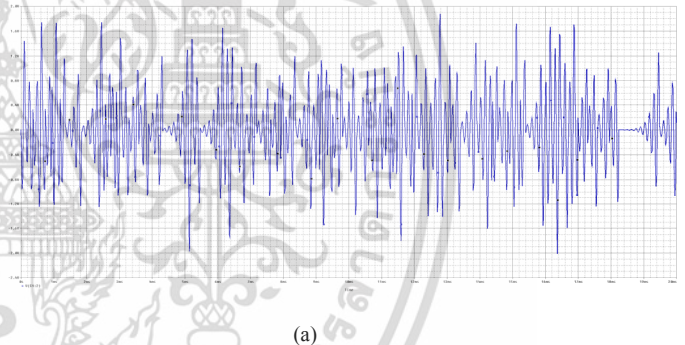


Fig. 6 Simulation results of chaotic Wein bridge circuit mode. (a) The wave forms V_2 and (b) The wave forms V_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

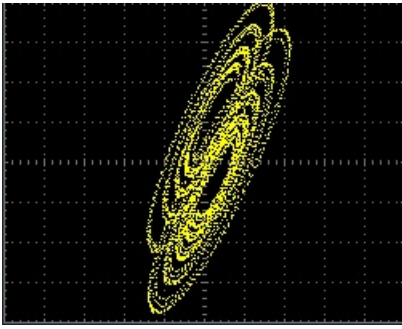


Fig.7 Experiment result Chaotic attractor of chaotic Wein bridge circuit mode

For switching, we apply the controlled pulse 5ms to toggle between each mode. Figure 8 shows the wave form of v_2 in dual-chaotic mode using PSpice simulation.

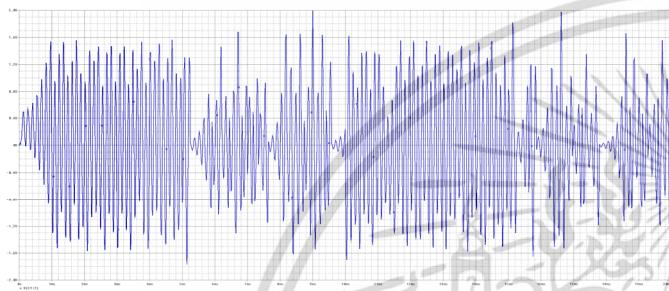


Fig. 8 Simulation result wave form of v_2 in dual mode chaotic oscillator

V. APPLICATION OF THE DUAL MODE CHAOTIC OSCILLAOR

Two examples of potential applications are a simple drawing machine and the tremolo effect are introduced to students. To achieve these objectives, we implement the circuit shown in Fig. 2 to operate at low frequency around 10 Hz. The values of passive components are

$$R_1 = R_2 = 2K\Omega, R_3 = 3K\Omega, R_4 = 6.8K\Omega, C_2 = C_3 = 10\mu F \text{ and}$$

$$R = 14K\Omega, R_a = R_b = 40K\Omega, R_c = 1.4K\Omega, C_1 = 0.47\mu F .$$

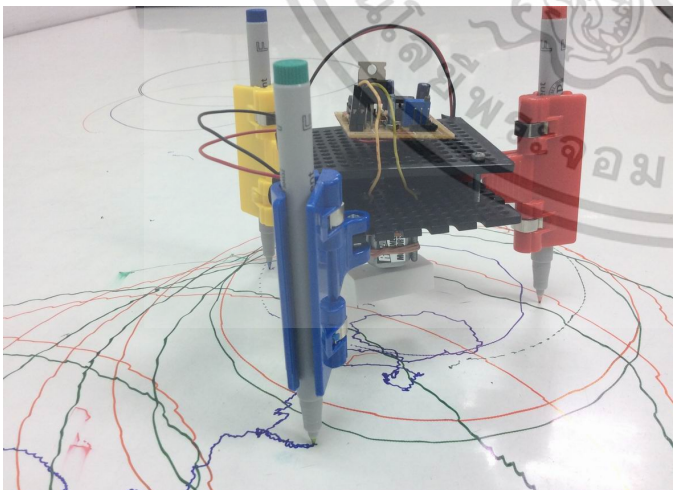


Fig. 9 Drawing robot

1) The Drawing Robot

The idea of this application is to use the output pulse from the hysteresis circuit U_3 of the chaotic Wein bridge mode. The drawing robot shown in Fig. 9 consists of a set of color pens attached to a handle with a motor having a counterbalance. Due to the motor driven by a signal from the chaotic circuit, the drawing line pattern is different from using a normal vibrating motor. This experiment can be done by using single-low frequency chaotic Wien bride oscillator and low frequency Chua's circuit

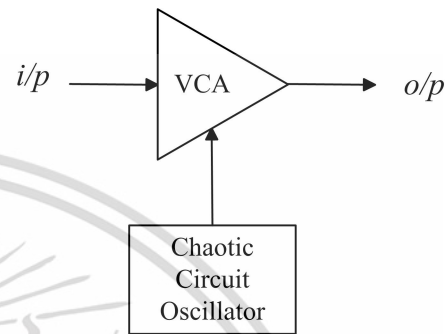


Fig.10 Chaos tremolo effect

2) The Tremolo Effect

The tremolo[21] is a periodic variation of loudness of an instrument. The rate of loudness variation can be set by modulating triangular or square waves with frequency of 1-10 Hz. From the conventional tremolo, in nonlinear electronic experiment, a low frequency voltage v_2 of the dual mode chaotic circuit can be replaced by using a triangle/square wave generator. The block diagram of the experiment with guitar input signals can be shown in Fig.10. The voltage control amplifier can be implemented in laboratory by using operational transconductance amplifiers.

VI. CONCLUSION

In this paper, the dual-mode chaotic oscillator for arts and music has been illustrated. Potential applications for art and music are also provided. The future work will be focused on applications of the proposed oscillator for nonlinear-dynamical electronics courses in engineering.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by The national research council of Thailand for 2017-2018

REFERENCES

- [1] M. P. Kennedy, R. Rovatti and G. Setti, Chaotic Electronics in Telecommunications, FL, Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [2] L. Kocarev and L. Shiguo (Eds.), Chaos-Based Cryptography. Theory, Algorithms and Applications, Springer, 2011.
- [3] W. Perruquetti and J.-P. Barbot, Chaos in automatic control, CRC Press, Taylor & Francis, 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [4] S. Banerjee and G. C. Verghese, *Nonlinear Phenomena in Power Electronics*, NJ, Piscataway:IEEE Press, 2001.
- [5] E. Bilotta and P. Pantano, *A Galery of Chua attractor*, World Scientific Series on Nonlinear Science Series A, vol. 61, 2008.
- [6] G. Mayer-Kress, I. Choi, N. Weber, R. Barger and A. Hubler, "Musical signals from Chua's circuit," *IEEE Trans on Circuits and Systems I* vol.44, no.10,1997.
- [7] D.C. Hamill, "Learning about chaotic circuits with Spice,"*IEEE Trans. on Education*, vol.36, pp.28-35, 1993.
- [8] 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
- [9] T. Matsumoto, "A chaotic attractor from Chua's circuit", *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-31, pp. 1055-1058, 1984.
- [10] L. O. Chua, M. Komuro and T. Matsumoto, "The double scroll family," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-33, pp. 1072-1118, Nov. 1986.
- [11] M. P. Kennedy, "Three steps to chaos part I: Evolution," *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 40, pp. 640-656, Oct. 1993.
- [12] K. Murali, M. Lakshmanan and "L.O. Chua The simplest dissipative non-autonomous chaotic circuit," *IEEE Trans. Circ. Syst. I*, vol.41, no. 6 pp. 462-463, 1994.
- [13] O. Morgul, "Inductorless realization of Chua oscillator", *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 17, pp. 1403-1404, 1995.
- [14] P.A. Cook, "Simple feedback systems with chaotic behavior," *Syst. Contr. Lett.*, vol. 6, pp. 223-227, 1985.
- [15] A. S. Elwakil, K. N. Salama and M. P. Kennedy, "A System for Chaos Generation and Its Implementation in Monolithic Form", *Proc. of IEEE International Symposium on Circuits and Systems* 2000, pp. 217-220, 2000.
- [16] R. Kilic, M. Alci, and M. Tokmakci, "Mixed-mode chaotic circuit." *Electronics Letters*, vol. 36, pp. 103-104, 2000.
- [17] R. Kiliç, "A harmony of linear and nonlinear oscillations Wien bridge-based mixed-mode chaotic circuit," *J. Circuits Syst. Comput.*, 13, pp. 137-149, 2004.
- [18] 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.
- [19] B. C. Bao, N. Wang, M. Chen, Q. Xu and J. Wang, "Inductor-free simplified Chua's circuit only using two-op-amps-based realization," *Nonlin. Dyn.*, vol. 84, no. 2, pp. 511-525, Apr. 2016.
- [20] Q. Li and X.S Yang, "Chaotify Wien-bridge Harmonic Oscillators," *Proc ICCAS Vol.4,Chongqing ,China* pp.2361-2364, 2006
- [21] D.J. Dailey, *Electronics for Guitarists*, Springer, 2011.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล
วัน เดือน ปีเกิด	19 มีนาคม 2529 ที่ชุมพร
ที่อยู่	77/7 ถนนท่าตะเภา ตำบลท่าตะเภา อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร 86000 โทร.081-580-6973
ประวัติการศึกษา	2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) สัญญาณอลวน 2.) ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2553-ปัจจุบัน	ตำแหน่งนักวิชาการคอมพิวเตอร์ งานด้านควบคุมเครื่องและระบบเครือข่าย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้