ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
208859

การสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออโดยใช้กรรมวิธี SUBTRACTIVE SYNTHESIS

ACOUSTICAL SYNTHESIS OF KLUI PIANG AW SOUND USING SUBTRACTIVE SYNTHESIS

นายกรกช แสงรัตนกุล

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2553

c002571164

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
208859

การสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออโดยใช้กรรมวิธี SUBTRACTIVE SYNTHESIS

ACOUSTICAL SYNTHESIS OF KLUI PIANG AW SOUND USING SUBTRACTIVE SYNTHESIS

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

นายกรกช แสงรัตนกุล

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2553

การสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออโดยใช้กรรมวิธี SUBTRACTIVE SYNTHESIS

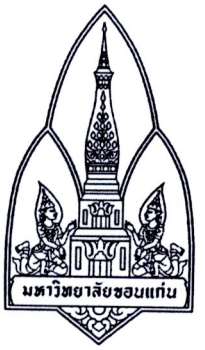
นายกรกช แสงรัตนกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2553

ACOUSTICAL SYNTHESIS OF KLUI PIANG AW SOUND USING SUBTRACTIVE SYNTHESIS

MR. KORAKOCH SAENGRATTANAKUN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN ELELCTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY
2010



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
หลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ชื่อวิทยานิพนธ์: การสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออโดยใช้กรรมวิธี SUBTRACTIVE SYNTHESIS

ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์: นายกรกช แสงรัตนกุล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ดร. จักรี ศรีนนท์ฉัตร	ประธานกรรมการ
ดร. กิตติพงษ์ มีสวาสดิ์	กรรมการ
ดร. อานุภาพ มีสมบูรณ์	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. กิตติพงษ์ มีสวาสดิ์)

.....	.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลำปาง แม่นมาตย์)	(รองศาสตราจารย์ ดร.สมนึก ธีระกุลพิศุทธิ์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

กรกช แสงรัตนกุล. 2553. ***การสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออโดยใช้กรรมวิธี SUBTRACTIVE SYNTHESIS.*** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: ดร.กิตติพงษ์ มีสวาสดิ์

บทคัดย่อ

208859

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอกรรมวิธีการสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออกรรมวิธีหนึ่งเรียกว่า กรรมวิธี Subtractive Synthesis การสังเคราะห์เสียงลักษณะนี้มีความเป็นไปได้สูงที่จะประยุกต์ใช้ในระบบสังเคราะห์เสียงแบบเวลาจริง เพื่อใช้ในวงดนตรีไทยต่อไป

กระบวนการวิจัยประกอบด้วย การบันทึกเสียงขลุ่ยเพียงออต้นฉบับ การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงความถี่ของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออต้นฉบับโดยใช้กรรมวิธีของเวลช์ การสร้างแบบจำลองขอบสัญญาณแบบ ADSR จากสัญญาณเสียงต้นฉบับโดยใช้กรรมวิธีการปรับเส้นโค้งอันดับที่ 1 (1^{st} Order Curve Fitting) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอแนวทางการสังเคราะห์เสียงโดยใช้กรรมวิธี Subtractive Synthesis 2 แนวทางคือ 1) โดยใช้แบบจำลองตัวกำทอนที่ได้จากการประมาณค่าเชิงเส้น และ 2) โดยใช้แบบจำลองตัวกำทอนที่ได้จากการประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย และประเมินคุณภาพของแบบจำลองที่สร้างด้วยการเปรียบเทียบความถี่โดดเด่นของผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองกับความถี่โดดเด่นของสัญญาณเสียงต้นฉบับที่วิเคราะห์ได้และคำนวณค่าผลรวมความผิดพลาดกำลังสอง (Sum Square Error-SSE) มาใช้ประกอบการตัดสินใจเลือกอันดับที่เหมาะสม

แบบจำลองตัวกำทอนที่สร้างขึ้นจากการประมาณค่าเชิงเส้น และผลการประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อยจะอยู่ในรูปตัวกรองสัญญาณที่มีผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด (Infinite Impulse Response-IIR) ซึ่งสามารถแสดงคุณลักษณะของเสียงขลุ่ยเพียงออที่สังเคราะห์ได้ ผลการทดลองระบุว่าแบบจำลองที่สร้างจากการประมาณค่าเชิงเส้นที่เหมาะสมจะอยู่ในรูปตัวกรองที่มีผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัดอันดับที่ 350 ในขณะที่แบบจำลองที่สร้างจากการประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อยจะอยู่ในรูปตัวกรองที่มีผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัดอันดับที่ 48 เท่านั้น ความถี่โดดเด่นที่สังเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่โดดเด่นของสัญญาณต้นฉบับมาก สัญญาณที่ได้จากตัวกรองทั้ง 2 แบบนี้จะถูกนำไปคูณกับแบบจำลองขอบสัญญาณที่สร้างไว้เพื่อสร้างเสียงขลุ่ยเพียงออสังเคราะห์เป็นขั้นตอนสุดท้าย คุณภาพของเสียงสังเคราะห์ที่ได้มีความคล้ายคลึงกับเสียงขลุ่ยเพียงออต้นฉบับเป็นที่น่าพอใจ

Korakoch Saengrattanakun. 2010. ***Acoustical Synthesis of Klui Piang Aw Sound Using Subtractive Synthesis***. Master of Engineering Thesis in Electrical Engineering, Graduate School, Khon Kaen University.

Thesis Advisor: Dr.Kittipong Meesawat

ABSTRACT

208859

This thesis presents a Klui Piang Aw sound synthesis method called "subtractive synthesis". The method has a high possibility to be implemented in a real time digital sound synthesizer.

The research method consists of the following steps. The first step is to record a set of original Klui Piang Aw sounds. A frequency analysis of the original sounds using Welch's method is the second step. The next step is to model a signal envelop by ADSR model using the 1^{st} order curve fitting. The forth step is to model Klui Piang Aw resonator using subtractive synthesis. In this thesis, 2 modeling approaches were investigated namely, a linear predictive coding (LPC) and a subband linear predictive coding (SBLPC). The final step is the quality of the resonator models evaluation by comparisons between the dominant frequencies of the models and the domiant frequencies of the original recorded sounds by means of sum square error (SSE). This also helps us to choose a proper order of the resonator model.

The models were realized in forms of infinite impulse response (IIR) filters. The evaluation results indicated that a proper order of the LPC resonator model is 350, while a proper order of the SBLPC resonator model is only 48. To complete the synthesize process, the output of the resonators were to be multiplied to the ADSR envelop model constructed earlier. The dominant frequencies of the synthesized sounds are closed to that of the original recorded sounds and the qualities of the synthesized sounds were satisfied.

วิทยานิพนธ์นี้ขอมอบส่วนดีแด่บุพการีและคณาจารย์ทุกท่าน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ดร. กิตติพงษ์ มีสวาสดิ์ เป็นอย่างสูง ที่กรุณาชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ และแนวคิดเกี่ยวกับการทำวิจัยที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนแนะนำวิธีแก้ไขปัญหาอย่างมีขั้นตอนและแยบยลจนกระทั่งวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร. จักรี ศรีนนท์ฉัตร และ ดร. อานุภาพ มีสมบูรณ์ ที่ให้ความกรุณาในการตรวจสอบวิทยานิพนธ์และชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ผู้เขียนขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ นายภาคภูมิ โชคชัยรุ่งโรจน์ ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัย ทำให้ย่นระยะเวลาได้เป็นอย่างมาก

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งเป็นผู้ให้ชีวิตและการศึกษาที่ดีแก่ผู้เขียน ให้กำลังใจและส่งเสริมในทุก ๆด้านอย่างเต็มความสามารถ เป็นสิ่งซึ่งผู้เขียนรำลึกและซาบซึ้งเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น ทุกคนที่ได้ช่วยเหลือและให้กำลังใจ ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ ที่ช่วยเป็นแรงผลักดัน และสนับสนุน จนกระทั่งประสบความสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

กรกช แสงรัตนกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
คำอุทิศ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วรรณกรรมปริทัศน์	5
2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย	5
2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการสังเคราะห์เสียงดนตรีไทย	5
2.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการสังเคราะห์เสียงดนตรีด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis	6
2.1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการเข้ารหัสแบนด์ย่อยโดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น	7
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.2.1 การวิเคราะห์สัญญาณด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังด้วยกรรมวิธีของเวลช์	8
2.2.2 การประมาณค่าเชิงเส้น	9
2.2.3 การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย	11
2.2.4 การสังเคราะห์เสียงด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis	12
2.2.5 แบบจำลองขอบของสัญญาณเสียง	14
บทที่ 3 กรรมวิธีการทดลอง	
3.1 การบันทึกเสียงขลุ่ยเพียงออ	16
3.2 การกำจัดสัญญาณรบกวน	17

สารบัญ(ต่อ)

		หน้า
	3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงความถี่ของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออ	18
	3.4 การสร้างแบบจำลองขอบของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออ	19
	3.5 การสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณเชิงเส้น	21
	3.6 การสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย	25
บทที่ 4	ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง	
	4.1 ผลการวิเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออ	34
	4.2 แบบจำลองขอบของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออ	35
	4.3 ผลการประเมินคุณภาพแบบจำลองตัวกำทอนและผลการสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออโดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น	36
	4.4 ผลการประเมินคุณภาพแบบจำลองตัวกำทอนและผลการสังเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออโดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย	42
บทที่ 5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
	5.1 สรุปผลการวิจัย	48
	5.2 ข้อเสนอแนะ	49
บรรณานุกรม		51
ภาคผนวก		
	ภาคผนวก ก สัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออต้นฉบับและการคำนวณสเปกตรัมกำลังโดยกรรมวิธีของเวลช์	54
	ภาคผนวก ข สัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นและการคำนวณสเปกตรัมกำลังโดยกรรมวิธีของเวลช์	59
	ภาคผนวก ค สัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อยและการคำนวณสเปกตรัมกำลังโดยกรรมวิธีของเวลช์	64
การเผยแพร่วิทยานิพนธ์		69
ประวัติผู้เขียน		82

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	ผลการวิเคราะห์ความถี่สัญญาณไซน์บริสุทธิ์	19
ตารางที่ 3.2	ความถี่โดดเด่นของผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์โดยใช้กรรมวิธีการประมาณค่าเชิงเส้น	22
ตารางที่ 3.3	ความถี่โดดเด่นของผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์โดยใช้กรรมวิธีการประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย	28
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงความถี่ของเสียงขลุ่ยเพียงออ	34
ตารางที่ 4.2	เวลาในแต่ละช่วงของแบบจำลองสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออ	35
ตารางที่ 4.3	แอมปลิจูด ณ จุด A และ จุด D	36
ตารางที่ 4.4	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นของเสียงโดต่ำ	37
ตารางที่ 4.5	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นของเสียงเร	37
ตารางที่ 4.6	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นของเสียงมี	38
ตารางที่ 4.7	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นของเสียงฟา	38
ตารางที่ 4.8	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นของเสียงซอล	39
ตารางที่ 4.9	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นของเสียงลา	39
ตารางที่ 4.10	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นของเสียงที	40
ตารางที่ 4.11	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นของเสียงโดสูง	40
ตารางที่ 4.12	ผลการคำนวณค่า SSE ของเสียงโดต่ำถึงโดสูงด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสัมประสิทธิ์การประมาณค่าเชิงเส้น	41
ตารางที่ 4.13	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นแบนด์ย่อยของเสียงโดต่ำ	42
ตารางที่ 4.14	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นแบนด์ย่อยของเสียงเร	43
ตารางที่ 4.15	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นแบนด์ย่อยของเสียงมี	43
ตารางที่ 4.16	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นแบนด์ย่อยของเสียงฟา	44
ตารางที่ 4.17	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นแบนด์ย่อยของเสียงซอล	44
ตารางที่ 4.18	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นแบนด์ย่อยของเสียงลา	45
ตารางที่ 4.19	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นแบนด์ย่อยของเสียงที	45
ตารางที่ 4.20	ผลการจำลองตัวกำทอนโดยใช้การประมาณเชิงเส้นแบนด์ย่อยของเสียงโดสูง	46
ตารางที่ 4.21	ผลการคำนวณค่า SSE ของเสียงโดต่ำถึงโดสูงด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสัมประสิทธิ์การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย	46

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	การจัดแบ่งบล็อกของสัญญาณเพื่อหาค่าเฉลี่ยสเปกตรัมกำลังตามกรรมวิธีของเวลช์	9
ภาพที่ 2.2	กระบวนการการประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย	11
ภาพที่ 2.3	กระบวนการสังเคราะห์เสียงด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis ทั่วไป	12
ภาพที่ 2.4	กระบวนการสังเคราะห์เสียงด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis ที่นำเสนอ	13
ภาพที่ 2.5	แบบจำลองขอบของสัญญาณเสียง	14
ภาพที่ 3.1	ขั้นตอนการบันทึกเสียงขลุ่ยเพียงออ	16
ภาพที่ 3.2	ระดับสัญญาณรบกวนภายในห้องที่ใช้ในการบันทึกเสียง	17
ภาพที่ 3.3	ตัวอย่างสัญญาณเสียงโดต่ำที่มีสัญญาณรบกวน	17
ภาพที่ 3.4	ตัวอย่างชุดสัญญาณเสียงโดต่ำที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนออกเรียบร้อยแล้ว	18
ภาพที่ 3.5	ขอบของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออต้นฉบับ	20
ภาพที่ 3.6	การสร้างแบบจำลองขอบของสัญญาณเสียงขลุ่ยเพียงออ	20
ภาพที่ 3.7	สัญญาณที่ประกอบด้วยสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ 5 ความถี่รวมกัน	21
ภาพที่ 3.8	ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์โดยใช้กรรมวิธีการประมาณค่าเชิงเส้นที่อันดับ 300	22
ภาพที่ 3.9	ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองตัวกำทอนสำหรับขลุ่ยเพียงออเสียงโดต่ำที่อันดับ 350	23
ภาพที่ 3.10	สัญญาณ Pulse Train ที่มีความถี่เท่ากับเสียงโดต่ำ	23
ภาพที่ 3.11	สัญญาณ Pulse Train ที่ผ่านตัวกรองสัญญาณที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำทอน	24
ภาพที่ 3.12	ขอบของสัญญาณเสียงโดต่ำ	24
ภาพที่ 3.13	เสียงโดต่ำสังเคราะห์ที่สมบูรณ์แล้ว	25
ภาพที่ 3.14	สัญญาณไซน์บริสุทธิ์ในแบนด์ความถี่ต่ำ	26
ภาพที่ 3.15	สัญญาณไซน์บริสุทธิ์ในแบนด์ความถี่สูง	26
ภาพที่ 3.16	ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์แบนด์ความถี่ต่ำ	27
ภาพที่ 3.17	ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองสัญญาณไซน์บริสุทธิ์แบนด์ความถี่สูง	27
ภาพที่ 3.18	ตัวอย่างสัญญาณเสียงโดต่ำแบนด์ความถี่ต่ำ	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3.19 ตัวอย่างสัญญาณเสียงโดต่ำแบนด์ความถี่สูง 29

ภาพที่ 3.20 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองตัวกำทอนแบนด์ความถี่ต่ำของเสียงโดต่ำที่อันดับ 48 30

ภาพที่ 3.21 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของแบบจำลองตัวกำทอนแบนด์ความถี่สูงของเสียงโดต่ำที่อันดับ 48 30

ภาพที่ 3.22 เสียงโดต่ำสังเคราะห์ในแบนด์ความถี่ต่ำ 31

ภาพที่ 3.23 เสียงโดต่ำสังเคราะห์ในแบนด์ความถี่สูง 31

ภาพที่ 3.24 เสียงโดต่ำสังเคราะห์ 32

ภาพที่ 3.25 เสียงโดต่ำสังเคราะห์ที่สมบูรณ์แล้ว 32

ภาพที่ 4.1 แบบจำลองขอบของสัญญาณเสียง 35

ภาพที่ 5.1 การเชื่อมต่อระหว่างเครื่องสังเคราะห์เสียงกับคีย์บอร์ดโดยผ่านเทคโนโลยี MIDI 50

ภาพที่ ก.1 สัญญาณเสียงโดต่ำต้นฉบับ และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 55

ภาพที่ ก.2 สัญญาณเสียงเรต้นฉบับ และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 55

ภาพที่ ก.3 สัญญาณเสียงมีต้นฉบับ และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 56

ภาพที่ ก.4 สัญญาณเสียงฟาต้นฉบับ และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 56

ภาพที่ ก.5 สัญญาณเสียงซอลต้นฉบับ และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 57

ภาพที่ ก.6 สัญญาณเสียงลาต้นฉบับ และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 57

ภาพที่ ก.7 สัญญาณเสียงทีต้นฉบับ และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 58

ภาพที่ ก.8 สัญญาณเสียงโดสูงต้นฉบับ และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 58

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ข.1 สัญญาณเสียงโดต่ำสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 60

ภาพที่ ข.2 สัญญาณเสียงเรสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 60

ภาพที่ ข.3 สัญญาณเสียงมีสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 61

ภาพที่ ข.4 สัญญาณเสียงฟาสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 61

ภาพที่ ข.5 สัญญาณเสียงซอลสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 62

ภาพที่ ข.6 สัญญาณเสียงลาสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 62

ภาพที่ ข.7 สัญญาณเสียงทีสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 63

ภาพที่ ข.8 สัญญาณเสียงโดสูงสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 63

ภาพที่ ค.1 สัญญาณเสียงโดต่ำสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 65

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ ค.2 สัญญาณเสียงเรสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 65

ภาพที่ ค.3 สัญญาณเสียงมีสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 66

ภาพที่ ค.4 สัญญาณเสียงฟาสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 66

ภาพที่ ค.5 สัญญาณเสียงซอลสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 67

ภาพที่ ค.6 สัญญาณเสียงลาสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 67

ภาพที่ ค.7 สัญญาณเสียงทีสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 68

ภาพที่ ค.8 สัญญาณเสียงโดสูงสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธี Subtractive Synthesis โดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้นแบนด์ย่อย และสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง 68