อ่านคำไทยพยางค์เดี่ยวแบบปรับความเร็วได้

นายวิเชียร แซ่โล้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ.2539

ISBN 974-634-118-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16795465

A Variable Speed Thai Monosyllablic Word Text-to-speech Reader

Mr. Vichean Low

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1996

ISBN 974-634-118-9

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

วิเชียร แซ่โล้ว : เครื่องอ่านคำไทยพยางค์เดี่ยวแบบปรับความเร็วได้ (A VARIABLE SPEED THAI MONOSYLLABIC WORD TEXT-TO-SPEECH READER) อ.ที่ปรึกษา รศ.ดร.เอกชัย ลีลารัศมี, 90 หน้า. ISBN 974-634-118-9

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการพัฒนาเครื่องอ่านคำไทยที่สามารถอ่านสตริงของพยางค์ไทยคำเดี่ยวที่แยกระหว่างพยางค์ด้วยช่องว่างให้เป็นเสียง ความเร็วในการอ่านสามารถปรับได้ 4 ระดับ โดยไม่ทำให้ความถี่ของพิตช์และคุณลักษณะทางเสียงเปลี่ยนไป ช่วงเงียบระหว่างพยางค์ที่ต่อเนื่องสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการแทรกคำสั่งพิเศษลงในสตริง เครื่องอ่านนี้มีทางเข้าออกแบบอนุกรมที่ทำงานแบบโมเดมหลอกสำหรับการรับสตริงข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกใด ๆ เช่นเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

ฮาร์ดแวร์หลักของเครื่องอ่านนี้ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิตที่มีหน่วยความจำแรมขนาด 32 กิโลไบต์และหน่วยความจำรอมขนาด 64 กิโลไบต์ ส่วนจัดการหน่วยความจำเสียงขนาด 3 เมกะไบต์ ตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อกขนาด 8 บิต และลำโพง ส่วนจัดการหน่วยความจำเสียงจะเก็บคลื่นเสียงของหน่วยคู่เสียงทั้งหมดที่อัตราการสุ่มข้อมูล 16 กิโลเฮิรตซ์ ขนาดความละเอียดของข้อมูล 8 บิต และการบีบอัดสัญญาณได้ใช้เทคนิคเอดีพีซีเอ็มแบบไม่สูญเสียข้อมูล กลไกการอ่านออกเสียงของแต่ละพยางค์ถูกกระทำโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะอ่านคลื่นเสียงของหน่วยคู่เสียงจากส่วนจัดการหน่วยความจำเสียงมาต่อกัน และส่งคลื่นเสียงที่ต่อกันนี้ไปยังลำโพงผ่านทางตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก

ซอฟต์แวร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกแบ่งออกเป็นส่วนงานย่อยๆสำหรับทำงานที่สำคัญดังนี้ คือ 1) วิเคราะห์พยางค์ไทยคำเดี่ยวแต่ละพยางค์ออกเป็น 4 ส่วนคือ พยัญชนะต้น สระ วรรณยุกต์ และตัวสะกด โดยใช้กฎเกณฑ์ที่คิดค้นขึ้น 2) การใช้รูปสัทอักษรสากลแทนเสียงของพยางค์ที่วิเคราะห์ 3) การพิจารณาหาหน่วยคู่เสียงที่สามารถนำมาต่อกันเป็นเสียงของพยางค์ไทยที่กำหนด ทั้งนี้โดยอิงผลงานวิจัยของหน่วยปฏิบัติการวิจัยทางภาษาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 4) การคลายสัญญาณเสียงจากส่วนจัดการหน่วยความจำเสียง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C715972 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: SYNTHESIZER / SPEECH COMPRESSION / THAI MONOSYLLABLE / TEXT-TO-SPEECH

VICHEAN LOW : A VARIABLE SPEED THAI MONOSYLLABIC WORD TEXT-TO-SPEECH READER. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. EKACHAI LEELARASMEE, Ph.D.

90 pp. ISBN 974-634-118-9

This thesis describes the development of a Thai text-to-speech reader capable of voice reading of any string of Thai monosyllabic words separated by blanks. The reading speed can be adjusted in 4 steps without changing the pitch frequency and the voice quality. The silence duration between syllables can also be varied by inserting special command codes in the string. This reader provides a serial port which behaves as a null modem for receiving input strings from any external device such as a personal computer.

The hardware of this text-to-speech reader consists mainly of an 8-bit microcontroller with a 32-Kbyte RAM and a 64-Kbyte ROM, a 3 Mbyte sound ROM, an 8-bit digital-to-analog converter(DAC), and a speaker. The sound ROM stores the digitized waveforms of all diphones that were sampled at 16 kHz with 8 bit resolution and compressed using the lossless adaptive differential pulse code modulation (LADPCM) technique. The voice reading mechanism of each syllable is done by the microcontroller, which reads the waveforms of the predetermined diphones from the sound ROM, concatenates them and sends the concatenated waveforms to the speaker through the DAC converter.

The software of the microcontroller is divided into several modules for performing different tasks. The major tasks are 1) analysis of each Thai monosyllable word into 4 parts, i.e., initial consonant, vowel, tone and final consonant using a novel rule-based technique. 2) formation of international phonetic alphabets representing the voice of the analysis word. 3) determination of the diphones that can be concatenated to produce the voice of a given Thai syllable, based upon the research work of the Linguistics Research Unit, Chulalongkorn University. 4) decompression of voice data from the sound ROM.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่อนิสิต**
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**
ปีการศึกษา 2538	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.เอกชัย ลีลารัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆและเครื่องมือเครื่องใช้ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ ผศ.ดร.สุดาพร สักษณียนาวิน ซึ่งท่านได้ให้ความรู้ความเข้าใจตลอดจนคำแนะนำในเรื่องของการสังเคราะห์เสียง ขอขอบคุณอาจารย์สุรีย์ พุ่มรินทร์ และอาจารย์วันเฉลิม โปรา ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้ส่วนหนึ่งได้รับมาจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบเชิงเลข (DSRL) ซึ่งเป็นสถานที่ทำการวิจัยตลอด 2 ปีการศึกษา ขอขอบคุณพี่สายัณห์ ธีรปัญญาวัฒน์ และพี่ชาญณรงค์ อ่างทอง ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ทางฮาร์ดแวร์ ขอขอบคุณคุณเอ,คุณดิด,คุณมั้งเพื่อนร่วมรุ่นที่มีส่วนช่วยเหลือในการให้คำแนะนำและกำลังใจ ขอขอบคุณน้องทีรุดที่อยู่ช่วยกันลากลายวงจรและความเห็นในการจัดพิมพ์เอกสารชุดนี้ และน้องกฤษที่ช่วยสร้างความบันเทิงให้เกิดขึ้นในห้องแลป ขอขอบคุณคุณนพพร มากทรัพย์ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจสำคัญแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งให้การสนับสนุนและให้โอกาสทางการศึกษาแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

วิเชียร แซ่โล้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ด

สารบัญภาพ ..... ต

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 แนวเหตุผล 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 3

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ 3

2. ทฤษฎี 4

2.1 การสังเคราะห์เสียง 4

2.2 การสังเคราะห์เสียงด้วยการต่อคลื่นเสียงจริง 5

2.2.1 การสังเคราะห์เสียงพูดแบบพยางค์ 5

2.2.2 การสังเคราะห์เสียงพูดโดยใช้อัฒพยางค์ 5

2.2.3 การสังเคราะห์เสียงพูดโดยใช้หน่วยคู่เสียง 6

2.3 การปรับความเร็วในการพูด 8

2.4 การผันเสียงวรรณยุกต์ในพยางค์ไทยคำเดี่ยว 9

2.4.1 คำเป็น-คำตาย 9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2 ไตรยางค์ 9

2.5 การบีบอัดข้อมูล 10

2.5.1 หลักเกณฑ์ทั่วไปในการบีบอัดข้อมูล 11

2.5.2 วิธีการบีบอัดสัญญาณแบบแอลเอดีพีซีเอ็ม 11

2.5.2.1 ส่วนของการหาผลต่างของสัญญาณ และขนาดของผลต่างที่ต้องใช้ที่น้อยที่สุด 14

2.5.2.2 ส่วนของการรวบรวมขนาดของผลต่างที่เท่ากัน และอยู่ติดกันเข้าไว้เป็นกลุ่มเดียวกัน 14

2.5.2.3 ส่วนของการปรับปรุงกลุ่มให้เหมาะสม และการเข้ารหัส 14

2.5.2.3.1 หลักของการปรับปรุงกลุ่ม 15

2.5.2.3.2 การเข้ารหัส 17

3. โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของเครื่องอ่านคำไทยพยางค์เดี่ยวแบบปรับความเร็วได้ 19

3.1 สถาปัตยกรรมของเครื่อง 19

3.2 หน่วยประมวลผลกลาง 22

3.3 การสร้างความสัมพันธ์ของอุปกรณ์กับหน่วยความจำ 25

3.4 ส่วนจัดการหน่วยเสียง 26

3.4.1 ส่วนควบคุมตำแหน่งที่อยู่ของหน่วยเสียง 27

3.4.2 ส่วนที่เก็บหน่วยความจำเสียง 29

3.4.2.1 ส่วนของการถอดรหัสตำแหน่งที่อยู่เพื่อเลือกหน้าของหน่วยความจำ 30

3.4.2.2 ส่วนของธนาคารหน่วยความจำรอม 31

3.4.3 ส่วนถอดรหัสตำแหน่งที่อยู่และการควบคุม 32

3.4.4 โครงสร้างข้อมูลภายในของส่วนที่เก็บหน่วยความจำเสียง 33

3.5 ส่วนของการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อกและการขยายเสียง 35

3.5.1 ส่วนของการถอดรหัสตำแหน่งที่อยู่ 36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.2 ส่วนของการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก
และการขยายเสียง 37
4. การพัฒนาซอฟต์แวร์ของเครื่องอ่านคำไทยพยางค์เดี่ยวแบบปรับความเร็วได้ 40
4.1 บทนำ 40
4.2 ส่วนงานย่อยสำหรับการติดต่อรับสตริงของพยางค์จากพีซี 42
4.2.1 ลักษณะสตริงของพยางค์ 42
4.3 ส่วนงานย่อยการแก้ไขพยางค์ที่กำกวมด้วยพจนานุกรม 44
4.4 ส่วนงานย่อยการแปลงสตริงของพยางค์ให้เป็นสตริงของสัทอักษร 48
4.4.1 ส่วนงานย่อยการแยกหน่วยพยางค์ไทยคำเดี่ยว
ออกเป็นหน่วยย่อยต่างๆตามหลักไวยากรณ์ในภาษาไทย 48
4.4.1.1 ขั้นตอนวิธีการแยกหน่วยพยางค์ที่เป็นพยางค์ไทย
คำเดี่ยวออกเป็นหน่วยต่างๆ 49
4.4.1.1.1 ส่วนงานย่อยของพยัญชนะ 53
4.4.1.1.2 ส่วนงานย่อยของพยัญชนะ 'อ' 53
4.4.1.1.3 ส่วนงานย่อยของพยัญชนะ 'ย' 54
4.4.1.1.4 ส่วนงานย่อยของพยัญชนะ 'ว' 55
4.4.1.1.5 ส่วนงานย่อยของพยัญชนะ 'ร' 55
4.4.1.1.6 ส่วนงานย่อยของสระนำ 56
4.4.1.1.7 ส่วนงานย่อยของสระตาม 57
4.4.1.1.8 ส่วนงานย่อยของวรรณยุกต์ 57
4.4.1.1.9 ส่วนงานย่อยของการันต์ 57
4.4.1.1.10 อักษร '.' 58
4.4.1.1.11 ส่วนงานย่อยการตรวจสอบลำดับของสระ
และวรรณยุกต์ 58
4.4.1.2 ส่วนงานย่อยตรวจสอบและแก้ไข 59
4.4.2 ส่วนการหาสัทอักษรจากหน่วยต่างๆที่ได้จากการแยกหน่วยพยางค์ไทย 60

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 ส่วนงานย่อยของการแปลงสตริงของสัทอักษรสากลไปเป็นชุดของรหัสหน่วยคู่เสียง 69
4.5.1 ส่วนงานย่อยการแยกสัทอักษรสากลออกเป็นชื่อของหน่วยเสียงไดโฟน 69
4.5.2 ส่วนงานย่อยการหาลำดับที่ของหน่วยคู่เสียงต่างๆ 73
4.6 ส่วนงานย่อยของการออกเสียง 75
4.6.1 ส่วนของการควบคุมการออกเสียง 75
4.6.2 ส่วนของการคลายสัญญาณเสียงและการออกเสียง 77
5. การทดสอบและสรุปผล 80
5.1 การติดตั้งเพื่อทดสอบ 80
5.2 ผลที่ได้จากการบีบอัดสัญญาณเสียง 81
5.3 ผลการนำไปใช้งานจริงร่วมกับโปรแกรมประยุกต์ต่างๆ 82
5.4 ปัญหาที่พบในระหย่างการพัฒนา 82
5.5 สรุป 83
5.6 ข้อเสนอแนะ 84
รายการอ้างอิง 85
ภาคผนวก แสดงผังวงจรของเครื่องอ่านคำไทยพยางค์เดี่ยวแบบปรับความเร็วได้ 87
ประวัติผู้เขียน 90

สารบัญตาราง

			หน้า
ตารางที่	2.1	แสดงตัวอย่างหน่วยเสียงของการสังเคราะห์เสียงพูดอัฒพยางค์	5
ตารางที่	2.2	ตัวอย่างการแยกหน่วยคู่เสียงของพยางค์ต่างๆ ในรูปแบบของสัทอักษรที่ดัดแปลงมาจากสัทอักษรสากล	7
ตารางที่	2.3	แสดงการผันเสียงวรรณยุกต์ของอักษรกลาง	9
ตารางที่	2.4	แสดงการผันเสียงวรรณยุกต์ของอักษรต่ำคู่กับอักษรสูง	10
ตารางที่	2.5	แสดงการผันเสียงวรรณยุกต์ของอักษรต่ำเดี่ยวกับอักษรนำ	10
ตารางที่	2.6	แสดงคำสั่งการเปลี่ยนขนาดของผลต่าง	13
ตารางที่	3.1	แสดงกลุ่มคำสั่งต่างๆของ DS80C320 ที่มีความเร็วเพิ่มขึ้น	24
ตารางที่	3.2	แสดงความสัมพันธ์ของอุปกรณ์กับหน่วยความจำ	26
ตารางที่	3.3	แสดงความสัมพันธ์ของส่วนจัดการหน่วยเสียงกับหน่วยความจำ	26
ตารางที่	3.4	แสดงการสั่งการทำงานของส่วนควบคุมตำแหน่งที่อยู่ของหน่วยเสียง	27
ตารางที่	4.1	แสดงข้อมูลในตารางตรวจลำดับของสระและวรรณยุกต์	58
ตารางที่	4.2	แสดงสัทอักษรของพยัญชนะต้นต่างๆ	60
ตารางที่	4.3	แสดงสัทอักษรของตัวสะกดต่างๆ	61
ตารางที่	4.4	แสดงสัทอักษรของสระต่างๆ	61
ตารางที่	4.5	แสดงค่าคุณสมบัติของสระต่างๆ	64
ตารางที่	4.6	แสดงการหาคำเป็นคำตายเพื่อเป็นตัวชี้ในโปรแกรม	65
ตารางที่	4.7	แสดงสัทอักษรของหน่วยคู่เสียงต้นที่สัมพันธ์กันกับสัทอักษรของสระต่างๆ	70
ตารางที่	4.8	แสดงการแบ่งกลุ่มของสัทอักษรของสระที่สัมพันธ์กันกับสัทอักษรของหน่วยคู่เสียงต้น	70
ตารางที่	5.1	แสดงการเปรียบเทียบค่าทางสถิติระหว่างการบีบอัดสัญญาณทั้งสองวิธี	81

สารบัญภาพ

			หน้า
รูปที่	2.1	แสดงการแบ่งพยางค์ออกเป็นสองส่วนตามวิธีการของอัฒพยางค์	6
รูปที่	2.2	ตัวอย่างรูปคลื่นของหน่วยคู่เสียงที่ประกอบกันขึ้นเป็นพยางค์ 'การ'	7
รูปที่	2.3	การปรับความเร็วของการออกเสียงจากรูป(ก)ให้เร็วขึ้น ในรูป(ข)โดยการตัดพิตช์ที่ 2 ออก	8
รูปที่	2.4	แสดงการการหาผลต่างระหว่างสัญญาณเสียง เพื่อประหยัดจำนวนบิตที่ต้องใช้เก็บ	12
รูปที่	2.5	แสดงตัวอย่างการใช้คำสั่งเปลี่ยนขนาดของผลต่าง	13
รูปที่	2.6	แสดงการบีบอัดสัญญาณแบบเอดีพีซีเอ็ม	14
รูปที่	2.7	แสดงการยุบกลุ่มของขั้นขนาดของผลต่างเพื่อให้ผลการบีบอัดสัญญาณที่ดี โดยที่ระดับความสูงของแต่ละกลุ่มหมายถึงขนาดของผลต่าง และความกว้างของแต่ละกลุ่มคือจำนวนข้อมูลในกลุ่ม	15
รูปที่	2.8	แสดงการหาเสถียรภาพของกลุ่มโดยการหาจำนวนบิตที่ต้องใช้ตามกรณีต่างๆ จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่รวมกลุ่มทางขวามือ(ค) จะทำให้ประหยัดจำนวนบิตที่ต้องใช้มากที่สุด แสดงว่ากลุ่มที่กำลังพิจารณาอยู่นั้นไม่เสถียรภาพ ดังนั้นให้ทำการเพิ่มขนาดของผลต่างให้กับกลุ่มที่กำลังพิจารณานี้ 1 บิต ทำให้มีขนาดของผลต่างเป็น 3 บิต	17
รูปที่	2.9	แสดงผลที่ได้จากการเข้ารหัส	18
รูปที่	3.1	แสดงสถาปัตยกรรมของเครื่องอ่านคำไทยพยางค์เดี่ยว แบบปรับความเร็วได้	20
รูปที่	3.2	แสดงขาสัญญาณต่างๆของหน่วยประมวลผลกลาง 8051	23
รูปที่	3.3	แสดงโครงสร้างภายในของส่วนจัดการหน่วยความจำเสียง	27
รูปที่	3.4	แสดงโครงสร้างภายในของส่วนควบคุมตำแหน่งที่อยู่ของหน่วยเสียง	28
รูปที่	3.5	แสดงการแบ่งหน้าหน่วยความจำ	29
รูปที่	3.6	แสดงโครงสร้างภายในของส่วนที่เก็บหน่วยเสียง	30
รูปที่	3.7	แสดงการต่อวงจรของตัวถอดรหัสเพื่อเลือกหน้าหน่วยความจำที่เก็บเสียง	31
รูปที่	3.8	แสดงการเชื่อมต่อของหน่วยความจำที่เก็บเสียงจำนวน 16 ตัว	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

			หน้า
รูปที่	3.9	แสดงการการเตรียมหน่วยคู่เสียงบันทึกลงในส่วนที่เก็บหน่วยเสียง	34
รูปที่	3.10	แสดงวิธีการหาตำแหน่งที่อยู่เริ่มต้นของหน่วยเสียงที่อยู่ในส่วนที่เก็บหน่วยเสียง	34
รูปที่	3.11	แสดงวิธีการหาตำแหน่งที่อยู่เริ่มต้นที่เก็บตำแหน่งที่อยู่ของลูกคลื่นของหน่วยเสียงต่างๆ	35
รูปที่	3.12	แสดงส่วนประกอบโดยรวมของส่วนการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก	36
รูปที่	3.13	แสดงวงจรภายในของส่วนการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก	38
รูปที่	3.14	แสดงการใช้ PAL16L8 ในการถอดรหัสตำแหน่งที่อยู่และสัญญาณควบคุมทั้งหมด	39
รูปที่	4.1	แสดงลำดับการทำงานของโปรแกรมและตำแหน่งที่อยู่ของข้อมูลในหน่วยความจำแรมของเครื่องอ่านคำไทยพยางค์เดี่ยวแบบปรับความเร็วได้	41
รูปที่	4.2	แสดงผังการทำงานของส่วนงานย่อยสำหรับรับสตริงของพยางค์จากพีซี	43
รูปที่	4.3	แสดงโครงสร้างของพจนานุกรม	44
รูปที่	4.4	แสดงลำดับการทำงานของส่วนงานย่อยย่อยการเปรียบเทียบพยางค์กับพจนานุกรม	47
รูปที่	4.5	แสดงลำดับการทำงานของส่วนงานย่อยการแก้ไขพยางค์ที่กำกวมด้วยพจนานุกรม	48
รูปที่	4.6	แสดงลำดับการแปลงสตริงของพยางค์ให้เป็นสตริงของสัทอักษร	50
รูปที่	4.7	แสดงขั้นตอนวิธีที่ใช้แยกหน่วยต่างๆของพยางค์ที่เป็นคำไทยพยางค์เดี่ยว	52
รูปที่	4.8	แสดงตัวอย่างของสตริงข้อมูลเข้าที่จะนำมาแปลงเป็นหน่วยคู่เสียง	69
รูปที่	4.9	แสดงการขั้นตอนวิธีในการแยกสัทอักษรออกเป็นหน่วยคู่เสียง	71
รูปที่	4.10	แสดงการทำงานของส่วนงานย่อยการหาลำดับของเสียงของหน่วยคู่เสียง	72
รูปที่	4.11	แสดงโครงสร้างของรหัสหน่วยคู่เสียง 1 ชุด	73
รูปที่	4.12	แสดงการหาลำดับของหน่วยเสียงจากหน่วยคู่เสียง	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างข้อมูลของตารางที่เก็บตำแหน่งที่อยู่ของแต่ละลูกคลื่น ในหนึ่งหน่วยคู่เสียง 75

รูปที่ 4.14 แสดงการเข้าถึงตำแหน่งที่อยู่ของหน่วยคู่เสียง aan0 ตามลูกคลื่นต่างๆ 76

รูปที่ 4.15 แสดงเสตตการคลายสัญญาณเสียงแบบแอลเอดีพีซีเอ็ม 78

รูปที่ 4.16 แสดงกรณีของการคลายสัญญาณที่ต้องใช้เวลามากที่สุด 79

รูปที่ 5.1 แสดงเครื่องต้นแบบอ่านคำไทยพยางค์เดี่ยวแบบปรับความเร็วได้ 80