อัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์แบบอัตโนมัติ

นางสาว เหมวรรณ ศิวรักษ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ISBN 974-14-2758-1
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AUTOMATIC VECTOR QUANTIZATION ALGORITHM

Miss Haemwaan Sivaraks

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Computer Science
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2006
ISBN 974-14-2758-1
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์แบบอัตโนมัติ
โดย	นางสาว เหมวรรณ ศิวรักษ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.อรรถสิทธิ์ สุรฤกษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประภาส จงสถิตย์วัฒนา ..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.อรรถสิทธิ์ สุรฤกษ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.พิษณุ คนองชัยยศ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อานนท์ รุ่งสว่าง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เหมวรรณ ศิวรักษ์ : อัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์แบบอัตโนมัติ
(AUTOMATIC VECTOR QUANTIZATION ALGORITHM)
อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร.อรรถสิทธิ์ สุรฤกษ์, 55 หน้า ISBN 974-14-2758-1

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งนับเวกเตอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันมุ่งเน้นที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึม โดยการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เช่น การระบุขนาดหนังสือรหัส หรือค่าบิดเบือน การระบุค่าของพารามิเตอร์ทั้งสองเป็นเรื่องยากสำหรับผู้ใช้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนออัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์แบบอัตโนมัติ (เอวีคิว) ที่มีแนวคิดจากการจัดการบริเวณแบ่งกั้นโวโรนอยร่วมกับการพิจารณาอัตราการลดลงของค่าบิดเบือน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าค่าบิดเบือนเฉลี่ยที่ได้จากอัลกอริทึมที่นำเสนอต่ำกว่าอัลกอริทึมแอลบีจี และ อัลกอริทึมปรับเพิ่มเดิมแอลบีจีด้วยความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์โดยพิจารณาจากข้อมูลรูปภาพและข้อมูลเสียง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต เหมวรรณ ศิวรักษ์
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2549

4870542121 : MAJOR COMPUTER SCIENCE

KEY WORD : VECTOR QUANTIZATION / AUTOMATIC QUANTIZATION / CODEBOOK / CODEWORD

HAEMWAAN SIVARAKS : AUTOMATIC VECTOR QUANTIZATION ALGORITHM. THESIS ADVISOR : ATHASIT SURARERKS, Ph.D., 55 pp.

ISBN 974-14-2758-1

Recently researches in vector quantization domain concentrate on improving the performance of parametric algorithms (i.e., need to specify either the codebook size or the expected distortion.) The specification of the both parameters gives the users some difficulties. This research proposes an automatic vector quantization (AVQ) algorithm. The concept is to manage Voronoi regions with respect to the distortion decreasing rate. Experimental results show that the average distortions are statistically decreased comparing with LBG and adaptive incremental LBG algorithms at the 99% of confidence level. Both speech and image data are also included in our consideration.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Computer Engineering Student's signature .....

Field of study Computer Science Advisor's signature .....

Academic year 2006

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ และความช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก อ.ดร.อรรถสิทธิ์ สุรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งให้ข้อคิด แนวทาง และคำปรึกษา ตลอดจนเป็นผู้ตรวจทานแก้ไข ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา อ.ดร.พิษณุ คนองชัยยศ และ ผศ.ดร.อานนท์ รุ่งสว่าง ประธานกรรมการและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้อันมีค่ายิ่งแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ดนยพฤทธ์ ไกรฤทธิ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในด้านภาษา ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่คอยห่วงใย และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจนผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ที่สำคัญที่สุดขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เป็นแรงผลักดัน เป็นกำลังใจ และเป็นกำลังทรัพย์ที่สำคัญให้ตลอดการศึกษาครั้งนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย 3
1.6 ผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์ 4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5
2.1.1 การแบ่งนับเวกเตอร์ 5
2.1.2 การวัดระยะห่าง 6
2.1.3 การวัดค่าบิดเบือน 6
2.1.4 เงื่อนไขลำดับที่ใกล้ที่สุด 6
2.1.5 การวัดเซนทรอยด์ 7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7
2.2.1 อัลกอริทึมแอลบีจี 7
2.2.2 อัลกอริทึมอีแอลบีจีแบบเพิ่มสถานะ 9
2.2.3 อัลกอริทึมแฟกส์ 11
2.2.4 อัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี 12
3 อัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์แบบอัตโนมัติ 15
3.1 การเพิ่มขนาดหนังสือรหัส 15
3.1.1 แบ่งจาก 1 เป็น 2 16
3.1.2 แบ่งจาก 2 เป็น 3 17
3.2 การปรับหนังสือรหัส 18

3.2.1 การหดและขยายบริเวณแบ่งกั้น....18
3.2.2 การปรับหนังสือรหัสเข้าสู่เซนทรอยด์....19
3.3 การพิจารณาเงื่อนไขในอัลกอริทึม....20
3.3.1 การพิจารณาเปลี่ยนคำรหัสสูงสุดที่ใช้ในการหดและขยายบริเวณแบ่งกั้น....20
3.3.2 การพิจารณาเพิ่มขนาดหนังสือรหัส....20
3.3.3 การพิจารณาการสิ้นสุดอัลกอริทึม....20
4 การเปรียบเทียบผลการทดลอง....25
4.1 การเปรียบเทียบค่าบิดเบือน....29
4.2 การเปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัส....32
4.3 การศึกษาความสัมพันธ์ของมิติ ค่าบิดเบือน และขนาดหนังสือรหัส....36
4.3.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมิติของข้อมูลกับค่าบิดเบือน....36
4.3.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมิติของข้อมูลกับขนาดหนังสือรหัส....40
4.4 การเปรียบเทียบด้านเวลา....45
4.4.1 เวลาที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบค่าบิดเบือนของหนังสือรหัส....45
4.4.2 เวลาที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัส....47
5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ....51
5.1 สรุปผลการวิจัย....51
5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย....52
5.3 ข้อเสนอแนะ....52
รายการอ้างอิง....53
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....55

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 รายละเอียดชุดข้อมูลภาพ 2 มิติ 25
4.2 รายละเอียดชุดข้อมูลเสียง 28
4.3 ผลการเปรียบเทียบค่าบิดเบือนเฉลี่ย 29
4.4 ผลการเปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัสเฉลี่ย 32
4.5 ลักษณะข้อมูลเสียงที่ใช้ในการทดสอบ 36
4.6 เปรียบเทียบค่าบิดเบือนของอัลกอริทึมเอวีคิวในหลายมิติ 37
4.7 เปรียบเทียบค่าบิดเบือนของอัลกอริทึมแอลบีจีในหลายมิติ 38
4.8 เปรียบเทียบค่าบิดเบือนของอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีในหลายมิติ 39
4.9 เปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัสของอัลกอริทึมเอวีคิวในหลายมิติ 41
4.10 เปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัสของอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีในหลายมิติ 42
4.11 เปรียบเทียบเวลาในการประมวลผลการทดลองที่ 4.1 45
4.12 เปรียบเทียบเวลาในการประมวลผลการทดลองที่ 4.2 48

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า
2.1 ตัวอย่างการแบ่งนับเวกเตอร์ 2 มิติ 5
2.2 ขั้นตอนวิธีการปรับหนังสือรหัสให้เหมาะสม 8
2.3 ผลการแบ่งกั้นเวกเตอร์ด้วยการกำหนดจำนวนคำรหัสน้อย 9
2.4 การสุ่มหนังสือรหัสที่ไม่เหมาะสม 9
2.5 ขั้นตอนวิธีการทำงานของอัลกอริทึมอีแอลบีจีแบบเพิ่มสถานะ 10
2.6 ขั้นตอนวิธีการทำงานของอัลกอริทึมแฟกส์ 11
2.7 การแบ่งนับเวกเตอร์ก่อนทำการลดและเพิ่มขนาดหนังสือรหัส 13
2.8 ขั้นตอนวิธีการทำงานของอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี 14
2.9 การแบ่งนับเวกเตอร์ภายหลังการเพิ่มขนาดหนังสือรหัส 14
3.1 การตีกรอบข้อมูล 2 มิติ 15
3.2 (ก) กรอบข้อมูลที่ต้องการเพิ่มคำรหัส 16
3.2 (ข) ตำแหน่งที่อาจจะเป็นคำรหัสจากการแบ่งแบบ 1 เป็น 2 16
3.3 (ก) กรอบข้อมูลที่ต้องการเพิ่มคำรหัสแบบ 2 เป็น 3 17
3.3 (ข) ตำแหน่งที่อาจจะเป็นคำรหัสจากการแบ่งแบบ 2 เป็น 3 17
3.4 (ก) บริเวณแบ่งกั้นก่อนทำการเลื่อนหนังสือรหัส 19
3.4 (ข) การเลื่อนหนังสือรหัส 19
3.4 (ค) บริเวณแบ่งกั้นหลังทำการปรับหนังสือรหัสเข้าเซนทรอยด์ 19
3.5 ขั้นตอนวิธีการทำงานของอัลกอริทึมเอวีคิว 22
4.1 ภาพเครื่องบิน 26
4.2 ภาพลีน่า 26
4.3 ภาพลิงบาบู 26
4.4 ภาพพระเกี้ยว 26
4.5 ภาพตัวอักษร 27
4.6 ภาพโค้ง 27
4.7 ภาพที่ไม่มีโครงสร้างข้อมูลชัดเจน 27
4.8 ภาพข้อมูลสุ่ม 27
4.9 ภาพวงรี 27
4.10 ภาพหัวใจ 27
4.11 ภาพข้อมูลเป็นกลุ่ม 27
4.12 ภาพคำถาม 27
4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าบิดเบือนเฉลี่ยของทุกอัลกอริทึม 30
4.14 ตัวอย่างหนังสือรหัสที่ได้จากอัลกอริทัมแอลบีจี และ เอวีคิว 35

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.15 กราฟเปรียบเทียบมิติของข้อมูลกับค่าบิดเบือนเฉลี่ย 40
4.16 กราฟเปรียบเทียบมิติของข้อมูลกับขนาดหนังสือรหัสเฉลี่ย 43
4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าขีดแบ่งและเวลาในการประมวลผล 43
4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าขีดแบ่งและขนาดหนังสือรหัส 44
4.19 กราฟเปรียบเทียบค่าขีดแบ่งและค่าบิดเบือน 44
4.20 กราฟเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลการทดลองที่ 4.1 46
4.21 กราฟเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลการทดลองที่ 4.2 50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การแบ่งนับเวกเตอร์ (vector quantization : VQ) [1] เป็นกระบวนการประมาณชุดข้อมูลเวกเตอร์ จำนวนมากด้วยชุดข้อมูลที่เล็กกว่า หรือเป็นกระบวนการทำข้อมูลให้มีความละเอียดน้อยลงด้วยการหาตัวแทนข้อมูลประเภทเวกเตอร์ที่สามารถใช้ตอบคำถามในปัญหาที่สนใจได้ใกล้เคียงกับการใช้ข้อมูลทั้งหมด โดยขนาดของตัวแทนที่ได้รับมีขนาดเล็กกว่าขนาดของข้อมูลเดิม ตัวแทนของข้อมูลเหล่านี้รู้จักกันดีในชื่อของ หนังสือรหัส (codebook) ที่ประกอบด้วยชุดของคำรหัส (codeword) ซึ่งเป็นตัวแทนของข้อมูลเวกเตอร์ที่อยู่ในแต่ละบริเวณแบ่งกั้น (partition) การวัดความเหมาะสมของการแบ่งนับเวกเตอร์จะขึ้นกับการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งโดยทั่วไปวัดจากค่าบิดเบือน (distortion) ของหนังสือรหัส

การแบ่งนับเวกเตอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยด้านต่างๆ มากมาย [1-3] เช่น การบีบอัดข้อมูลภาพ (image compression) การบีบอัดข้อมูลเสียง (speech compression) การรู้จำรูปแบบ (pattern recognition) และ การค้นคืนรูปภาพ (image retrieval) เป็นต้น การแบ่งนับเวกเตอร์ช่วยในการลดปริมาณข้อมูลให้น้อยลง ขณะเดียวกันข้อมูลที่ใช้อ้างถึงแทนยังมีความบิดเบือนไปจากข้อมูลเดิมต่ำ จึงสามารถนำผลลัพธ์จากการแบ่งนับเวกเตอร์มาใช้ในการคำนวณแทนการใช้ข้อมูลทั้งหมด ทำให้ลดปัญหาในเรื่องของเนื้อที่เก็บข้อมูลและเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณกับข้อมูลปริมาณมาก

ปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายที่นำเสนออัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์ โดยอัลกอริทึมส่วนใหญ่มีพื้นฐานการพัฒนาจากแนวคิดเคมีน (K-mean) [4] คือ เป็นวิธีการตัดแบ่งวัตถุ n ตัวออกเป็นจำนวน k กลุ่ม โดยแทนแต่ละกลุ่มด้วยค่าเฉลี่ย (mean) ของกลุ่ม ซึ่งตัวแทนนี้จะเป็นตัวแทนที่ใกล้ที่สุดของสมาชิกทุกตัวในกลุ่มไม่เช่นนั้นจะทำการปรับกลุ่มใหม่จนกระทั่งค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มไม่เปลี่ยนแปลง ในปี ค.ศ. 1980 นักวิจัยโยเซฟ ลินเด (Yoseph Linde) แอนเดอร์ส บูโซ (Andres Buzo) และ โรเบิร์ต-เอ็ม-เกรย์ (Robert M. Gray) [5, 6] ได้นำเสนออัลกอริทึมแอลบีจี (Linde-Buzo-Gray algorithm : LBG algorithm) หรือเรียกอีกชื่อว่า อัลกอริทึมจีแอลเอ (Generalized Lloyd Algorithm : GLA algorithm) ซึ่งพัฒนาจากแนวคิดเคมีน และเป็นอัลกอริทึมที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการทำการแบ่งนับเวกเตอร์ ภายหลังมีผู้นำอัลกอริทึมแอลบีจีนี้มาปรับปรุงและพัฒนาต่อเป็นอัลกอริทึมต่างๆ เช่น ในปี ค.ศ. 2001 และปี ค.ศ. 2002 กิวเซปป์ พาเทน (Giuseppe Patane) และ มาโคร รุซโซ (Marco Russo) เสนออัลกอริทึมอีแอลบีจีแบบเพิ่มสถานะ (Enhanced-LBG : ELBG) [7, 8] และอัลกอริทึมแฟกส์ (Fully Automatic Clustering System : FACS) [9] ตามลำดับ หลังจากนั้นใน

ปี ค.ศ. 2006 ฟูราโอะ เชน (Furao Shen) และ โอซามุ ฮาเซกาวะ (Osamu Hasegawa) นำเสนออัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี (Adaptive incremental LBG) [10] เป็นต้น

จากการศึกษาอัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์ดังที่กล่าวไปแล้วนั้น พบปัญหาในเรื่องการนำเข้า (input) ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม เนื่องจากการนำเข้าพารามิเตอร์นั้นขึ้นกับชุดข้อมูลที่นำเข้าด้วย ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดจะเฉพาะเจาะจงกับชุดข้อมูลใดชุดข้อมูลหนึ่งเท่านั้น ทำให้ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงชุดข้อมูลนำเข้า จะต้องเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ด้วย อีกทั้งพารามิเตอร์ที่นำเข้านั้นมีผลต่อชุดหนังสือรหัสที่ได้จากการแบ่งนับเวกเตอร์โดยตรง ดังเช่นในอัลกอริทึมแอลบีจี และ อีแอลบีจีแบบเพิ่มสถานะ มีการนำเข้าขนาดของหนังสือรหัสเพื่อใช้ในการกำหนดขนาดให้กับหนังสือรหัสตั้งต้นและหนังสือรหัสผลลัพธ์ ในอัลกอริทึมแฟกส์ มีการนำเข้าค่าบิดเบือนที่ต้องการเพื่อใช้เป็นเงื่อนไขการทำงานของอัลกอริทึม และในอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี มีการเลือกพารามิเตอร์นำเข้าระหว่างขนาดหนังสือรหัสหรือค่าบิดเบือนที่ต้องการ เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการสิ้นสุดการทำงานของอัลกอริทึม ซึ่งการกำหนดขนาดหนังสือรหัสนั้นหากกำหนดให้มีจำนวนมากหรือน้อยไป จะส่งผลให้หนังสือรหัสที่ได้ไม่เหมาะสมกับข้อมูล เช่น ในกรณีกำหนดขนาดหนังสือรหัสน้อยเกินไปหรือกำหนดค่าบิดเบือนสูงเกินไป หนังสือรหัสที่ได้จะไม่สามารถอ้างอิงถึงข้อมูลได้อย่างถูกต้อง แต่หากกำหนดขนาดหนังสือรหัสมากเกินไปหรือกำหนดค่าบิดเบือนต่ำเกินไป หนังสือรหัสที่ได้จะมีขนาดที่ใกล้เคียงกับจำนวนข้อมูลเดิมซึ่งทำให้ไม่ได้ประโยชน์จากการทำการแบ่งนับเวกเตอร์ เป็นต้น

ปัญหาดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญของการแบ่งนับเวกเตอร์โดยไม่ต้องนำเข้าพารามิเตอร์ใดๆ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนออัลกอริทึมเอวีคิว (automatic vector quantization: AVQ) ที่มีการนำเข้าชุดข้อมูลเพียงอย่างเดียว ไม่ต้องนำเข้าพารามิเตอร์อื่นใด โดยผลลัพธ์ของอัลกอริทึมจะได้หนังสือรหัสที่มีความบิดเบือนไปจากข้อมูลนำเข้าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมแอลบีจีซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ได้รับความนิยม และอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีซึ่งเป็นอัลกอริทึมล่าสุด โดยให้มีการกำหนดขนาดหนังสือรหัสเท่ากัน อัลกอริทึมที่นำเสนอนี้นำแนวคิดเคมีนมาประยุกต์ใช้ในบางส่วนของอัลกอริทึมควบคู่กับการใช้เทคนิคปรับตำแหน่งและเพิ่มขนาดหนังสือรหัสเพื่อให้ได้หนังสือรหัสที่เหมาะสม และพิจารณาการสิ้นสุดการทำงานของอัลกอริทึมจากการเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าบิดเบือนที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบการทำงาน เพื่อให้ได้ค่าบิดเบือนลู่เข้าหาค่าๆ หนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์แบบอัตโนมัติ เพื่อให้การแบ่งนับเวกเตอร์สามารถทำได้โดยผู้ใช้ไม่ต้องกำหนดพารามิเตอร์ทุกครั้งที่มีการประมวลผล หรือเปลี่ยนชุดข้อมูลนำเข้า อีกทั้งเพื่อให้ผู้ใช้งานที่ไม่มีความชำนาญเกี่ยวกับข้อมูลสามารถใช้งานการแบ่งนับเวกเตอร์ได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) พัฒนาอัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์ที่ไม่ต้องกำหนด จำนวนคำรหัส และ ค่าบิดเบือน

2) เปรียบเทียบค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสซึ่งได้จากอัลกอริทึมเอวีคิว กับหนังสือรหัสที่ได้จากอัลกอริทึมแอลบีจีและอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี เมื่อใช้ขนาดหนังสือรหัสที่เท่ากันกับขนาดหนังสือรหัสที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิวที่นำเสนอ

3) เปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัสซึ่งได้จากอัลกอริทึมเอวีคิว กับหนังสือรหัสที่ได้จากอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี เมื่อกำหนดค่าบิดเบือนเท่ากับค่าบิดเบือนที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิว

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1) ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งนับเวกเตอร์

2) ออกแบบแนวคิดอัลกอริทึม

3) พัฒนาอัลกอริทึม

4) ทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอ

5) วิเคราะห์ผลการทดลอง

6) สรุปผลและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1) ได้อัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์ที่ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องกำหนดพารามิเตอร์ใดๆ

2) ได้อัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์ที่ไม่เอนเอียงตามค่าที่ผู้ใช้กำหนด แต่เป็นอัลกอริทึมที่คำนึงถึงความบิดเบือนของหนังสือรหัสที่มีต่อข้อมูล

3) เอื้อประโยชน์ให้กับผู้ที่ต้องการแบ่งนับเวกเตอร์ที่ไม่มีความรู้ความชำนาญเกี่ยวกับชุดข้อมูล ผู้ใช้สามารถดำเนินการได้ทันทีเพียงนำเข้าชุดข้อมูลที่ต้องการเท่านั้น

4) ช่วยให้ผู้มีความชำนาญเกี่ยวกับชุดข้อมูล สามารถทำการแบ่งนับเวกเตอร์กับข้อมูลใหม่ที่ไม่เคยพบมาก่อนได้ทันทีโดยไม่ต้องวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อนำมากำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์

1.6 ผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตีพิมพ์เป็นผลงานวิชาการ ในหัวข้อเรื่อง ”การปรับปรุงอัลกอริทึมแอลบีจีด้วยการระบุขนาดหนังสือรหัสอัตโนมัติ” [11] โดย เหมวรรณ ศิวรักษ์ และ อรรถสิทธิ์ สุรฤกษ์ ในงานประชุมวิชาการ ”10th National Computer Science and Engineering Conference (NCSEC2006)” จัดโดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น ณ โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด จังหวัดขอนแก่น ในระหว่างวันที่ 25-27 ตุลาคม 2549

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

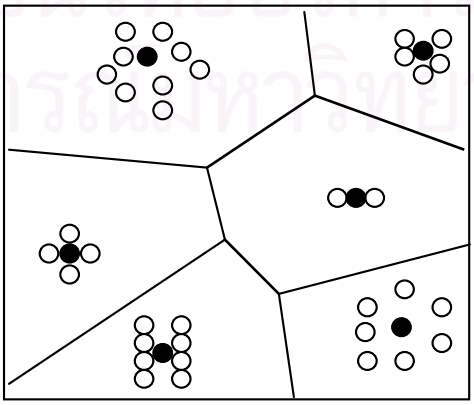
2.1.1 การแบ่งนับเวกเตอร์

การแบ่งนับเวกเตอร์เป็นการประมาณเซตข้อมูลประเภทเวกเตอร์ใดๆ [1, 12, 13] ด้วยเซตตัวแทนเวกเตอร์ที่มีจำนวนน้อยกว่า โดยให้คำจำกัดความของตัวแทนเวกเตอร์แต่ละตัวว่า *คำรหัส* (codeword) และเซตของตัวแทนเวกเตอร์ว่า *หนังสือรหัส* (codebook)

นิยามที่ 1 กระบวนการแบ่งนับเวกเตอร์เป็นกระบวนการแทน (representation) เซตข้อมูล $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_m\}$ เป็นข้อมูลประเภทเวกเตอร์ k มิติ จำนวน m ตัว โดยที่ $x \in X \subseteq \Re^k$ มีตัวแทนคือ เซตเวกเตอร์ $C = \{c_1, c_2, \ldots, c_n\}$ เป็นเวกเตอร์ k มิติ จำนวน n ตัว โดยที่ $|m| >> |n|$ และกำหนดให้ C เรียกว่า *หนังสือรหัส* และสมาชิกภายในเซตแต่ละตัวเรียกว่า *คำรหัส*

นิยามที่ 2 กระบวนการแบ่งนับเวกเตอร์ Q สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังนี้ $Q: X \to C$ โดย c_j เป็นตัวแทนของแต่ละ*บริเวณแบ่งกั้น* (partition) R_j โดยที่ $R_j = \{x \in X : Q(x) = c_j\}$ และ $j = 1, 2, \ldots, n$

นิยามที่ 3 บริเวณแบ่งกั้นแต่ละบริเวณมีคุณสมบัติคือ เมื่อนำมารวมกันจะครอบคลุมข้อมูล x ทั้งหมดโดยไม่มีบริเวณที่ซ้อนเหลื่อมกัน ข้อมูลแต่ละตัวถูกแทนด้วยคำรหัสเพียงคำเดียว แต่คำรหัสเป็นตัวแทนข้อมูลได้ตั้งแต่ 1 เวกเตอร์ขึ้นไปซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ $\bigcup_j^n R_j = X$ และ $R_j \cap R_l = \phi$ โดยที่ $j \neq l$



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการแบ่งนับเวกเตอร์ 2 มิติ

จากรูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างการแบ่งนับเวกเตอร์ข้อมูล 2 มิติ จำนวน 35 เวกเตอร์ แสดงในรูปวงกลมสีขาว และภายหลังการแบ่งนับจะได้ผลลัพธ์คือคำรหัสขนาด 6 คำ แสดงด้วยรูปวงกลมสีดำ และแสดงบริเวณแบ่งกั้นด้วยเส้นตรงสีดำซึ่งเป็นเส้นสมมติเพื่อให้เข้าใจขอบเขตการเป็นตัวแทนของหนังสือรหัส

2.1.2 การวัดระยะห่าง

ในการแบ่งนับเวกเตอร์มีการนำฟังก์ชันหาระยะห่าง (distance function) มาใช้เพื่อหาค่าระยะห่างระหว่างข้อมูลกับคำรหัสที่มีอยู่ในขณะนั้น เพื่อนำไปพิจารณาทำการแบ่งกั้นข้อมูล และคำนวณหาค่าบิดเบือนต่อไป โดยทั่วไปจะใช้ฟังก์ชันการวัดระยะห่างแบบยุคลิด (Euclidean distance) ดังสมการที่ (2.1)

$$d(x,c) = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} (x_i - c_i)^2} \tag{2.1}$$

โดยที่ x คือ ข้อมูลเวกเตอร์ k มิติ ซึ่งมี x_i เป็นข้อมูลมิติที่ i
c คือ เวกเตอร์คำรหัส ซึ่งมี c_i เป็นข้อมูลมิติที่ i

2.1.3 การวัดค่าบิดเบือน

การพิจารณาหนังสือรหัสที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลเพียงใดจะขึ้นกับงานที่นำการแบ่งนับเวกเตอร์ไปใช้ว่าให้ความสำคัญกับด้านใด โดยทั่วไปแล้วพิจารณาจากค่าบิดเบือน ซึ่งแสดงถึงความบิดเบือนของการใช้หนังสือรหัสในการทำงานแทนการใช้ข้อมูลทั้งหมด หากค่าบิดเบือนต่ำแสดงว่าหนังสือรหัสมีความเหมาะสมสูง โดยคำนวณจากค่าความคลาดเคลื่อนการแบ่งนับเฉลี่ย (Mean Quantization Error : MQE) ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3)

$$MQE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{n} E_i \tag{2.2}$$

$$E_i = \sum_{j:x_j \in R_i} d(x_j, c_i) \tag{2.3}$$

โดยที่ E_i คือค่าความผิดพลาดของคำรหัสคำที่ i (Local Quantization Error : LQE)

2.1.4 เงื่อนไขลำดับที่ใกล้ที่สุด

การแบ่งกั้นข้อมูลเพื่อให้ได้คำรหัสที่เป็นตัวแทนข้อมูลในบริเวณแบ่งกั้นจะพิจารณาตามเงื่อนไขลำดับที่ใกล้ที่สุด (Nearest Neighbor Condition : NNC) โดยพิจารณาจากระยะห่างระหว่างข้อมูลแต่ละตัวกับคำรหัสในหนังสือรหัส เพื่อให้ข้อมูลแต่ละตัวมีตัวแทนเป็นคำรหัสที่ใกล้กับข้อมูลนั้นมากที่สุด โดยเขียนให้อยู่ในรูปเซตทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\left\{x \in X : \forall i \; d\left(x, c_j\right) < d\left(x, c_i\right), j \neq i\right\} \subset R_j$$

โดยที่ R_j เป็นบริเวณแบ่งกั้นที่ข้อมูลในบริเวณนี้จะมีตัวแทนเป็นคำรหัส c_j

C_i เป็นคำรหัสที่อยู่นอกบริเวณแบ่งกั้น R_j

2.1.5 การวัดเซนทรอยด์

การคำนวณหาตำแหน่งใหม่ของคำรหัสภายหลังทำการแบ่งกั้น จะพิจารณาตามค่าเซนทรอยด์ (centroid) โดยหาจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในบริเวณแบ่งกั้นที่ต้องการหาตำแหน่งคำรหัสซึ่งสามารถคำนวณจากสูตรดังนี้

$$c_{j,k} = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} x_{i,k} \;, \quad x_i \in R_j \tag{2.4}$$

โดยที่ N_j คือ จำนวนข้อมูลในบริเวณแบ่งกั้นที่ j

k คือ มิติของเวกเตอร์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 อัลกอริทึมแอลบีจี

อัลกอริทึมแอลบีจี หรือเรียกอีกชื่อว่า อัลกอริทึมจีแอลเอถูกเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1980 โดย โยเซฟ ลินเด แอนเดอร์ส บูโซ และ โรเบิร์ต-เอ็ม-เกรย์ [6] เป็นอัลกอริทึมที่นิยมมากในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการแบ่งนับเวกเตอร์ การทำงานของอัลกอริทึมแอลบีจีเป็นการนำข้อมูล X จำนวน m เวกเตอร์มาทำการแบ่งนับเวกเตอร์เพื่อให้ได้หนังสือรหัส Y ประกอบด้วยคำรหัสจำนวน n คำ โดยขนาดของหนังสือรหัสที่ได้มีขนาดที่เล็กกว่าขนาดของข้อมูลที่นำเข้า ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

ส่วนที่ 1 การกำหนดหนังสือรหัสเริ่มต้น มี 2 แนวทางคือ

- ทำการสุ่ม (random) โดยสุ่มเลือกคำรหัส จำนวนเท่ากับขนาดของหนังสือรหัสที่กำหนดไว้
- ทำการแบ่งจากหนังสือรหัสที่มีอยู่ (splitting) โดยหนังสือรหัสเริ่มต้นจะประกอบด้วยคำรหัส 1 คำ ซึ่งคำนวณหาจากค่ากึ่งกลางของข้อมูลทั้งหมด แล้วทำการแบ่งแบบเวียนเกิด (recursive) จากคำรหัส 1 คำเป็น 2 คำด้วยการบวกและลบด้วยเพอร์เทอร์เบชันเวกเตอร์(Perturbation vector) ที่กำหนดไว้ ทำการแบ่งจนกระทั่งได้ขนาดหนังสือรหัสตามที่กำหนด ดังนั้นหนังสือรหัสจะประกอบด้วยคำรหัสจำนวน 2^n คำ เมื่อ n เป็นจำนวนครั้งการแบ่ง

ส่วนที่ 2 การปรับหนังสือรหัสให้เหมาะสม มีขั้นตอนดังรูปที่ 2.2

Algorithm 2.1 LBG algorithm

Input: *m* input vectors, *n* codebook size

Output: codebook *C*

1) Random *n* initial codebook.

2) Partition the input vector for each codeword.

The partition is calculated according to the Nearest Neighbor Condition.

3) Check termination conditions. Compute the distortion value and consider the change rate of distortion from previous iteration. If $(D_{prev}-D_{curr})/D_{curr} \leq \epsilon$, terminate algorithm. Otherwise, continue.

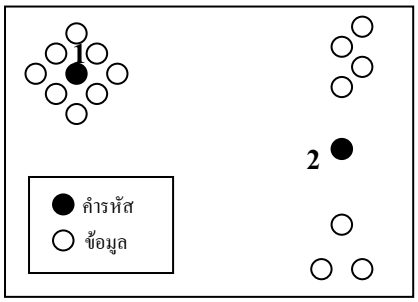
4) The new codebook *C* is calculated according to the centroid measurement.

Repeat step 2.

รูปที่ 2.2 ขั้นตอนวิธีการปรับหนังสือรหัสให้เหมาะสม

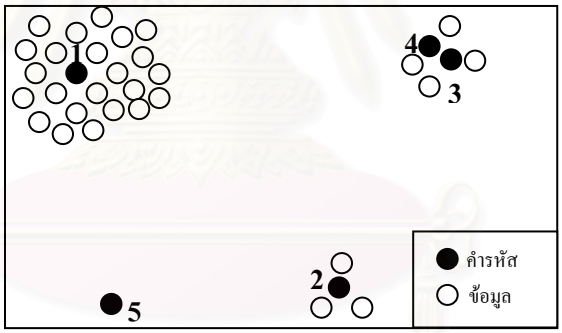
อัลกอริทึมนี้มีขั้นตอนการทำงานเริ่มต้นจากการรับข้อมูลเข้าพร้อมกับขนาดหนังสือรหัสที่ต้องการ และค่าขีดแบ่ง จากนั้นทำการหาคำรหัสตั้งต้นจากวิธีการสุ่ม หรือ วิธีการแบ่งโดยให้มีจำนวนคำรหัสเท่ากับขนาดหนังสือรหัสที่กำหนดไว้ เมื่อได้คำรหัสตั้งต้นให้ทำการแบ่งกั้นบริเวณของคำรหัส ซึ่งเป็นการกำหนดบริเวณแบ่งกั้นของข้อมูลที่มีคำรหัสแต่ละคำเป็นตัวแทน โดยพิจารณาจากระยะห่างระหว่างข้อมูลแต่ละตัวกับคำรหัส แล้วทำการคำนวณหาค่าบิดเบือนเพื่อนำมาตรวจสอบเงื่อนไขการสิ้นสุดอัลกอริทึม หากถูกต้องตามเงื่อนไขจึงหยุดอัลกอริทึม มิฉะนั้นจะทำการปรับหนังสือรหัสให้มีค่าเป็นจุดศูนย์กลางของบริเวณแบ่งกั้นที่คำรหัสนั้นอยู่ แล้วทำการคำนวณหาบริเวณแบ่งกั้น และตรวจสอบเงื่อนไขสิ้นสุดอัลกอริทึมต่อไป จากขั้นตอนการทำงานดังกล่าว พบปัญหาที่เกิดขึ้น 2 ส่วนดังนี้

กรณีที่ 1 หนังสือรหัสผลลัพธ์ขึ้นกับผู้ใช้โดยตรง เนื่องจากตลอดทุกขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมนี้ขนาดหนังสือรหัสจะเท่าเดิมทุกขั้นตอน ไม่สามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงขนาดจะขึ้นกับค่าที่ผู้ใช้กำหนด ดังนั้นหากผู้ใช้กำหนดขนาดหนังสือรหัสน้อยไปจะทำให้หนังสือรหัสที่ได้สื่อถึงข้อมูลจริงไม่ดี ส่งผลให้ค่าบิดเบือนสูงดังตัวอย่างในรูปที่ 2.3 ระบุขนาดที่น้อยเกินไปเพียง 2 คำซึ่งไม่เพียงพอต่อการแบ่งนับ คำรหัสที่ 2 จึงอยู่ระหว่างข้อมูลสองกลุ่ม ณ ตำแหน่งว่างในบริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสนั้น ซึ่งหากในกรณีนี้ผู้ใช้กำหนดขนาดหนังสือรหัสให้ประกอบด้วยคำรหัส 3 คำ ก็น่าจะทำให้ได้หนังสือรหัสที่สามารถสื่อถึงข้อมูลทั้งสามกลุ่มได้ดีขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ได้หนังสือรหัสที่มีค่าบิดเบือนต่ำลง แต่หากผู้ใช้กำหนดขนาดที่ใกล้เคียงกับจำนวนข้อมูลก็จะไม่ได้ประโยชน์จากการแบ่งนับเวกเตอร์



รูปที่ 2.3 ผลการแบ่งกั้นเวกเตอร์ด้วยการกำหนดจำนวนคำรหัสน้อย

กรณีที่ 2 หนังสือรหัสที่เป็นผลลัพธ์ขึ้นกับหนังสือรหัสเริ่มต้นโดยตรง เนื่องจากใช้การสุ่มในการกำหนดหนังสือรหัสตั้งต้น และในการปรับค่าหนังสือรหัสนั้นอัลกอริทึมนี้คำนึงถึงเพียงต้องการให้คำรหัสเข้าสู่เซนทรอยด์ของบริเวณแบ่งกั้นเพียงเท่านั้น จึงทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงคำรหัสที่ไม่ได้เป็นตัวแทนข้อมูลใด ส่งผลให้หนังสือรหัสที่เป็นผลลัพธ์ประกอบด้วยคำรหัสที่ไม่มีประโยชน์ ดังในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าจากการสุ่มหนังสือรหัสตั้งต้น จะไม่มีข้อมูลอยู่ภายในบริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสที่ 5 และในส่วนของคำรหัสอื่นๆ นั้นมีข้อมูลภายในบริเวณแบ่งกั้นทุกคำ ดังนั้นจากการปรับหาเซนทรอยด์ คำรหัสที่ 5 จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการแบ่งนับแอลบีจีแล้วคำรหัสนี้ยังมีค่าเท่าเดิมซึ่งไม่ได้เป็นตัวแทนของข้อมูลตัวใด



รูปที่ 2.4 การสุ่มหนังสือรหัสที่ไม่เหมาะสม

จากปัญหาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการให้ผู้ใช้กำหนดขนาดหนังสือรหัส มีผลกระทบโดยตรงกับหนังสือรหัสที่เป็นผลลัพธ์ รวมทั้งความไม่ยืดหยุ่นของขนาดหนังสือรหัสในทุกรอบการทำงาน และ รูปแบบการปรับคำรหัสที่สนใจค่าเซนทรอยด์เพียงอย่างเดียวเป็นอุปสรรคในการปรับปรุงหนังสือรหัสให้ดีขึ้น

2.2.2 อัลกอริทึมอีแอลบีจีแบบเพิ่มสถานะ

ในปี ค.ศ. 2001 กิวเซปป์ พาเทน และ มาโคร รุซโซ นำเสนออัลกอริทึมอีแอลบีจีแบบเพิ่มสถานะ [8] เนื่องจากอัลกอริทึมแอลบีจีคำรหัสได้จากการคำนวณหาเซนทรอยด์ของบริเวณแบ่งกั้น จึงทำให้การปรับเปลี่ยนคำรหัสในหนังสือรหัสขึ้นกับการปรับบริเวณแบ่งกั้น ซึ่งจากอัลกอริทึมแอลบีจีที่กล่าวไปแล้วพบว่าการเปลี่ยนแปลงของบริเวณแบ่งกั้นจะเพิ่มหรือลด

ขอบเขตบริเวณเฉพาะกับบริเวณที่อยู่ติดกัน ดังนั้นคำรหัสที่ปรับเปลี่ยนก็จะปรับเปลี่ยนไปเฉพาะบนบริเวณแบ่งกั้นที่ติดกัน ดังนั้นหากการกำหนดหนังสือรหัสเริ่มต้นไม่ดีก็จะทำให้ผลสุดท้ายไม่ดีด้วย เพราะไม่สามารถปรับคำรหัสแบบข้ามบริเวณแบ่งกั้นอื่น จึงเกิดการพัฒนาเป็นอัลกอริทึมอีแอลบีจีแบบเพิ่มสถานะขึ้น ซึ่งเป็นอัลกอริทึมย่อยที่เพิ่มเข้าไปในอัลกอริทึมแอลบีจีในช่วงก่อนคำนวณหาหนังสือรหัสใหม่เพื่อปรับปรุงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงบริเวณ โดยมีขั้นตอนที่เพิ่มดังรูปที่ 2.5

Algorithm 2.2 ELBG algorithm

Input: *m* input vectors, *n* codebook size

Output: codebook *C*

1) Random *n* initial codebook.

2) Partition the input vector for each codeword.

3) Check termination conditions. Compute the distortion value and consider the change rate of distortion from previous iteration. If $(D_{prev}\text{-}D_{curr})/D_{curr} \leq \epsilon$, terminate algorithm. Otherwise, continue with next step.

4) Execute ELBG-block.

4.1) evaluate utility index. The utility index is calculated from

$$U_i = \frac{D_i}{D_{mean}} \quad i = 1,...,nc$$

$$D_{mean} = \frac{1}{nc}\sum_{i=1}^{nc} D_i$$

where D_i is distortion value of the cell

4.2) Shift codeword with low utility near to codeword with high utility

5) The new codebook *C* is calculates according to centroid measurement. Repeat to step 2.

รูปที่ 2.5 ขั้นตอนวิธีการทำงานของอัลกอริทึมอีแอลบีจีแบบเพิ่มสถานะ

อัลกอริทึมนี้มีขั้นตอนการเลื่อนคำรหัส (shift) คือ นำบริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสที่มีค่าดรรชนีอรรถประโยชน์ (utility index) เกินกว่า 1 มาทำการแบ่งแยก (split) ออกเป็น 2 คำ และทำการผสาน (merge) บริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสที่มีค่าดรรชนีอรรถประโยชน์ต่ำกว่า 1 เข้ากับคำรหัสที่ใกล้ที่สุด เป็นการปรับปรุงขั้นตอนการปรับเปลี่ยนหนังสือรหัสของการแบ่งนับเวกเตอร์ เพื่อเป็นการเพิ่มความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนค่าคำรหัสให้ดียิ่งขึ้น คือ ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงบริเวณแบ่งกั้นที่ไม่ติดกันได้ แต่ไม่ได้แก้ปัญหาการกำหนดคำรหัสให้กับอัลกอริทึม ดังนั้นอัลกอริทึมอีแอลบีจีแบบเพิ่มสถานะนี้ยังคงความจำเป็นต้องนำเข้าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

2.2.3 อัลกอริทึมแฟกส์

ในปีค.ศ. 2002 กิวเซปป์ พาเทน และ มาโคร รุซโซ [9] นำเสนออัลกอริทึมใหม่ที่ใช้สำหรับทำการแบ่งกลุ่ม (clustering) และการแบ่งนับเวกเตอร์ อัลกอริทึมนี้จะทำการหาจำนวนคำรหัสที่เหมาะสมโดยให้ผู้ใช้กำหนดค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสซึ่งจะถูกนำมาพิจารณาเป็นเงื่อนไขเปรียบเทียบในอัลกอริทึม โดยขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมแฟกส์นี้มีการนำอัลกอริทึมอีแอลบีจีแบบเพิ่มสถานะมารวมอยู่ด้วย ขั้นตอนการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.6

Algorithm 2.3 FACS algorithm

Input: m input vectors, e_T distortion value

Output: codebook C

1) Initialize the codebook to contain one codeword which is in the centroid of the whole input data set.

2) *Smart growing phase*. Insert as many codewords as are necessary to obtain the distortion value $D \leq (1+p)\, e_T$ where $p \geq 0$.

- 2.1) Select a cell with $D > D_{mean}$.
- 2.2) Split the selected cell into two cells.
- 2.3) Decrease p

3) Execute an *ELBG-iteration*.

4) If ($D \leq e_T$) then continue with step 5. Otherwise, return to step 2.

5) *Smart reduction phase*. Delete the number of codewords necessary to take the distortion is not less than e_T

- 5.1) Select a cell with $D < D_{mean}$
- 5.2) Find the nearest cell to the one just selected
- 5.3) Join the two selected cells

6) Execute an ELBG-iteration. Repeat step 5 until terminate condition is checked.

รูปที่ 2.6 ขั้นตอนวิธีการทำงานของอัลกอริทึมแฟกส์

อัลกอริทึมนี้มีขั้นตอนการแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

การเพิ่มขนาดหนังสือรหัสอย่างสมาร์ต (Smart Growing) คือ กระบวนการเพิ่มคำรหัสในหนังสือรหัส จะเริ่มจากหนังสือรหัสที่มีเพียง 1 คำแล้วจึงเพิ่มหนังสือรหัสอย่างค่อยเป็นค่อยไปในบริเวณแบ่งกั้นที่มีค่าบิดเบือนสูงกว่าค่าบิดเบือนเฉลี่ย จนกระทั่งให้ค่าบิดเบือนที่ไม่สูงกว่าค่าบิดเบือนที่กำหนด

การลดขนาดหนังสือรหัสอย่างสมาร์ต(Smart Reduction) คือ การลบคำรหัสออกจากหนังสือรหัส โดยเลือกลบคำรหัสที่มีค่าบิดเบือนต่ำกว่าค่าบิดเบือนเฉลี่ย จนกระทั่งค่าบิดเบือนหนังสือรหัสสูงกว่าค่าบิดเบือนที่กำหนด

อัลกอริทึมนี้ทำการเพิ่มขนาดหนังสือรหัสทีละ 1 คำ โดยจะทำการเพิ่มขนาด แล้วทำการลดขนาดหนังสือรหัสเพื่อให้ค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสใกล้เคียงกับค่าบิดเบือนที่กำหนด ซึ่งการทำงานของอัลกอริทึมนี้ช่วยให้ได้ค่าบิดเบือนที่ใกล้เคียงกับที่กำหนดไว้ แต่เป็นค่าบิดเบือนที่สูงกว่าที่กำหนด เนื่องจากในขั้นตอนการลดขนาดหนังสือรหัสอย่างสมาร์ท พิจารณาการสิ้นสุดกระบวนการนี้จากการที่ได้ค่าบิดเบือนสูงกว่าที่กำหนด ดังนั้นการกำหนดค่าบิดเบือนจึงมีผลต่อหนังสือรหัสที่ได้รับ

ค่าบิดเบือนนี้เป็นค่าที่หลากหลายขึ้นกับรูปแบบข้อมูลจึงเป็นเรื่องยากที่ผู้ใช้จะประมาณได้ว่าควรกำหนดค่าที่เท่าใด หากกำหนดค่าบิดเบือนที่ต่ำเกินไปจะทำให้เกิดการเพิ่มขนาดหนังสือรหัสเป็นจำนวนมาก คำรหัสที่ได้จะมีจำนวนใกล้เคียงกับจำนวนข้อมูลซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดประโยชน์จากการแบ่งนับ และหากกำหนดค่าบิดเบือนสูงเกินไปจะทำให้การเพิ่มขนาดหนังสือรหัสเกิดขึ้นไม่กี่ครั้ง หนังสือรหัสที่ได้มีขนาดเล็กไม่เพียงพอต่อการแบ่งนับข้อมูลซึ่งต่างจากการกำหนดค่าบิดเบือนที่เหมาะสมที่จะได้ ขนาดหนังสือรหัสที่เหมาะสมกับค่าบิดเบือนที่เกิดขึ้น

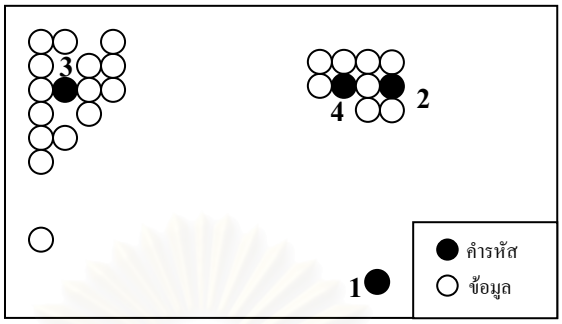
2.2.4 อัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี

ในปี ค.ศ. 2006 โดย ฟูราโอะ เซน และ โอซามุ ฮาเซกาวะ นำเสนออัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี [10] อัลกอริทึมนี้เป็นอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมแอลบีจี เพื่อแก้ปัญหาการกำหนดขนาดหนังสือรหัสโดยอัลกอริทึมนี้เพิ่มทางเลือกในการใช้อัลกอริทึม ให้สามารถเลือกได้ว่าต้องการกำหนดขนาดหนังสือรหัสที่เป็นผลลัพธ์ หรือต้องการกำหนดค่าบิดเบือนที่สูงที่สุดที่ยอมรับได้ ซึ่งทั้ง 2 ทางเลือกนี้มีขั้นตอนการทำงานคล้ายกัน แต่ต่างกันที่เงื่อนไขของอัลกอริทึมซึ่งเป็นการเปรียบเทียบตามค่าที่กำหนดเข้ามา อัลกอริทึมนี้นำเสนอ 3 ขั้นตอนการทำงานหลักๆ ที่สำคัญคือ

การลดขนาดหนังสือรหัส พิจารณาจากค่าความผิดพลาดของคำรหัสแต่ละคำซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.3) โดยการลบ (remove) คำรหัสออกจากหนังสือรหัส คำรหัสที่ถูกลบออกคือคำรหัสที่ตรงตามเกณฑ์ใดเกณฑ์หนึ่งต่อไปนี้

- คำรหัสมีค่าความผิดพลาดของคำรหัสแต่ละคำ เท่ากับ 0 ดังคำรหัสที่ 1 ในรูปที่ 8
- คำรหัสมีค่าความผิดพลาดต่ำสุด เรียกว่า *ผู้แพ้ (Loser)* โดยภายหลังการลบคำรหัสผู้แพ้ออกจากหนังสือรหัสแล้ว ทำการรวมบริเวณแบ่งกั้นให้กับคำรหัสที่อยู่ติดกัน แล้วจึงทำการหาคำรหัสใหม่ด้วยค่าเซนทรอยด์ที่คำนวณได้จากสมการที่

(2.4) เช่น ในรูปที่ 2.7 คำรหัสที่ 2 เป็นผู้แพ้ ซึ่งเมื่อถูกลบแล้วบริเวณแบ่งกั้นจะรวมเข้ากับบริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสที่ 4 แล้วจึงคำนวณหาเซนทรอยด์ของบริเวณแบ่งกั้นที่ถูกรวมกัน



รูปที่ 2.7 การแบ่งนับเวกเตอร์ก่อนทำการลด และเพิ่มขนาดหนังสือรหัส

การเพิ่มขนาดหนังสือรหัส การเพิ่มขนาดหนังสือรหัสจะทำเมื่อมีการตรวจสอบเงื่อนไขพบว่าขนาดหนังสือรหัสน้อยกว่าขนาดที่กำหนด (ในกรณีที่เลือกกำหนดจำนวนคำรหัส) หรือค่าบิดเบือนหนังสือรหัสสูงเกินกว่าค่าที่กำหนด (ในกรณีที่เลือกกำหนดค่าบิดเบือน) การเพิ่มขนาดหนังสือรหัสจะเริ่มจากคำนวณหาคำรหัสที่มีค่าความผิดพลาดของคำรหัสแต่ละคำสูงที่สุดเป็นอันดับที่ 1 คำรหัสนี้จะถูกเรียกว่า *ผู้ชนะ (Winner)* หลังจากนั้นทำการเพิ่มคำรหัสให้หนังสือรหัสด้วยการสุ่มคำรหัสเพิ่ม 1 คำในบริเวณแบ่งกั้นของผู้ชนะ เช่น ในรูปที่ 2.7 คำรหัสที่ 3 เป็นผู้ชนะ ในบริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสที่ 3 จะสุ่มคำรหัสเพิ่มขึ้น 1 คำเพื่อเป็นคำรหัสใหม่ที่จะเพิ่มลงในหนังสือรหัสที่มีอยู่

การสิ้นสุดการทำงาน เงื่อนไขการสิ้นสุดการทำงานจะถูกพิจารณาก่อนทำการเพิ่มหรือลดขนาดหนังสือรหัสซึ่งจะขึ้นกับการกำหนดค่านำเข้าของผู้ใช้ว่าเป็นกรณีใด

- กรณีนำเข้าขนาดหนังสือรหัส เงื่อนไขหยุดการทำงานคือ เมื่อขนาดหนังสือรหัสเท่ากับที่กำหนด และดำเนินการเพิ่ม-ลดขนาดหนังสือรหัสแล้วไม่ทำให้ค่าบิดเบือนลดลง จะสิ้นสุดการทำงานและให้ผลลัพธ์เป็นค่าที่ได้จากการทำงานรอบก่อน
- กรณีนำเข้าค่าบิดเบือน เงื่อนไขหยุดการทำงานคือ เมื่อค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสไม่เกินกว่าที่กำหนด และดำเนินการเพิ่ม-ลดขนาดหนังสือรหัสแล้วไม่ทำให้จำนวนคำรหัสลดลง จะสิ้นสุดการทำงานและให้ผลลัพธ์เป็นค่าที่ได้จากการทำงานรอบก่อน

กระบวนการทำงานของอัลกอริทึมนี้เริ่มต้นจากการสุ่มคำรหัสตั้งต้นเพียงคำเดียว แล้วนำคำรหัสที่ได้ดำเนินการตามอัลกอริทึมแอลบีจี หลังจากนั้นทำการตรวจสอบเงื่อนไขการเพิ่มคำรหัสให้กับหนังสือรหัสและดำเนินการตามที่กล่าวไปข้างต้น จากนั้นดำเนินการตามอัลกอริทึมแอลบีจีเฉพาะบริเวณแบ่งกั้นที่มีการเปลี่ยนแปลง แล้วทำการตรวจสอบเงื่อนไขการเพิ่มคำรหัสอีกครั้ง กรณีไม่ตรงเงื่อนไขการเพิ่มคำรหัส จะทำการตรวจสอบเงื่อนไขการสิ้นสุดอัลกอริทึมดังที่กล่าวไปแล้ว กรณีถูกต้องตามเงื่อนไขจะหยุดการทำงานตามอัลกอริทึมและ

แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานในรอบก่อน มิเช่นนั้นจะทำการลดขนาดหนังสือรหัสตามกระบวนการที่กล่าวไปแล้ว หลังจากนั้นทำการตรวจสอบเงื่อนไขการเพิ่มคำรหัส พร้อมทั้งดำเนินการตามขั้นตอนดังที่กล่าวไปแล้วจนกระทั่งถูกต้องตามเงื่อนไขการสิ้นสุดอัลกอริทึม โดยอัลกอริทึมนี้สามารถเขียนเป็นขั้นตอนได้ดังรูปที่ 2.8

Algorithm 2.3 Adaptive incremental LBG algorithm

input : *m* input vectors, *n* codebook size or ξ distortion value

output : codebook *C*

1) Initialize the codebook to contain one codeword which is selected randomly from the original input vector set.

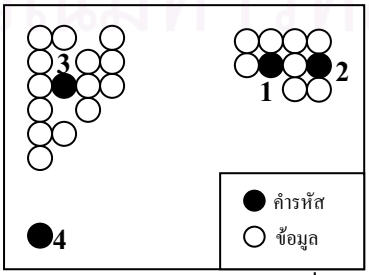
2) Execute the LBG algorithm to optimize the codebook.

3) If the current codebook size is smaller than *n* (or if the current distortion value is greater than ξ), insert a new codeword to the codebook until the current codebook size is equal to *n* (or the current distortion value is less than or equal to ξ).

4) If the distortion value in the current iteration is greater than the distortion values from previous iteration distortion (or the codebook size from current iteration is greater than the codebook size from previous iteration), return the previous codebook as a result. Otherwise, remove codewords with 0 or lowest LQE. And go to step 3.

รูปที่ 2.8 ขั้นตอนวิธีการทำงานของอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี

จากรายละเอียดที่กล่าวไปแล้วเห็นได้ว่า อัลกอริทึมนี้ยังจำเป็นต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ให้กับอัลกอริทึมเพื่อเป็นการกำหนดเงื่อนไขการสิ้นสุดให้กับอัลกอริทึม ดังนั้นพารามิเตอร์ที่กำหนดจึงมีผลโดยตรงกับหนังสือรหัสที่ได้รับ และในขั้นตอนการเพิ่มคำรหัสนั้นได้จากการสุ่มคำรหัสขึ้นซึ่งการสุ่มอาจส่งผลให้ได้คำรหัสใหม่ที่ให้ค่าความผิดพลาดของคำรหัสแต่ละคำต่ำจนเกินไปเช่น 1 ข้อมูลต่อคำรหัส 1 คำ ซึ่งไม่ช่วยให้ค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสลดลง ทำให้ต้องเพิ่มกระบวนการทำงานในการลดคำรหัสเพื่อรวมคำรหัสเหล่านี้อีกครั้ง ดังเช่นในรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการเพิ่มคำรหัสในบริเวณแบ่งกันของคำรหัสที่ 3 ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 การแบ่งนับเวกเตอร์ภายหลังการเพิ่มขนาดหนังสือรหัส

บทที่ 3

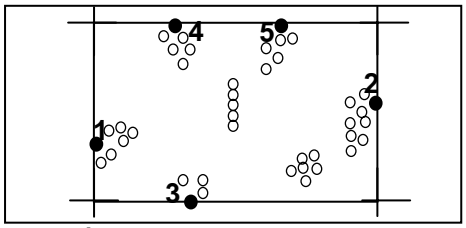
อัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์แบบอัตโนมัติ

งานวิจัยนี้เสนออัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์แบบอัตโนมัติ หรือ อัลกอริทึมเอวีคิว ซึ่งมีลักษณะเด่น คือ ผู้ใช้ไม่ต้องระบุค่าบิดเบือนและขนาดหนังสือรหัส เนื่องจากเล็งเห็นปัญหาที่ว่า ถ้าผู้ใช้ระบุค่าขนาดหนังสือรหัสที่น้อยเกินไป หรือระบุค่าบิดเบือนที่มากเกินไป จะทำให้หนังสือรหัสที่ได้ไม่สะท้อนให้เห็นถึงข้อมูลจริง และถ้าระบุขนาดหนังสือรหัสด้วยค่าที่มากเกินไป หรือระบุค่าบิดเบือนที่น้อยเกินไปหนังสือรหัสที่ได้ก็จะมีขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดของข้อมูล ทำให้ไม่ได้ประโยชน์จากการแบ่งนับเวกเตอร์ จึงเป็นที่มาของการพัฒนาอัลกอริทึมเอวีคิวซึ่งใช้การปรับและเพิ่มขนาดหนังสือรหัส จนกระทั่งได้ค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสลู่เข้า โดยใช้เทคนิคการหดและขยายบริเวณแบ่งกั้น เพื่อให้สามารถค้นพบหนังสือรหัสที่ให้ค่าบิดเบือนที่ต่ำลง โดยค่าบิดเบือนในอัลกอริทึมนี้จะมีการคำนวณ 2 แบบ คือ การคำนวณหาค่าบิดเบือนทั้งหมดโดยคำนวณจากข้อมูลทุกเวกเตอร์ในแต่ละบริเวณแบ่งกั้นกับคำรหัสที่อยู่ในแต่ละบริเวณนั้น และการคำนวณหาค่าบิดเบือนในแต่ละบริเวณแบ่งกั้นซึ่งคำนวณจากข้อมูลเวกเตอร์กับคำรหัสที่อยู่ในบริเวณนั้น

อัลกอริทึมเอวีคิวมีลักษณะการทำงานแบบวนซ้ำ (iterative procedure) เพื่อปรับค่าหนังสือรหัส โดยจะเริ่มต้นจากหนังสือรหัสที่ประกอบด้วยคำรหัส 2 คำ หลังจากนั้นทำการปรับหนังสือรหัสด้วยการย้ายคำรหัสหนึ่งเข้าหาอีกคำรหัสหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายการหดและขยายบริเวณแบ่งกั้น และพิจารณาเงื่อนไขการทำงานควบคู่ไปด้วย หากเกิดกรณีที่ปริมาณคำรหัสที่มีอยู่ไม่เพียงพอให้อัลกอริทึมสิ้นสุดลง ก็จะทำการเพิ่มปริมาณคำรหัส หรือเพิ่มขนาดหนังสือรหัสนั่นเอง โดยกระบวนการทำงานประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ การเพิ่มขนาดหนังสือรหัส การปรับหนังสือรหัส และการพิจารณาเงื่อนไขในอัลกอริทึม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การเพิ่มขนาดหนังสือรหัส

การเพิ่มขนาดหนังสือรหัสหรือการเพิ่มคำรหัส มีแนวคิดการทำงานโดยเริ่มจากการตีกรอบข้อมูลในทุกๆมิติ คล้ายการนำลูกบาศก์ (cube) มาครอบบริเวณข้อมูลที่ต้องการจะเพิ่มคำรหัส โดยในแต่ละมิติกรอบของข้อมูลมี 2 ค่าคือค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของข้อมูลในบริเวณที่ต้องการตีกรอบ ดังในรูปที่3.1



รูปที่ 3.1 การตีกรอบข้อมูล 2 มิติ

จากรูปที่ 3.1 เป็นการแสดงการตีกรอบข้อมูลโดยยกตัวอย่างด้วยภาพ 2 มิติเพื่อความเข้าใจง่าย ซึ่งในการทำงานจริงจะสามารถใช้กับข้อมูลหลากหลายมิติได้ โดยใช้วิธีการเดียวกันนี้ในทุกๆมิติของข้อมูล จากรูปวงกลมโปร่งแสดงข้อมูลเวกเตอร์ 2 มิติ วงกลมทึบแสดงข้อมูลที่มีค่าต่ำสุดหรือสูงสุดในมิติต่างๆ ดังนี้ วงกลมทึบ 1 คือ ข้อมูลที่มีค่าต่ำสุดในมิติแกนนอน วงกลมทึบ 2 คือ ข้อมูลที่มีค่าสูงสุดในมิติแกนนอน วงกลมทึบ 3 คือ ข้อมูลที่มีค่าต่ำสุดในมิติแกนตั้ง วงกลมทึบ 4 และ 5 คือ ข้อมูลที่มีค่าสูงสุดในมิติแกนตั้ง ดังนั้นผลการตีกรอบของข้อมูลจะได้กรอบข้อมูลดังรูปสี่เหลี่ยม

หลังจากตีกรอบแล้วทำการเพิ่มคำรหัสขึ้นคล้ายการแบ่ง (splitting) โดยคำรหัสใหม่ที่ได้อยู่ ณ ข้อมูลที่ใกล้ที่สุดกับตำแหน่งที่อาจจะเป็นคำรหัส ซึ่งรูปแบบการหาตำแหน่งดังกล่าวมี 2 รูปแบบขึ้นกับลักษณะการแบ่ง ดังนี้

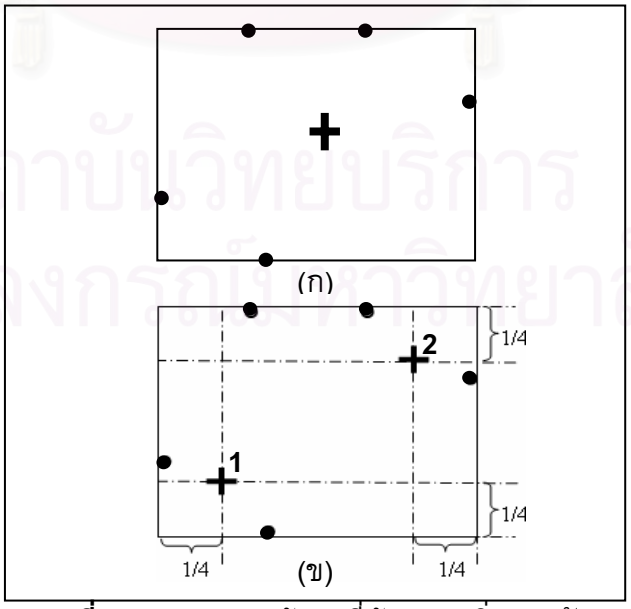
3.1.1 แบ่งจาก 1 เป็น 2

การแบ่งแบบนี้ใช้ใน 2 กรณี คือ

ก. กรณีการหาหนังสือรหัสตั้งต้น จะใช้ข้อมูลทั้งหมดในการตีกรอบข้อมูล แล้วทำการเพิ่มคำรหัสโดยผลลัพธ์ที่ได้ คือ คำรหัสตั้งต้น 2 คำ

ข. กรณีเพิ่มขนาดขณะที่หนังสือรหัสที่มีอยู่ประกอบด้วย 2 คำรหัส จะทำการตีกรอบข้อมูลในบริเวณแบ่งกั้นที่มีค่าบิดเบือนสูงสุด แล้วทำการเพิ่มคำรหัสในบริเวณแบ่งกั้นที่มีค่าบิดเบือนสูงสุดจะได้คำรหัสเพิ่มขึ้นมาอีก 1 คำ โดยผลลัพธ์ที่ได้ คือ คำรหัสใหม่ 2 คำ โดยจะใช้คำรหัสใหม่นี้ในบริเวณแบ่งกั้นที่นำมาดำเนินการ

ลักษณะการหาตำแหน่งที่อาจจะเป็นคำรหัสมีลักษณะดังตัวอย่างรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยภาพ 2 มิติเพื่อให้เข้าใจง่าย



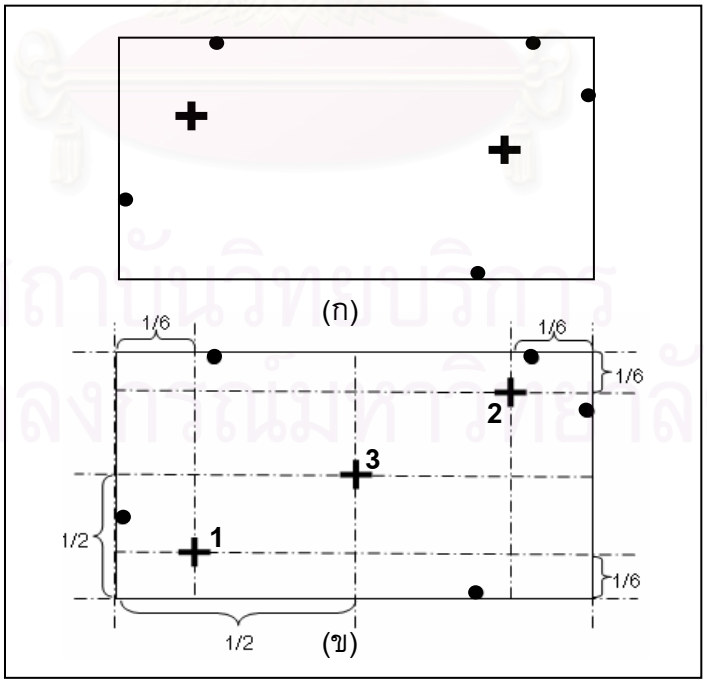
รูปที่ 3.2 (ก) กรอบข้อมูลที่ต้องการเพิ่มคำรหัส

(ข) ตำแหน่งที่อาจจะเป็นคำรหัสจากการแบ่งแบบ 1 เป็น 2

จากรูป 3.2 (ก) แสดงกรอบข้อมูลที่ต้องการเพิ่มคำรหัส ซึ่งสังเกตเห็นเครื่องหมายบวกนั่นคือคำรหัสที่อยู่ในบริเวณแบ่งกั้นที่มีค่าความบิดเบือนสูงสุด (เป็นตัวอย่างในกรณีที่ 2 ดังที่กล่าวไปแล้ว หากเป็นในกรณีที่ 1 จะไม่มีคำรหัส การตีกรอบก็จะตีกรอบข้อมูลทั้งหมด) ในส่วนของรูป 3.2 (ข) คือ การหาตำแหน่งที่อาจจะเป็นคำรหัส ซึ่งวิธีการคือนำกรอบข้อมูลมาหาระยะห่างของขอบในแต่ละมิติ แล้ววัดระยะเข้ามาจากขอบ 1 ใน 4 ของระยะห่างของขอบทั้ง 2 ด้านโดยทำเช่นเดียวกันในทุกมิติ จะได้ตำแหน่งที่อาจเป็นคำรหัส 2 ตำแหน่งดังรูปเครื่องหมายบวกที่ 1 คือ ตำแหน่งที่ค่าข้อมูลต่ำสุด บวกด้วย 1 ใน 4 ของระยะที่วัดเข้ามาในแต่ละมิติ และเครื่องหมายบวกที่ 2 คือ ตำแหน่งที่ค่าข้อมูลสูงสุด ลบด้วย 1 ใน 4 ของระยะขอบในแต่ละมิติ โดยจะคำนวณหาเช่นนี้ในทุกมิติของข้อมูล ภายหลังทำการหาตำแหน่งที่อาจจะเป็นคำรหัสได้แล้ว จะทำการหาคำรหัสใหม่โดยคำรหัสใหม่นั้นมีค่าเท่ากับข้อมูลที่อยู่ใกล้ที่สุดกับตำแหน่งที่อาจเป็นคำรหัสที่หาได้จากวิธีที่กล่าวไปแล้ว

3.1.2 แบ่งจาก 2 เป็น 3

การแบ่งแบบนี้ใช้ในกรณีที่หนังสือรหัสที่มีอยู่ประกอบด้วยคำรหัสมากกว่า 2 คำ ซึ่งจะทำการหาตำแหน่งที่อาจเป็นคำรหัสก่อนแล้วจึงหาข้อมูลที่อยู่ใกล้ที่สุดกับตำแหน่งดังกล่าวเพื่อเป็นค่าของคำรหัสใหม่ที่ได้ เหมือนกับการแบ่งจาก 1 เป็น 2 แต่แตกต่างกันในส่วนของการตีกรอบข้อมูลที่จะใช้การตีกรอบใน 2 บริเวณรวมกัน คือ บริเวณแบ่งกั้นที่มีค่าบิดเบือนสูงสุดและบริเวณแบ่งกั้นที่อยู่ใกล้เคียง และในส่วนของการหาตำแหน่งที่อาจเป็นคำรหัสมีลักษณะการหาดังตัวอย่างในรูป 3.3 ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยภาพ 2 มิติ เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ



รูปที่ 3.3 (ก) การตีกรอบข้อมูลที่ต้องการเพิ่มคำรหัส
(ข) ตำแหน่งที่อาจจะเป็นคำรหัสจากการแบ่งแบบ 2 เป็น 3

จากรูป 3.3 (ก) แสดงกรอบข้อมูลที่ต้องการเพิ่มคำรหัส ซึ่งสังเกตเห็นรูปเครื่องหมายบวกนั่นคือคำรหัสที่อยู่ในบริเวณแบ่งกั้นที่มีค่าความบิดเบือนสูงสุดและบริเวณแบ่งกั้นใกล้เคียงจึงมี 2 คำรหัส ในส่วนของรูป 3.3 (ข) คือ การหาตำแหน่งที่อาจจะเป็นคำรหัส วิธีการ คือ นำกรอบข้อมูลมาหาระยะห่างระหว่างขอบในแต่ละมิติ แล้ววัดระยะเข้ามาจากขอบ 1 ใน 6 และ 1 ใน 2 ของระยะห่างระหว่างขอบทั้งสองด้านโดยทำเช่นเดียวกันในทุกมิติ จะได้ตำแหน่งที่อาจเป็นคำรหัส 3 ตำแหน่งดังรูป เครื่องหมายบวกที่ 1 คือ ตำแหน่งที่ค่าข้อมูลต่ำสุดบวกด้วย 1 ใน 6 ของระยะที่วัดเข้ามาในแต่ละมิติจากรูป เครื่องหมายบวกที่ 2 คือ ตำแหน่งที่ค่าข้อมูลสูงสุดลบด้วย 1 ใน 6 ของระยะขอบในแต่ละมิติจากรูปและเครื่องหมายบวกที่ 3 คือ ตำแหน่งที่ค่าข้อมูลต่ำสุดบวกด้วย 1 ใน 2 ของระยะขอบในแต่ละมิติจากรูป โดยจะคำนวณหาเช่นนี้ในทุกมิติของข้อมูล ภายหลังทำการหาตำแหน่งที่อาจจะเป็นคำรหัสได้แล้ว จะทำการหาคำรหัสใหม่เหมือนดังเช่นในการเพิ่มคำรหัสแบบแบ่งจาก 1 เป็น 2

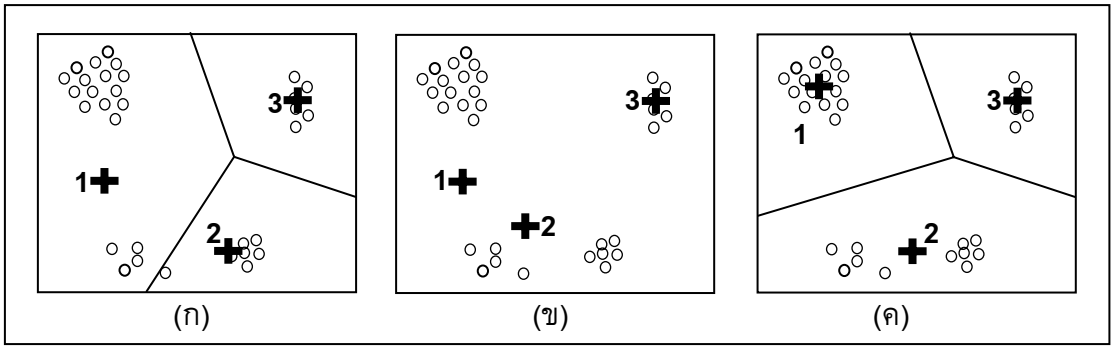
การเพิ่มขนาดหนังสือรหัสด้วย 2 รูปแบบที่กล่าวมานี้ มีแนวคิดพื้นฐานที่ต้องการให้คำรหัสที่เพิ่มเข้ามามีการกระจายตัวในระดับหนึ่ง และการใช้ข้อมูลที่ใกล้กับตำแหน่งที่อาจเป็นคำรหัสนั้นช่วยให้คำรหัสที่ได้ไม่ตกอยู่ในบริเวณแบ่งกั้นที่ไม่มีข้อมูลอยู่ใกล้

3.2 การปรับหนังสือรหัส

การปรับหนังสือรหัสคือการปรับเปลี่ยนค่าคำรหัสเพื่อให้ได้ค่าบิดเบือนที่ต่ำลงโดยการปรับมี 2 รูปแบบคือ

3.2.1 การหดและขยายบริเวณแบ่งกั้น

เป็นลักษณะการปรับหนังสือรหัสแบบหนึ่ง โดยใช้การเลื่อนคำรหัสใกล้เคียงเข้าหาคำรหัสที่มีค่าบิดเบือนสูงสุด โดยลักษณะการเลื่อนนั้นดูเหมือนเป็นการหดบริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสที่มีค่าบิดเบือนสูงสุดลง และขยายบริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสใกล้เคียงให้มากขึ้น เพื่อเป็นการลดค่าบิดเบือนของคำรหัสที่มีค่าบิดเบือนสูงสุดลง โดยใช้แนวคิดว่าหากลดบริเวณแบ่งกั้นที่มีค่าบิดเบือนสูงสุดให้ต่ำลงได้ก็น่าจะช่วยให้ค่าบิดเบือนทั้งหมดลดต่ำลง โดยการทำงานในขั้นตอนนี้จะทำการเลื่อนคำรหัสใกล้เคียงเข้าหาคำรหัสที่มีค่าบิดเบือนสูงสุดเป็นระยะทาง 1 ใน 2 ของระยะห่างระหว่าง 2 คำรหัสในแต่ละมิติ เนื่องจากต้องการให้คำรหัสใกล้ยังคงครอบคลุมบริเวณแบ่งกั้นเดิมอยู่ด้วย อีกทั้งในส่วนท้ายของกระบวนการนี้มีการตรวจสอบว่า ในบริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสสูงสุดภายหลังผ่านกระบวนการนี้แล้วให้ค่าบิดเบือนที่ต่ำลงหรือไม่ หากค่าบิดเบือนไม่ต่ำลงจะกลับไปใช้หนังสือรหัสชุดเดิม แต่ถ้าทำให้ค่าบิดเบือนลดต่ำลงก็จะใช้หนังสือรหัสใหม่ที่ได้ดำเนินการต่อไป ซึ่งรูปแบบการปรับหนังสือรหัสเป็นดังในรูปที่ 3.4(ก) 3.4(ข) และ 3.4(ค)



รูปที่ 3.4 (ก) บริเวณแบ่งกั้นก่อนทำการเลื่อนหนังสือรหัส
(ข) การเลื่อนหนังสือรหัส
(ค) บริเวณแบ่งกั้นหลังทำการปรับหนังสือรหัสเข้าเซนทรอยด์

จากรูปที่ 3.4 มีการแสดงบริเวณแบ่งกั้นด้วยเส้นสมมติที่เป็นเส้นตรง ที่ใช้แบ่งกั้นบริเวณของคำรหัสแต่ละคำ ซึ่งคำรหัสแต่ละคำแสดงด้วยเครื่องหมายบวก รูปที่ 3.4(ก) แสดงตัวอย่างบริเวณแบ่งกั้นก่อนทำการเลื่อนหนังสือรหัส โดยบริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสที่ 1 มีค่าบิดเบือนสูงที่สุด และมีคำรหัสใกล้คือ คำรหัสที่ 2 ซึ่งมีข้อมูลในบริเวณแบ่งกั้นใกล้กับคำรหัสที่ 1 มากที่สุด รูปที่ 3.4(ข) แสดงการเลื่อนคำรหัสที่ 2 เข้าหาคำรหัสที่ 1 โดยทำการเลื่อนเข้าเป็นระยะ 1 ใน 2 ของระยะห่างระหว่างคำรหัสที่1 และ 2 ในแต่ละมิติ รูปที่ 3.4(ค) แสดงบริเวณแบ่งกั้นที่ได้จากการเลื่อนคำรหัส ซึ่งเห็นได้ว่าการเลื่อนคำรหัสนี้มีลักษณะคล้ายการหดและขยายบริเวณแบ่งกั้น เพื่อลดบริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสที่ 1 ให้ได้ค่าบิดเบือนที่ต่ำลง โดยการปรับบริเวณแบ่งกั้นในรูปที่ 3.4(ค) นี้จะอธิบายรายละเอียดต่อไปในหัวข้อถัดไป

ในส่วนท้ายของกระบวนการนี้จะมีการตรวจสอบค่าบิดเบือนภายในบริเวณแบ่งกั้นที่เดิมมีค่าบิดเบือนสูงที่สุด หากภายหลังกระบวนการนี้ไม่สามารถช่วยลดค่าบิดเบือนดังกล่าวลงได้จะย้อนกลับไปใช้หนังสือรหัสในรอบก่อน ในการดำเนินการต่อๆไป

3.2.2 การปรับหนังสือรหัสเข้าสู่เซนทรอยด์

การปรับหนังสือรหัสเข้าสู่เซนทรอยด์ เป็นการปรับคำรหัสเข้าสู่เซนทรอยด์ของแต่ละบริเวณแบ่งกั้น โดยจะทำการแบ่งกั้นบริเวณข้อมูลของแต่ละคำรหัสตามเงื่อนไขลำดับที่ใกล้ที่สุด ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณหาเซนทรอยด์ของแต่ละบริเวณ โดยจะทำการคำนวณเช่นนี้ในบริเวณแบ่งกั้นของทุกคำรหัส เพื่อให้ได้คำรหัสที่อยู่ ณ ตำแหน่งเซนทรอยด์ของข้อมูลซึ่งช่วยให้ได้ค่าบิดเบือนที่ลดลงกว่าอยู่ ณ ตำแหน่งอื่นในบริเวณแบ่งกั้น

3.3 การพิจารณาเงื่อนไขในอัลกอริทึม

การทำงานในอัลกอริทึมเอวีคิว มีการกำหนดเงื่อนไขที่ต้องพิจารณา 3 ประการหลัก คือ ส่วนของการพิจารณาเปลี่ยนคำรหัสสูงสุดที่ใช้ในการหดและขยายบริเวณแบ่งกั้น ส่วนของการพิจารณาเพิ่มขนาดหนังสือรหัส และส่วนของการพิจารณาการสิ้นสุดอัลกอริทึม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การพิจารณาเปลี่ยนคำรหัสสูงสุดที่ใช้ในการหดและขยายบริเวณแบ่งกั้น

คำรหัสสูงสุด คือ คำรหัสที่มีค่าบิดเบือนภายในบริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสนั้นสูงที่สุด ซึ่งจะทำการเปลี่ยนคำรหัสสูงสุดในกรณีที่คำรหัสสูงสุดมีค่าบิดเบือนที่ต่ำลงกว่าค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสโดยจะทำการเปลี่ยนคำรหัสสูงสุดเป็นคำรหัสอื่นที่ไม่ซ้ำกับคำรหัสที่เคยเป็น ณ ขณะที่ขนาดหนังสือรหัสเท่าเดิม และไม่ใช่คำรหัสที่เป็นคำรหัสใกล้เคียงในรอบล่าสุด

3.3.2 การพิจารณาเพิ่มขนาดหนังสือรหัส

การเพิ่มขนาดหนังสือรหัสจะเพิ่มขนาดในกรณีที่เมื่อทำการปรับหนังสือรหัสแล้วไม่ทำให้อัลกอริทึมสิ้นสุดดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป และเมื่อทำการเปลี่ยนคำรหัสสูงสุดปรากฏว่าไม่มีคำรหัสใดที่สามารถเป็นคำรหัสสูงสุดได้ คือ คำรหัสสูงสุด ณ ขณะนั้นเคยเป็นคำรหัสสูงสุดโดยที่มีขนาดหนังสือรหัสเท่าเดิม หรือเป็นคำรหัสที่ตรงกับคำรหัสใกล้ในรอบล่าสุดจึงต้องทำการเพิ่มขนาดหนังสือรหัสเพื่อให้สามารถดำเนินการลดค่าบิดเบือนลงได้

3.3.3 การพิจารณาการสิ้นสุดอัลกอริทึม

การสิ้นสุดอัลกอริทึมจะพิจารณาค่าบิดเบือนทั้งหมด โดยพิจารณาว่าลดต่ำลงจนอัตราการเปลี่ยนแปลงลู่เข้าหรือไม่ ซึ่งพิจารณาการลู่เข้าจากการคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าบิดเบือนในรอบก่อนหน้าและในรอบปัจจุบันว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.001 หรือไม่ ซึ่งค่านี้ได้จากการทดลองโดยจะกล่าวรายละเอียดในส่วนท้ายของบทที่ 4 โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวหาจากค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ [14] ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (3.1)

$$\varepsilon = \frac{\left| D_{prev} - D_{curr} \right|}{D_{curr}} \tag{3.1}$$

โดยที่ D_{prev} คือ ค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสในรอบก่อนหน้า

D_{curr} คือ ค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสในรอบปัจจุบัน

จากรายละเอียดที่กล่าวไปข้างต้นแสดงให้เห็นถึง รายละเอียดในกระบวนการทำงานหลักๆ ของอัลกอริทึมการแบ่งนับเวกเตอร์เอวีคิว ซึ่งขั้นตอนการทำงานทั้งหมดสามารถสรุปเป็นขั้นๆ ได้ดังนี้

อัลกอริทึมเอวีคิว

นำเข้า เซตของเวกเตอร์ A ขนาด k มิติ

นำออก หนังสือรหัส

1. หาคำรหัสตั้งต้น
2. แบ่งกั้นข้อมูลตามคำรหัสตั้งต้น
3. หาคำรหัสที่มีค่าบิดเบือนสูงสุด เรียกว่า *คำรหัสสูงสุด*
4. ตรวจสอบเงื่อนไขการเพิ่มขนาดหนังสือรหัส
5. หาคำรหัสที่ใกล้กับคำรหัสสูงสุด เรียกว่า *คำรหัสใกล้เคียง*
6. หดและขยายบริเวณแบ่งกั้น
7. ตรวจสอบเงื่อนไขการเปลี่ยนคำรหัสสูงสุด หากไม่ตรงเงื่อนไขจะทำการเปลี่ยนคำรหัสใกล้เคียงเพื่อทำการหดและขยายบริเวณแบ่งกั้นกับคำรหัสใกล้เคียงคำอื่นๆ
8. ดำเนินการต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าบิดเบือนที่ลดลงทั้งหมดน้อยกว่า 0.001
9. นำหนังสือรหัสที่ได้มาปรับบริเวณแบ่งกั้นและหาเซนทรอยด์ โดยจะทำจนกระทั่งหนังสือรหัสไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งหนังสือรหัสที่ได้จะเป็นผลลัพธ์ของอัลกอริทึม

จากขั้นตอนของอัลกอริทึมเอวีคิวข้างต้นสามารถเขียนเป็นรหัสเทียมได้ดังรูปที่ 3.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Algorithm 3.1 Automatic Vector Quantization (AVQ algorithm)

Input : a set of vector *A*

Output : codebook *C*

01 : **begin**
02 : *C* ← SplitCodeword(*A*)
03 : *C* ← PartitionCentroid(*A*,*C*)
04 : **while** ~((*Distor*$_{NEW} \leq$ *Distor*$_{OLD}$) && ($\frac{|Distor_{OLD} - Distor_{NEW}|}{Distor_{NEW}}$ < 0.001) && (~flagback))
05 : **if** (*flagFindMAX*) **then**
06 : *Cmax* ← FindMaxCodeword
07 : **if** isempty(*Cmax*) **then**
08 : *Pmax* ← FindMaxPartiion
09: *C* ← SplitCodeword(*Pmax*)
10 : *C* ← PartitionCentroid(*A*,*C*)
11 : *Cmax* ← FindMaxCodeword
12 : **endif**
13 : **endif**
14 : *flagFindMAX* ← true
15 : *Cnear* ← FindNearCodeword
16 : **if** isempty(*Cnear*) **then**
17 : continue
18 : **endif**
19 : *flagback* , *C* ← ShiftPartitionCodeword
20 : **if** (*distor*$_{NEW}$ < *Distor*$_{NEW}$)
21 : continue
22 : **else**
23 : *flagFindMAX* ← false
24 : **endif**
25 : **end**
26 : **while** Codeword$_{OLD} \neq$ Codeword$_{NEW}$
27 : *C* ← PartitionCentroid
28 : **end**
29 : return(*C*)
30 : **end**

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนวิธีการทำงานของอัลกอริทึมเอวีคิว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรหัสเทียมในรูปที่ 3.5 อัลกอริทึมเอวีคิวจะนำเข้า คือ ชุดข้อมูลเวกเตอร์ *k* มิติ และให้ผลลัพธ์เป็นหนังสือรหัสที่มีขนาดน้อยกว่าชุดข้อมูลที่อินพุตเข้ามา ซึ่งแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายการทำงานอย่างละเอียดได้ดังนี้

บรรทัดที่ 2 : หาหนังสือรหัสตั้งต้นที่ประกอบด้วยคำรหัส 2 คำ ด้วยวิธีการเพิ่มขนาดหนังสือรหัสแบบแบ่งจาก 1 เป็น 2 ตามหัวข้อ 3.1.1 กรณีที่ 1

บรรทัดที่ 3 : แบ่งกั้นข้อมูลและปรับหนังสือรหัสเข้าสู่เซนทรอยด์ ตามหัวข้อ 3.2.2

บรรทัดที่ 4 : ตรวจสอบเงื่อนไขการสิ้นสุดอัลกอริทึม ตามหัวข้อ 3.3.3 รวมทั้งตรวจสอบค่าบูลลีน *flagback* เพื่อตรวจสอบว่าไม่มีการย้อนกลับใช้หนังสือรหัสเดิมของรอบก่อนหน้าในส่วนการหดและขยายบริเวณแบ่งกั้นซึ่งจะส่งผลให้ค่าบิดเบือนไม่มีการเปลี่ยนแปลง กรณีที่ตรวจสอบแล้วตรงเงื่อนไขจะนำหนังสือรหัสที่ได้ไปดำเนินการต่อในบรรทัดที่ 26-28 แต่ถ้าไม่ตรงเงื่อนไขจะดำเนินการในบรรทัดที่ 5

บรรทัดที่ 5 : ตรวจสอบตัวแปรบูลลีน *flagFindMAX* เพื่อตรวจสอบว่าควรดำเนินการหาคำรหัสสูงสุดหรือไม่ กรณีที่เป็นจริงจะดำเนินการในบรรทัดที่ 6 ถ้าเป็นเท็จจะดำเนินการในบรรทัดที่ 14

บรรทัดที่ 6 : หา*คำรหัสสูงสุด* โดยคำรหัสสูงสุด คือ คำรหัสที่มีค่าบิดเบือนในบริเวณแบ่งกั้นนั้นสูงที่สุด และไม่เคยเป็นคำรหัสสูงสุดมาก่อน ณ ขณะที่ขนาดหนังสือรหัสไม่เปลี่ยนแปลง รวมทั้งไม่ใช่คำรหัสใกล้เคียงในรอบการทำงานก่อนหน้า เพื่อป้องกั้นการหดและขยายบริเวณแบ่งกั้นซ้ำไปมา

บรรทัดที่ 7 : ตรวจสอบคำรหัสสูงสุด กรณีหาได้จะข้ามไปดำเนินการในบรรทัดที่ 14

บรรทัดที่ 8 : หาบริเวณแบ่งกั้นที่มีค่าบิดเบือนสูง

บรรทัดที่ 9 : เพิ่มขนาดหนังสือรหัสด้วยวิธีตามหัวข้อ 3.1 และ ปรับหนังสือรหัสเข้าเซนทรอยด์ตามลำดับ ในส่วนนี้จะได้หนังสือรหัสชุดใหม่ที่ประกอบด้วยจำนวนคำรหัสมากขึ้น

บรรทัดที่ 10 : แบ่งกั้นข้อมูลและปรับหนังสือรหัสเข้าสู่เซนทรอยด์

บรรทัดที่ 11 : หาคำรหัสสูงสุด

บรรทัดที่ 14 : ปรับค่าตัวแปรบูลลีน *flagFindMAX* เป็นจริง

บรรทัดที่ 15 : ทำการหา*คำรหัสใกล้เคียง* โดยคำรหัสใกล้เคียง คือ คำรหัสที่มีข้อมูลในบริเวณแบ่งกั้นเดียวกันอยู่ใกล้กับคำรหัสสูงสุด เพื่อป้องกั้นการหดและขยายบริเวณแบ่งกั้นซ้ำไปมาเช่นกัน

บรรทัดที่ 16-18 : ตรวจสอบคำรหัสใกล้เคียง กรณีไม่พบจะดำเนินการหาคำรหัสสูงสุดในรอบถัดไป ภายหลังการตรวจสอบในบรรทัดที่ 4

บรรทัดที่ 19 : หดและขยายบริเวณแบ่งกั้นของคำรหัสสูงสุดและคำรหัสใกล้เคียงตามลำดับ ด้วยวิธีการตามหัวข้อที่ 3.2.1 ในส่วนนี้มีการส่งค่าตัวแปรบูลลีน *flagback* คืนมาด้วย โดยตัวแปรนี้ ใช้ตรวจสอบว่าเกิดการย้อนกลับเมื่อผลจากการทำส่วนนี้ให้ค่าบิดเบือนที่ไม่ต่ำลงหรือไม่

บรรทัดที่ 20-24 : ตรวจสอบค่าบิดเบือนของคำรหัสสูงสุดว่าน้อยกว่าค่าบิดเบือนทั้งหมดหรือไม่ ในกรณีที่ค่าบิดเบือนคำรหัสสูงสุดน้อยกว่าแล้วจะดำเนินการหาคำรหัสสูงสุดในรอบถัดไป ภายหลังการตรวจสอบในบรรทัดที่ 4 แต่ในกรณีกลับกันจะปรับค่าตัวแปรบูลลีน *flagFindMAX* เป็นเท็จเพื่อให้การดำเนินการในรอบถัดไป ไม่ต้องเปลี่ยนคำรหัสสูงสุดเพียงแต่เปลี่ยนคำรหัสใกล้เคียงเท่านั้น

บรรทัดที่ 26-28 : เมื่อดำเนินการจนกระทั่งตรวจพบการลู่เข้าของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าบิดเบือนแล้ว จะดำเนินการแบ่งกั้นข้อมูลและปรับหนังสือรหัสเข้าสู่เซนทรอยด์ ตามหัวข้อ 3.2.2 เรื่อยๆจนกระทั่งหนังสือรหัสไม่เปลี่ยนแปลง เพื่อให้หนังสือรหัสที่ได้ประกอบด้วยคำรหัสที่อยู่ ณ ตำแหน่งเซนทรอยด์ของข้อมูลในแต่ละบริเวณแบ่งกั้นอย่างแท้จริง

บรรทัดที่ 29 : ส่งหนังสือรหัสที่ได้เป็นผลลัพธ์ของอัลกอริทึม

ขั้นตอนการทำงานดังที่กล่าวไปแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมเอวีคิวจะทำการคำนวณหาหนังสือรหัสโดยผู้ใช้ไม่ต้องระบุขนาดหนังสือรหัส และค่าบิดเบือน เนื่องจากอัลกอริทึมจะทำการหดและขยายบริเวณแบ่งกั้นเพื่อเป็นการปรับหาค่าหนังสือรหัสที่ให้ค่าบิดเบือนที่ต่ำลง ก่อนที่จะทำการเพิ่มขนาดหนังสือรหัส หรือเพิ่มจำนวนคำรหัสทีละ 1 คำ ซึ่งการทำงานดังกล่าวช่วยให้ได้ค่าบิดเบือนที่ต่ำลงมากกว่าการเพิ่มขนาดหนังสือรหัสเพียงอย่างเดียว และการพิจารณาการลู่เข้าของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าบิดเบือนนั้นเกิดจากแนวคิดที่จะยุติการทำงานของอัลกอริทึมเมื่อค่าบิดเบือนทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยในระดับหนึ่ง ซึ่งกำหนดไว้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงจะน้อยกว่า 0.001 โดยการทดลองในบทต่อไปจะแสดงให้เห็นว่าการกำหนดระดับความเปลี่ยนแปลงที่ค่า 0.001นี้ สามารถให้หนังสือรหัสที่น่าพอใจ มีค่าบิดเบือนต่ำและใช้เวลาในการประมวลผลไม่มากนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การเปรียบเทียบผลการทดลอง

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมเอวีคิวกับอัลกอริทึมอื่น จะทำการเปรียบเทียบในส่วนของ ค่าบิดเบือนและขนาดหนังสือรหัส โดยอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบคือ อัลกอริทึมแอลบีจี ซึ่งเป็นอัลกอริทึมดั้งเดิมที่ได้รับความนิยมและเป็นพื้นฐานของอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นในภายหลัง และอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่นำเสนอเมื่อไม่นานมานี้ โดยในส่วนของอัลกอริทึมแอลบีจีใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบค่าบิดเบือนเพียงอย่างเดียว แต่ในส่วนของอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีนั้น เนื่องจากมีทางเลือกให้ผู้ใช้กำหนดได้ทั้งขนาดหนังสือรหัสและค่าบิดเบือน ดังนั้นจึงใช้อัลกอริทึมนี้เปรียบเทียบทั้งในส่วนของการเปรียบเทียบค่าบิดเบือนและการเปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัส ข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดลองประกอบด้วยข้อมูลรูปภาพขาวดำ 2 มิติ และข้อมูลเสียงที่มีจำนวนหลายมิติ โดยข้อมูลรูปภาพจะมีภาพที่ถูกใช้ในงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องรวมอยู่ด้วย และในส่วนของข้อมูลเสียงได้นำข้อมูลเสียงพูดมาจากฐานข้อมูลโลตัส [15] หรือฐานข้อมูลเสียงพูดภาษาไทยขนาดใหญ่สำหรับระบบรู้จำเสียงพูดภาษาไทย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นมาตรฐาน และป้องกันความลำเอียงที่เกิดจากชุดข้อมูลที่นำมาทดสอบ โดยรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ก. ข้อมูลรูปภาพ 2 มิติ

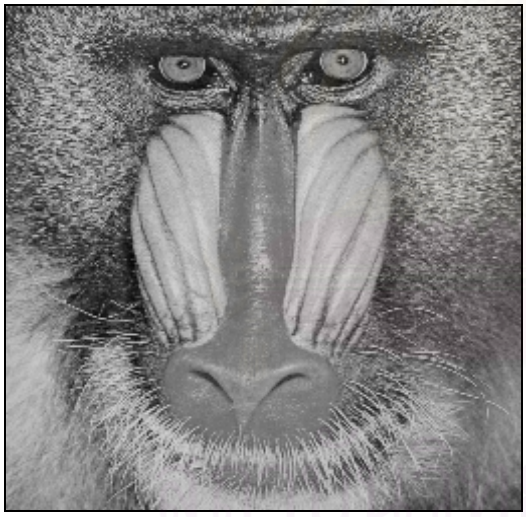
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดชุดข้อมูลภาพ 2 มิติ

ชุดที่	ประเภทข้อมูล	ขนาด (เวกเตอร์)	รูปภาพตัวอย่าง
1	ภาพเครื่องบิน	7,036	รูปที่ 4.1
2	ภาพลีน่า	24,289	รูปที่ 4.2
3	ภาพลิงบาบู	16,906	รูปที่ 4.3
4	ภาพพระเกี้ยว	8,171	รูปที่ 4.4
5	ภาพตัวอักษร	3,376	รูปที่ 4.5
6	ภาพโค้ง	1,591	รูปที่ 4.6
7	ภาพที่ไม่มีโครงสร้างข้อมูลชัดเจน	5,627	รูปที่ 4.7
8	ข้อมูลสุ่ม	300	รูปที่ 4.8
9	ภาพวงรี	416	รูปที่ 4.9
10	ภาพหัวใจ	395	รูปที่ 4.10
11	ภาพข้อมูลเป็นกลุ่ม	390	รูปที่ 4.11
12	ภาพคำถาม	586	รูปที่ 4.12

จากตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดและขนาดของข้อมูลรูปภาพ โดยภาพชุดที่ 1 ภาพชุดที่ 2 และ ภาพชุดที่ 3 เป็นภาพที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยอื่นๆ โดยลักษณะของรูปภาพมีดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.1 ภาพเครื่องบิน

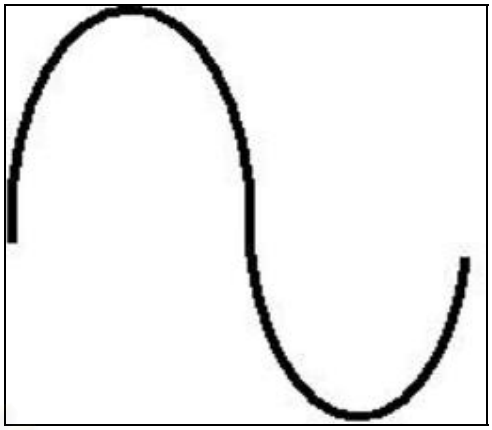
รูปที่ 4.2 ภาพลีน่า



รูปที่ 4.3 ภาพลิงบาบู

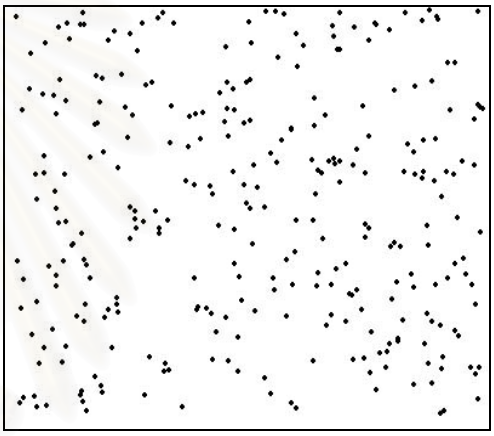
รูปที่ 4.4 ภาพพระเกี้ยว

รูปที่ 4.5 ภาพตัวอักษร

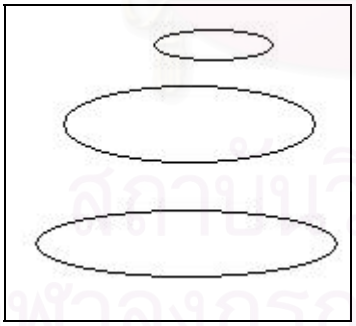


รูปที่ 4.6 ภาพโค้ง

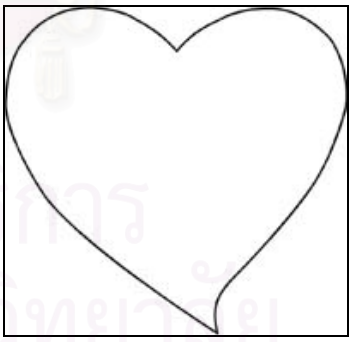
รูปที่ 4.7 ภาพที่ไม่มีโครงสร้างข้อมูลชัดเจน



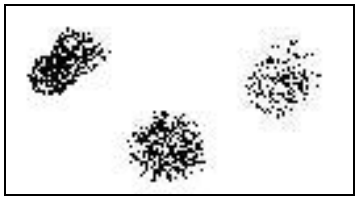
รูปที่ 4.8 ภาพข้อมูลสุ่ม



รูปที่ 4.9 ภาพวงรี



รูปที่ 4.10 ภาพหัวใจ



รูปที่ 4.11 ภาพข้อมูลเป็นกลุ่ม

รูปที่ 4.12 ภาพคำถาม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. ข้อมูลเสียง

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดชุดข้อมูลเสียง

ชุดที่	ข้อความเสียง	ขนาด (มิติ)	ขนาด (เวกเตอร์)
1	รัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทยเป็นกฎหมายสูงสุดของประเทศ	5, 13, 15	667
2	รัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทยเป็นกฎหมายสูงสุดของประเทศที่กล่าวถึงกฎเกณฑ์ในการปกครองประเทศ	13	1,111
3	สมการที่1	5, 10	233
4	เราได้ความรู้จากนักปราชญ์ชาวกรีก	5, 13	456
5	จากผลการทดสอบสามารถดูได้จากกราฟข้างล่างนี้	15, 20	550
6	อัตราเร็วของการพิมพ์ข้อมูลเข้าจะขึ้นอยู่กับความสามารถของพนักงานที่ทำการพิมพ์ดีด	10	928
7	แต่จะมีข้อผิดพลาดในด้านของข้อมูลที่จะป้อน เช่น แพทย์ไม่ได้กรอกข้อมูลในแบบกรอกข้อมูลให้ครบ	15, 20	988
8	ผู้ใช้สามารถเรียกค้นตามชื่อ ประเภทต่างๆ เช่น ชื่อไทย ชื่อวิทยาศาสตร์ ชื่อพ้อง หรือชื่ออื่นๆที่ปรากฏบนจอได้	5, 20	1,197
9	หนึ่ง สอง	13	417
10	หนึ่ง	10, 13	89

ข้อมูลที่แสดงในข้างต้นแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของข้อมูลทั้งในส่วนของชนิดข้อมูล มิติ และปริมาณของข้อมูลซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาทำการทดลองกับอัลกอริทึมที่กล่าวไปแล้ว โดยแต่ละชุดข้อมูลจะถูกนำมาทำการประมวลผลด้วยอัลกอริทึมแอลบีจี และอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีทั้งสิ้น 250 ครั้งต่อ 1 ชุดข้อมูล แล้วจึงนำค่าเฉลี่ยมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิว เนื่องจาก ทั้งสองอัลกอริทึมนั้นมีกระบวนการสุ่มอยู่ในขั้นตอนการทำงาน ทำให้แต่ละครั้งในการทำงานให้ผลที่แตกต่างกัน แต่ในส่วนของอัลกอริทึมเอวีคิวนั้นทุกครั้งที่ทำงานจะให้ผลลัพธ์เหมือนเดิมจึงนำข้อมูลแต่ละชุดมาประมวลผลเพียงครั้งเดียวต่อ 1 ชุดข้อมูล ในส่วนของการเตรียมข้อมูลก่อนทำการทดลองนั้น ภาพจะถูกปรับให้เป็นภาพขาวดำแล้วทำการเก็บข้อมูลสีดำในรูปแบบเวกเตอร์โดยใช้คำสั่งในโปรแกรม MATLAB [16, 17] ในส่วนของเสียงจะนำข้อมูลเสียงมาปรับให้อยู่ในรูปแบบเวกเตอร์โดยใช้โปรแกรม เฮชทีเค (Hidden Markov Model Toolkit : HTK) [18] เมื่อทำการเตรียมข้อมูลเรียบร้อยแล้วได้ทำการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 การเปรียบเทียบค่าบิดเบือน

ในส่วนนี้จะทำการทดลองกับอัลกอริทึมเอวิคิวก่อน แล้วนำขนาดหนังสือรหัสที่ได้จากผลลัพธ์มาทำการระบุให้กับอีก 2 อัลกอริทึมที่ใช้ในการเปรียบเทียบ แล้วจึงนำค่าบิดเบือนเฉลี่ยมาเปรียบเทียบกับค่าบิดเบือนที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิว ได้ผลดังตารางที่ 4.3

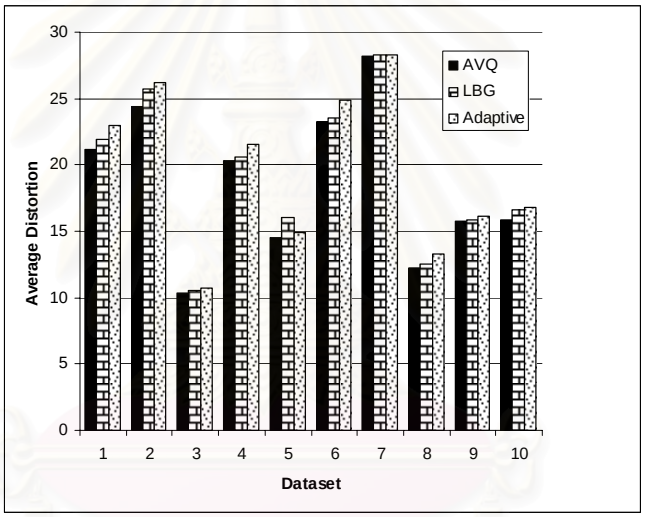
ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบค่าบิดเบือนเฉลี่ย

ลำดับที่	ข้อมูลที่ใช้ทดลอง	ขนาด (มิติ)	ค่าบิดเบือนเฉลี่ย			ขนาดหนังสือรหัส (คำ)
			เอวีคิว	แอลบีจี	ปรับเพิ่มเติมแอลบีจี	
1	ข้อมูลภาพชุดที่ 1	2	21.20570	21.91676	22.96681	8
2	ข้อมูลภาพชุดที่ 2	2	24.41400	25.69475	26.20939	11
3	ข้อมูลภาพชุดที่ 3	2	10.33940	10.50260	10.74867	6
4	ข้อมูลภาพชุดที่ 4	2	20.35040	20.59616	21.51939	10
5	ข้อมูลภาพชุดที่ 5	2	14.49080	16.07851	14.92430	9
6	ข้อมูลภาพชุดที่ 6	2	23.23310	23.57405	24.88860	6
7	ข้อมูลภาพชุดที่ 7	2	28.19770	28.30011	28.27454	5
8	ข้อมูลภาพชุดที่ 8	2	12.20870	12.55355	13.27508	9
9	ข้อมูลภาพชุดที่ 9	2	15.76310	15.89804	16.11379	8
10	ข้อมูลภาพชุดที่ 10	2	15.85310	16.57947	16.80970	9
11	ข้อมูลภาพชุดที่ 11	2	6.07610	6.97718	6.11177	6
12	ข้อมูลภาพชุดที่ 12	2	11.41780	11.66034	11.60197	5
13	ข้อมูลเสียงชุดที่ 1	5	6.72338	6.87175	7.04017	11
14	ข้อมูลเสียงชุดที่ 1	13	14.50720	14.84021	14.80574	6
15	ข้อมูลเสียงชุดที่ 1	15	14.42130	14.49800	14.62255	8
16	ข้อมูลเสียงชุดที่ 2	13	14.43480	14.71304	14.89094	6
17	ข้อมูลเสียงชุดที่ 3	5	5.10849	5.19493	5.16480	14
18	ข้อมูลเสียงชุดที่ 3	10	11.18670	11.87143	11.56319	6
19	ข้อมูลเสียงชุดที่ 4	5	7.87049	8.01949	8.08556	9
20	ข้อมูลเสียงชุดที่ 4	13	14.73140	14.88124	14.83847	9
21	ข้อมูลเสียงชุดที่ 5	15	17.54730	17.91360	17.79857	6
22	ข้อมูลเสียงชุดที่ 5	20	17.71010	17.91718	17.79381	7
23	ข้อมูลเสียงชุดที่ 6	10	7.88940	8.06707	8.23945	11
24	ข้อมูลเสียงชุดที่ 7	15	19.43070	19.57349	19.59692	4

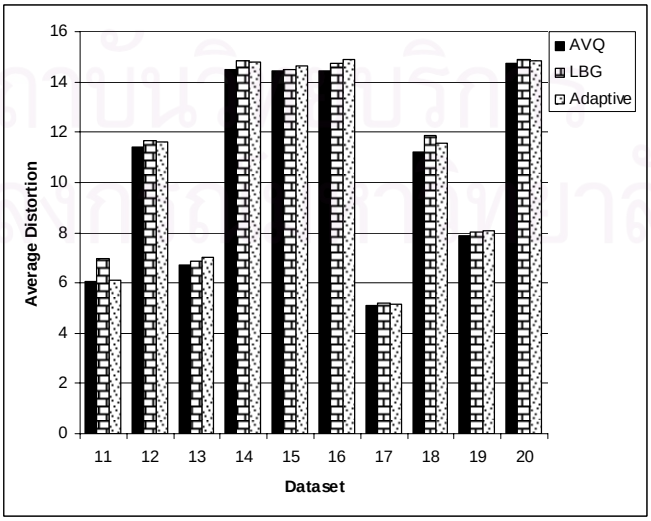
ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบค่าบิดเบือนเฉลี่ย(ต่อ)

ลำดับที่	ข้อมูลที่ใช้ทดลอง	ขนาด (มิติ)	ค่าบิดเบือนเฉลี่ย			ขนาดหนังสือรหัส (คำ)
			เอวีคิว	แอลบีจี	ปรับเพิ่มเติมแอลบีจี	
25	ข้อมูลเสียงชุดที่ 7	20	21.00100	21.03800	21.08323	3
26	ข้อมูลเสียงชุดที่ 8	5	8.49430	8.64012	8.92075	9
27	ข้อมูลเสียงชุดที่ 8	20	20.04000	20.16519	20.35353	4
28	ข้อมูลเสียงชุดที่ 9	13	10.33940	10.50260	10.74867	6
29	ข้อมูลเสียงชุดที่ 10	10	6.95942	7.12085	7.10493	7
30	ข้อมูลเสียงชุดที่ 10	13	7.68180	7.93830	7.97409	10

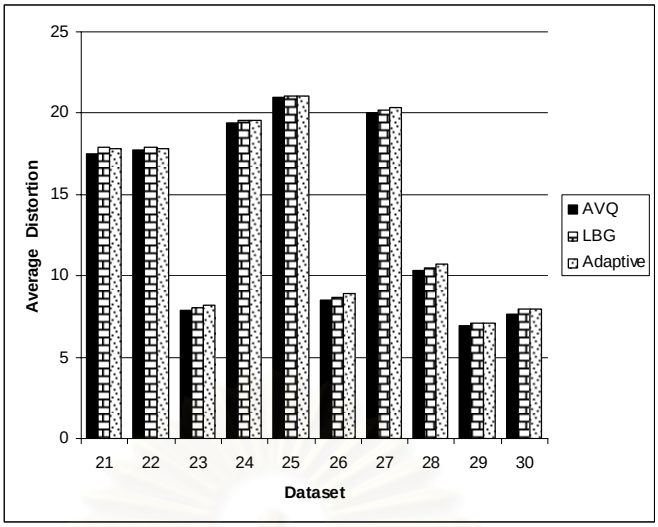
จากค่าบิดเบือนในตารางด้านบนนำมาเปรียบเทียบด้วยกราฟ ได้ดังรูปที่ 4.13(ก)–(ค)



(ก) ค่าบิดเบือนเฉลี่ยชุดข้อมูลที่ 1 - 10



(ข) ค่าบิดเบือนเฉลี่ยชุดข้อมูลที่ 11 – 20



(ค) ค่าบิดเบือนเฉลี่ยชุดข้อมูลที่ 21 - 30

รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าบิดเบือนเฉลี่ยของทุกอัลกอริทึม

จากตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าบิดเบือนเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองของทั้ง 3 อัลกอริทึม โดยใช้ขนาดหนังสือรหัสที่แสดงในช่องสุดท้ายเป็นค่าที่ใช้กำหนดให้กับอัลกอริทึมแอลบีจี และ อัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี ซึ่งค่านี้ได้จากขนาดหนังสือรหัสที่เป็นผลลัพธ์ของอัลกอริทึมเอวีคิว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมเอวีคิวนี้ให้ค่าบิดเบือนที่ต่ำกว่าอีก 2 อัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบเมื่อใช้หนังสือรหัสที่มีขนาดเท่ากันภายใต้ข้อมูลที่นำมาทดสอบนี้ โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นพิจารณาความเหมาะสมของหนังสือรหัสจากค่าบิดเบือนที่ว่า หนังสือรหัสที่มีค่าบิดเบือนต่ำ แสดงว่าหนังสือรหัสสามารถใช้สื่อถึงข้อมูลจริงได้ดี ดังนั้นจากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่า หนังสือรหัสที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิวสามารถให้หนังสือรหัสที่สื่อถึงข้อมูลจริงได้ดีกว่าอัลกอริทึมแอลบีจี และ อัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี อีกทั้งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของค่าบิดเบือนที่มีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละชุดข้อมูล จึงเป็นการยากแก่การกำหนดค่าของผู้ใช้

ในส่วนของเหตุผลที่นำข้อมูลเหล่านี้มาใช้ในการทดสอบเนื่องจากต้องการความหลากหลาย และคุณลักษณะพิเศษ ของข้อมูลรวมทั้งบางส่วนเป็นข้อมูลที่เคยใช้ในการทดลองของงานวิจัยอื่นๆ เช่น ภาพชุดที่ 1 ภาพชุดที่ 2 และ ภาพชุดที่ 3 เป็นภาพที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยอื่นๆ ภาพชุดที่ 8 เป็นข้อมูลที่เกิดจากการสุ่มเวกเตอร์ขึ้น ภาพชุดที่ 11 เป็นภาพที่มีการเกาะกลุ่มของข้อมูลอย่างชัดเจน และภาพอื่นๆเป็นภาพทั่วไปที่เน้นความหลากหลายด้านปริมาณเวกเตอร์ หรือปริมาณข้อมูลนั่นเอง โดยทางด้านเสียงนั้นก็เช่นกัน เพื่อต้องการความหลากหลายในด้านปริมาณและมิติ อีกทั้งในบางชุดข้อมูลมีการนำข้อมูลเสียง 13 มิติมาทดสอบเนื่องจากการนำข้อมูลเสียงไปประยุกต์ใช้โดยทั่วไปจะเลือกใช้ข้อมูลเวกเตอร์ที่ 13 มิติ และการนำข้อมูลทั้งในส่วนของรูปภาพและเสียงมาใช้ก็เพื่อทดสอบว่าอัลกอริทึมสามารถทำงานได้กับข้อมูลหลากหลายมิติ

4.2 การเปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัส

ในส่วนของการเปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัสนี้จะทำการทดลองด้วยการนำข้อมูลทดสอบทั้งหมด 30 ชุด ดังที่กล่าวไปข้างต้นมาทำการทดสอบกับอัลกอริทึมเอวีคิวก่อนเพื่อให้ได้หนังสือรหัสที่เป็นผลลัพธ์ แล้วนำค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสที่ได้มาระบุให้กับอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีเพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบ โดยในส่วนของอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีนี้ มีการสุ่มหาหนังสือรหัสซึ่งทำให้แต่ละครั้งที่ทำการทดลองอัลกอริทึมดังกล่าวจะให้หนังสือรหัสที่เป็นผลลัพธ์แตกต่างกันไป จึงทำให้ต้องใช้ค่าเฉลี่ยของขนาดหนังสือรหัสที่ได้ในการเปรียบเทียบ ซึ่งจะทำการประมวลผลอัลกอริทึมจำนวน 250 ครั้งต่อ 1 ชุดข้อมูลจะได้ผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบแสดงให้เห็นดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัสเฉลี่ย

ลำดับที่	ข้อมูลที่ใช้ทดลอง	ขนาด (มิติ)	ขนาดหนังสือรหัสเฉลี่ย		ค่าบิดเบือน
			เอวีคิว	ปรับเพิ่มเติมแอลบีจี	
1	ข้อมูลภาพชุดที่ 1	2	8	9.91	21.20570
2	ข้อมูลภาพชุดที่ 2	2	11	12.63	24.41400
3	ข้อมูลภาพชุดที่ 3	2	6	7.42	10.33940
4	ข้อมูลภาพชุดที่ 4	2	10	12.00	20.35040
5	ข้อมูลภาพชุดที่ 5	2	9	10.00	14.49080
6	ข้อมูลภาพชุดที่ 6	2	6	7.00	23.23310
7	ข้อมูลภาพชุดที่ 7	2	5	6.00	28.19770
8	ข้อมูลภาพชุดที่ 8	2	9	10.86	12.20870
9	ข้อมูลภาพชุดที่ 9	2	8	9.11	15.76310
10	ข้อมูลภาพชุดที่ 10	2	9	10.00	15.85310
11	ข้อมูลภาพชุดที่ 11	2	6	6.92	6.07610
12	ข้อมูลภาพชุดที่ 12	2	5	6.00	11.41780
13	ข้อมูลเสียงชุดที่ 1	5	11	13.45	6.72338
14	ข้อมูลเสียงชุดที่ 1	13	6	7.22	14.50720
15	ข้อมูลเสียงชุดที่ 1	15	8	8.98	14.42130
16	ข้อมูลเสียงชุดที่ 2	13	6	7.43	14.43480
17	ข้อมูลเสียงชุดที่ 3	5	14	15.10	5.10849
18	ข้อมูลเสียงชุดที่ 3	10	6	7.25	11.18670
19	ข้อมูลเสียงชุดที่ 4	5	9	10.47	7.87049

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัสเฉลี่ย (ต่อ)

ลำดับที่	ข้อมูลที่ใช้ทดลอง	ขนาด (มิติ)	ขนาดหนังสือรหัสเฉลี่ย		ค่าบิดเบือน
			เอวีคิว	ปรับเพิ่มเติมแอลบีจี	
20	ข้อมูลเสียงชุดที่ 4	13	9	10.16	14.73140
21	ข้อมูลเสียงชุดที่ 5	15	6	7.20	17.54730
22	ข้อมูลเสียงชุดที่ 5	20	7	8.03	17.71010
23	ข้อมูลเสียงชุดที่ 6	10	11	13.61	7.88940
24	ข้อมูลเสียงชุดที่ 7	15	4	5.00	19.43070
25	ข้อมูลเสียงชุดที่ 7	20	3	4.00	21.00100
26	ข้อมูลเสียงชุดที่ 8	5	9	11.11	8.49430
27	ข้อมูลเสียงชุดที่ 8	20	4	5.00	20.04000
28	ข้อมูลเสียงชุดที่ 9	13	6	7.43	10.33940
29	ข้อมูลเสียงชุดที่ 10	10	7	8.43	6.95942
30	ข้อมูลเสียงชุดที่ 10	13	10	12.12	7.68180

จากตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัส ซึ่งวัดจากปริมาณคำรหัสที่เป็นผลลัพธ์เมื่อใช้การกำหนดค่าบิดเบือนที่เท่ากัน ซึ่งเห็นได้ว่า เมื่อใช้ข้อมูลเวกเตอร์จากรูปภาพซึ่งเป็นเวกเตอร์ 2 มิติหรือเป็นข้อมูลเวกเตอร์จากเสียงที่มีหลากหลายมิติ อัลกอริทึมเอวีคิวที่เสนอนี้ให้หนังสือรหัสที่มีขนาดเล็กกว่าอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี และจากหลักการของออคแคม (Ockham's Razor หรือ Occam's Razor) [19] ที่อธิบายว่า ทฤษฎีหรือคำอธิบายไม่ควรซับซ้อนเกินความจำเป็น และแนะนำให้เลือกโมเดลที่ง่าย ในกรณีที่โมเดลที่ซับซ้อนให้ความถูกต้องได้ไม่ดีกว่า ดังนั้นจากขนาดหนังสือที่เล็กกว่าและค่าบิดเบือนที่กำหนดให้แสดงว่า อัลกอริทึมเอวีคิวให้ผลลัพธ์ที่เล็กกว่า ในขณะที่ความบิดเบือนจากข้อมูลจริงเท่ากัน ดังนั้นหนังสือรหัสที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิว สมควรถูกเลือกไปใช้มากกว่าการนำหนังสือรหัสซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าที่ได้จากอีกอัลกอริทึมไปใช้ อีกทั้งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของขนาดหนังสือรหัสที่มีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละชุดข้อมูล จึงเป็นการยากแก่การกำหนดค่าของผู้ใช้

เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลการทดลองที่ได้จาก อัลกอริทึมเอวีคิวให้ค่าบิดเบือนที่ต่ำกว่าอัลกอริทึมแอลบีจีและอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี จึงต้องใช้วิธีทางสถิติ [20] เพื่อพิจารณาว่าอัลกอริทึมเอวีคิวให้ค่าบิดเบือนต่ำกว่าอัลกอริทึมแอลบีจี และ อัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีอย่างมีนัยสำคัญ (significant) หรือไม่จึงใช้วิธีทดสอบแบบจับคู่ โดยขั้นแรกจะทดสอบก่อนว่าชุดข้อมูลค่าบิดเบือนของทั้ง 3 อัลกอริทึมมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ เนื่องจากจำนวนกรณี

ทดสอบมีไม่เกิน 50 ตัว จึงใช้การทดสอบแบบแชพิโล วิลค์ (Shapiro-Wilk) ซึ่งตั้งสมมติฐานไว้ 3 ข้อ ดังนี้

1. การแจกแจงของค่าบิดเบือนที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิวมีการแจกแจงแบบปกติ
2. การแจกแจงของค่าบิดเบือนที่ได้จากอัลกอริทึมแอลบีจีมีการแจกแจงแบบปกติ
3. การแจกแจงของค่าบิดเบือนที่ได้จากอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีมีการแจกแจงแบบปกติ

โดยในการทดสอบกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.01 จากการทดสอบสมมติฐานที่ 1 ได้ค่า p = 0.351 สมมติฐานที่ 2 ได้ค่า p = 0.356 และ สมมติฐานที่ 3 ได้ค่า p = 0.348 ซึ่งค่าเหล่านี้มากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานที่ตั้งไว้ได้ ดังนั้นจึงได้ว่า ทั้ง 3 อัลกอริทึมนี้มีการแจกแจงค่าบิดเบือนแบบปกติที่ความเชื่อมั่น 99%

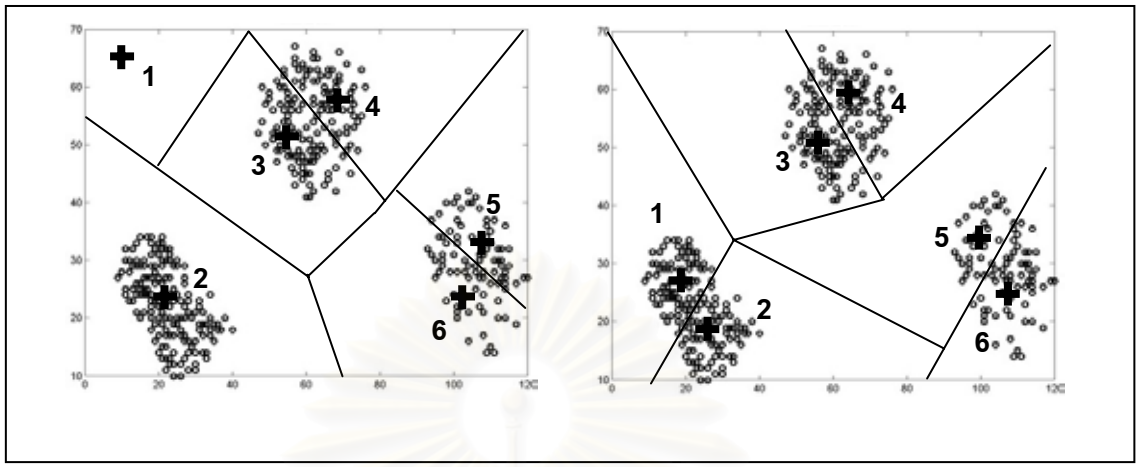
เนื่องจากข้อมูลค่าบิดเบือนทั้ง 3 ชุดมีการแจกแจงแบบปกติจึงใช้การทดสอบที่ใช้พารามิเตอร์ (parametric) คือ การทดสอบผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากรแบบจับคู่ โดยตั้งสมมติฐานไว้ 2 ข้อ ดังนี้

1. ค่าบิดเบือนเฉลี่ยของอัลกอริทึมเอวีคิวต่ำกว่าค่าบิดเบือนเฉลี่ยของอัลกอริทึมแอลบีจี
2. ค่าบิดเบือนเฉลี่ยของอัลกอริทึมเอวีคิวต่ำกว่าค่าบิดเบือนเฉลี่ยของอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี

โดยในการทดสอบกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.01 จากการทดสอบสมมติฐานแรกได้ค่า p = 0.000 และ t = -5.224 สมมติฐานที่ 2 ได้ค่า p = 0.000 และ t = -5.194 ซึ่งจะเห็นได้ว่า t มีค่าเป็นลบ และ p มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานทั้งสองได้ ดังนั้นจึงได้ว่าโดยเฉลี่ยแล้วค่าบิดเบือนของอัลกอริทึมเอวีคิวต่ำกว่าอัลกอริทึมแอลบีจี และ อัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีที่ความเชื่อมั่น 99 %

การทดลองที่นำเสนอนั้นทุกครั้งที่ทำการประมวลผลตามอัลกอริทึมเอวีคิว ค่าหนังสือรหัสที่ได้จะเหมือนกันทุกครั้งที่ทำการทดลอง เนื่องจากในส่วนของอัลกอริทึมมีการกำหนดหลักเกณฑ์ หรือวิธีการทำงานที่แน่นอนและชัดเจน ไม่ขึ้นกับการสุ่มค่า ในส่วนของการเปรียบเทียบค่าบิดเบือนที่กล่าวไปแล้ว เมื่อพิจารณาระหว่างอัลกอริทึมเอวีคิวและอัลกอริทึมแอลบีจี พบว่าอัลกอริทึมเอวีคิวให้ค่าบิดเบือนที่ต่ำกว่า เนื่องมาจากสาเหตุที่อัลกอริทึมแอลบีจีนั้นมีการสุ่มหาหนังสือรหัสตั้งต้นซึ่งมีขนาดเท่ากับที่ผู้ใช้ระบุ แล้วทำการปรับค่าหนังสือรหัสจากหนังสือรหัสตั้งต้นไปเรื่อยๆ และด้วยวิธีการปรับค่าหนังสือรหัสที่พิจารณาเพียงให้ค่าหนังสือรหัสเป็นค่าเซนทรอยด์เพียงอย่างเดียว จึงทำให้หนังสือรหัสที่เป็นผลลัพธ์ขึ้นกับหนังสือรหัสตั้งต้นมากเกินไป ในกรณีที่สุ่มมาได้ค่าที่ไม่ดี เช่น สุ่มได้คำรหัสที่เมื่อนำไปวัดระยะห่างระหว่างคำรหัสนั้นกับข้อมูลปรากฏว่า มีระยะห่างมากเกินกว่าระยะห่างระหว่างข้อมูลกับคำรหัสอื่นๆ จึง

ทำให้เมื่อทำการปรับคำรหัสเข้าสู่เซนทรอยด์คำรหัสนี้จะไม่สื่อให้เห็นถึงข้อมูลใดเลย ดังรูปที่ 4.14(ก)



(ก) อัลกอริทึมแอลบีจี **(ข)** อัลกอริทึมเอวีคิว

รูปที่ 4.14 ตัวอย่างหนังสือรหัสที่ได้จากอัลกอริทึมแอลบีจี และ อัลกอริทึมเอวีคิว

จากรูปที่ 4.14 (ก) แสดงตัวอย่างหนังสือรหัสที่ได้จากการสุ่มหนังสือรหัสตั้งต้นที่ไม่ดีของอัลกอริทึมแอลบีจี เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.14 (ข) ที่แสดงตัวอย่างหนังสือรหัสที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิว เห็นได้ว่าจากรูป 4.14 (ก) คำรหัสที่ 1 ได้จากการสุ่มหนังสือรหัสตั้งต้นที่ไม่ดีดังที่กล่าวไปแล้วทำให้เมื่อผลสุดท้ายพบว่าคำรหัสที่ 1 ไม่ได้สื่อถึงข้อมูลตัวใดเลยทั้งที่ควรจะสามารถนำมาใช้สื่อถึงข้อมูลในบริเวณแบ่งกั้นที่ 2 ได้ แต่ถ้าใช้อัลกอริทึมเอวีคิวเหตุการณ์ดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นคำรหัสจะสามารถใช้สื่อถึงข้อมูลเสมอ เนื่องจากอัลกอริทึมเอวีคิวในส่วนของการเพิ่มขนาดหนังสือรหัสนั้นจะทำการระบุค่าคำรหัสใหม่ที่ได้จากข้อมูลที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งที่หาได้ ทำให้เมื่อทำการปรับค่าหนังสือรหัสไม่ว่าจะเป็นเช่นไรทุกคำรหัสจะต้องสื่อถึงข้อมูลอย่างแน่นอน และเมื่อพิจารณาถึงอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีจะพบว่าอัลกอริทึมนี้ก็สามารถแก้ปัญหาของอัลกอริทึมแอลบีจีได้เช่นกัน เนื่องจากในการปรับคำรหัสนั้นมีการพิจารณาถึงค่าบิดเบือนด้วยเพื่อที่จะลบคำรหัสที่ไม่สื่อถึงข้อมูลออก แต่ก็ถือเป็นการเพิ่มขั้นตอนการทำงานให้มากขึ้น เพราะนอกจากมีขั้นตอนการเพิ่มขนาดหนังสือรหัส และปรับค่าหนังสือรหัสแล้วยังคงต้องมีขั้นตอนการลดขนาดหนังสือรหัสอีก ซึ่งต่างจากอัลกอริทึมเอวีคิวที่จะทำการปรับหาค่าหนังสือรหัสที่ทำให้ค่าบิดเบือนต่ำลง ณ ขนาดหนังสือรหัสที่มี แล้วจึงทำการเพิ่มขนาดหนังสือรหัสเมื่อขนาดที่มีอยู่ไม่เพียงพอจะทำให้ค่าบิดเบือนลดลงได้อีก ดังนั้นจึงไม่ต้องอาศัยการลดขนาดหนังสือรหัส อีกประการหนึ่ง หากพิจารณาเฉพาะในขั้นตอนการเพิ่มขนาดหนังสือรหัส อัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีจะประสบปัญหาเดียวกับอัลกอริทึมแอลบีจีดังที่กล่าวไปแล้ว เนื่องจากอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีสนใจเพียงให้ขนาดหนังสือรหัสเท่ากับที่กำหนด โดยไม่สนใจว่าจะสุ่มเพิ่มคำรหัสไม่สื่อถึงข้อมูลหรือไม่ จึงจำเป็นที่จะต้องมีกระบวนการในการลดขนาดหนังสือรหัสลง ในกรณีที่ให้ผู้ใช้ระบุค่าบิดเบือนก็เช่นกัน สนใจเพียงการเพิ่ม

ขนาดหนังสือรหัสเพื่อให้ค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสไม่เกินที่กำหนด ทำให้ไม่ได้สนใจว่าค่าหนังสือรหัสที่ได้ประกอบด้วยคำรหัสที่ไม่สื่อถึงข้อมูลหรือไม่ ดังนั้นจึงต้องอาศัยกระบวนการลดขนาดหนังสือรหัสเพื่อลบคำรหัสเหล่านี้ทิ้ง และยังคงต้องกลับมาทำการเพิ่มขนาดหนังสือรหัสอีกเพื่อให้หนังสือรหัสที่ได้ตรงตามที่ผู้ใช้กำหนด

4.3 การศึกษาความสัมพันธ์ของมิติ ค่าบิดเบือน และ ขนาดหนังสือรหัส

ในส่วนนี้จะทำการทดลองเพิ่มเติมจากงานวิจัย เพื่อศึกษาเพิ่มเติมใน 2 ด้าน คือ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมิติของข้อมูลที่นำมาทดสอบกับขนาดของหนังสือรหัสที่เป็นผลลัพธ์ และ ความสัมพันธ์ระหว่างมิติของข้อมูลที่นำมาทดสอบกับค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสผลลัพธ์เช่นกัน โดยจะทำการเปรียบเทียบข้อมูลเสียง 6 ชุดที่มีจำนวนหลายมิติ โดยจะทำการทดลองกับข้อมูลตั้งแต่ 5 มิติ จนกระทั่งถึง 24 มิติ โดยลักษณะของข้อมูลที่ใช้ในการทดลองมี 6 ชุดดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ลักษณะข้อมูลเสียงที่ใช้ในการทดสอบ

ชุดที่	ข้อความเสียง	ขนาด (เวกเตอร์)
1	สมการที่1	233
2	เราได้ความรู้จากนักปราชญ์ชาวกรีก	456
3	จากผลการทดสอบสามารถดูได้จากกราฟข้างล่างนี้	550
4	อัตราเร็วของการพิมพ์ข้อมูลเข้าจะขึ้นอยู่กับความสามารถของพนักงานที่ทำการพิมพ์ดีด	928
5	แต่จะมีข้อผิดพลาดในด้านของข้อมูลที่จะป้อน เช่น แพทย์ไม่ได้กรอกข้อมูลในแบบกรอกข้อมูลให้ครบ	988
6	ผู้ใช้สามารถเรียกค้นตามชื่อ ประเภทต่างๆ เช่น ชื่อไทย ชื่อวิทยาศาสตร์ ชื่อพ้อง หรือชื่ออื่นๆที่ปรากฏบนจอได้	1,197

ในส่วนของกระบวนการหาค่าบิดเบือนและขนาดหนังสือรหัสที่นำมาเปรียบเทียบนั้น ใช้วิธีการเหมือนการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ซึ่งผลจากการศึกษาเป็นดังต่อไปนี้

4.3.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมิติของข้อมูลกับค่าบิดเบือน

ค่าบิดเบือนที่ได้จากการทดลองด้วยข้อมูล 6 ชุดจำนวนหลายมิติ และค่าบิดเบือนเฉลี่ยของข้อมูลทั้ง 6 ชุด จะแสดงในตารางต่อไปนี้ โดยผลที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิวแสดงใน

ตารางที่ 4.6 อัลกอริทึมแอลบีจีแสดงในตารางที่ 4.7 และ อัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีแบบกำหนดขนาดหนังสือรหัสแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าบิดเบือนของอัลกอริทึมเอวีคิวในหลายมิติ

ชุดข้อมูล / มิติ	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย
5	5.1085	7.8705	16.3835	16.1512	7.9384	8.4943	10.3244
6	6.5988	9.8648	15.5977	9.7977	11.0098	11.2800	10.6915
7	7.8178	11.8102	12.6054	12.7201	14.0434	12.9017	11.9831
8	9.0712	12.0686	11.7581	13.0974	15.6821	14.0945	12.6286
9	9.0810	11.6382	13.5300	16.2360	14.8036	15.4740	13.4605
10	11.1867	15.5098	10.6624	7.8894	14.3928	15.8744	12.5859
11	12.6486	18.7733	16.1689	16.6644	18.4152	16.0664	16.4561
12	11.2297	16.1789	17.2431	16.9062	17.2534	17.8773	16.1148
13	13.3272	14.7314	16.6418	17.7273	18.7351	18.5510	16.6190
14	11.7687	16.6696	16.8521	18.4957	20.0250	17.7975	16.9348
15	12.8840	17.0471	17.5473	18.4115	19.4307	18.8390	17.3599
16	13.0734	15.8041	17.6765	19.1979	20.0627	18.9468	17.4602
17	13.6917	15.8862	19.4424	18.9834	20.7655	18.6507	17.9033
18	12.0465	17.3289	17.6298	19.6772	18.0351	19.9023	17.4366
19	12.6644	17.6080	17.4409	19.2240	20.9529	19.9901	17.9801
20	12.9190	16.5336	17.7101	19.2737	21.0010	20.0400	17.9129
21	13.8838	16.5528	18.3645	19.2920	21.0225	19.0513	18.0278
22	14.8288	17.5840	18.3671	19.2944	19.0539	21.0252	18.3589
23	14.8292	17.5844	18.3676	19.2949	21.0256	19.0543	18.3593
24	14.8292	17.5844	18.3676	19.2949	21.0256	19.0543	18.3593

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าบิดเบือนของอัลกอริทึมแอลบีจีในหลายมิติ

ชุดข้อมูล / มิติ	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย
5	5.1949	8.0195	16.7420	16.5099	8.0230	8.6401	10.5216
6	6.7105	10.3161	15.9466	10.0818	11.2752	11.3204	10.9418
7	8.3171	12.3016	12.8522	12.9116	13.7876	13.0612	12.2052
8	9.7020	12.6135	12.0652	13.4438	15.8248	14.0189	12.9447
9	9.6151	11.9238	14.0607	16.3269	14.6421	15.6044	13.6955
10	11.8714	16.1300	10.9785	8.0671	14.5448	15.9853	12.9295
11	12.4914	18.3376	16.7251	16.5035	18.5410	16.1989	16.4663
12	11.4214	16.5296	17.3926	17.1395	17.5579	18.0264	16.3446
13	13.4449	14.8827	17.2594	17.8071	18.8395	18.6721	16.8176
14	12.2646	16.8773	16.9981	18.8744	20.0919	17.9634	17.1783
15	13.4772	17.1191	17.9136	18.6599	19.5735	18.8482	17.5986
16	13.6469	16.2219	18.0883	19.0131	19.8238	19.0924	17.6477
17	14.3841	16.3417	19.5399	19.2757	20.8275	18.7306	18.1833
18	12.5181	17.5573	17.7929	20.0307	18.3101	20.0433	17.7087
19	13.0042	17.6945	17.8965	19.5174	21.0109	20.1060	18.2049
20	13.4062	17.1273	17.9172	19.5519	21.0380	20.1652	18.2010
21	14.5639	17.0746	18.5416	19.5897	21.0898	19.0880	18.3246
22	15.2957	17.7526	18.5030	19.5769	21.0977	19.0870	18.5522
23	15.2434	17.7908	18.5306	19.5882	21.1026	19.0961	18.5586
24	15.2206	17.6922	18.4991	19.5754	21.1090	19.0850	18.5302

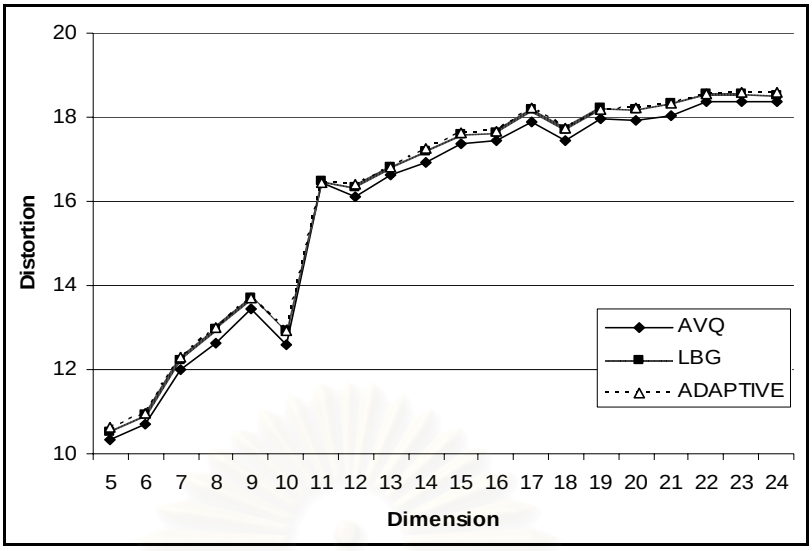
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าบิดเบือนของอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีในหลายมิติ

ชุดข้อมูล / มิติ	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย
5	5.1648	8.0856	16.6535	16.6915	8.2304	8.9208	10.6244
6	6.7507	10.2774	15.5997	10.2593	11.4217	11.5750	10.9806
7	8.0969	12.2078	13.2160	13.0893	13.9492	13.2555	12.3024
8	9.4236	12.5498	12.3625	13.5781	15.7134	14.3316	12.9932
9	9.3314	11.9405	14.0015	16.3463	14.8333	15.8674	13.7201
10	11.5632	15.8044	11.1031	8.2395	14.6247	16.2588	12.9323
11	12.1735	18.1030	16.8988	16.5954	18.4987	16.4247	16.4490
12	11.3279	16.3102	17.5376	17.2655	17.7946	18.2603	16.4160
13	13.1905	14.8379	17.1677	17.9376	18.8503	18.9324	16.8194
14	12.1323	17.0130	17.0173	19.0703	20.1206	18.1461	17.2499
15	13.2452	17.2839	17.7986	18.7709	19.5969	19.0383	17.6223
16	13.4573	16.2226	17.9720	19.0984	19.8429	19.3187	17.6520
17	14.3609	16.4451	19.5211	19.3292	20.8517	18.9212	18.2382
18	12.3545	17.6796	17.6556	20.2235	18.2911	20.2291	17.7389
19	12.7588	17.8295	17.7075	19.5671	21.0345	20.3042	18.2003
20	13.2199	17.1497	17.7938	19.6396	21.0832	20.3535	18.2066
21	14.5075	17.1633	18.4195	19.6452	21.1085	19.2508	18.3491
22	15.1697	17.8360	18.3875	19.6273	21.1115	19.2522	18.5640
23	15.1801	17.8789	18.4083	19.6399	21.1107	19.2517	18.5783
24	15.1934	17.8899	18.4029	19.6545	21.1111	19.2672	18.5865

จากตารางที่ 4.6-4.8 แสดงให้เห็นถึงค่าบิดเบือนที่ได้จากการทดลองกับ 3 อัลกอริทึมโดยในช่องสุดท้ายเป็นค่าบิดเบือนเฉลี่ยของข้อมูลทั้ง 6 ชุด ซึ่งนำมาแสดงเป็นกราฟให้เห็นได้ชัดในรูปที่ 4.15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบมิติข้อมูลกับค่าบิดเบือนเฉลี่ย

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างมิติของข้อมูลกับค่าบิดเบือนด้วยการทดลองกับ 3 อัลกอริทึมดังที่กล่าวไปแล้วนั้น จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่า เมื่อข้อมูลที่นำมาทำการแบ่งนับเวกเตอร์มีมิติที่สูงขึ้น ค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสที่ได้รับก็จะสูงขึ้นตาม เนื่องจากว่าเมื่อข้อมูลมีมิติที่สูงขึ้น การกระจายตัวของข้อมูลจะสูงขึ้น ทำให้หนังสือรหัสที่ได้เป็นตัวแทนของข้อมูลที่ไกลกันมากขึ้น ดังนั้นระยะห่างระหว่างข้อมูลและคำรหัสจะมีค่ามากขึ้นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสที่ได้ แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองทำให้เห็นได้ว่าอัลกอริทึมเอวีคิวนั้นถึงแม้จะใช้กับข้อมูลที่มีจำนวนมิติมากขึ้นแต่ก็ให้ค่าบิดเบือนเฉลี่ยที่ต่ำกว่าอีก 2 อัลกอริทึม

4.3.2 หาความสัมพันธ์ระหว่างมิติของข้อมูลกับขนาดหนังสือรหัส

ขนาดหนังสือรหัสที่ได้จากการทดลองด้วยข้อมูล 6 ชุดจำนวนหลายมิติ และขนาดหนังสือรหัสเฉลี่ยของข้อมูลทั้ง 6 ชุด จะแสดงในตารางต่อไปนี้ โดยผลที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิวแสดงในตารางที่ 4.9 และ อัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีแบบกำหนดค่าบิดเบือนแสดงในตารางที่ 4.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัสของอัลกอริทึมเอวีคิวในหลายมิติ

ชุดข้อมูล / มิติ	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย
5	14	9	4	5	11	9	8.67
6	10	6	2	9	6	6	6.50
7	8	5	5	6	4	5	5.50
8	7	6	8	7	3	5	6.00
9	9	9	6	4	6	4	6.33
10	6	4	4	11	8	5	6.33
11	6	3	5	6	3	6	4.83
12	9	5	5	6	5	4	5.67
13	6	9	6	6	4	4	5.83
14	9	6	7	5	3	6	6.00
15	7	6	6	4	5	6	5.67
16	7	8	6	6	4	5	6.00
17	6	8	4	6	3	6	5.50
18	10	6	7	5	7	4	6.50
19	9	6	7	6	3	4	5.83
20	8	7	7	6	3	4	5.83
21	6	7	6	6	3	6	5.67
22	5	6	6	6	3	6	5.33
23	5	6	6	6	3	6	5.33
24	5	6	6	6	3	6	5.33

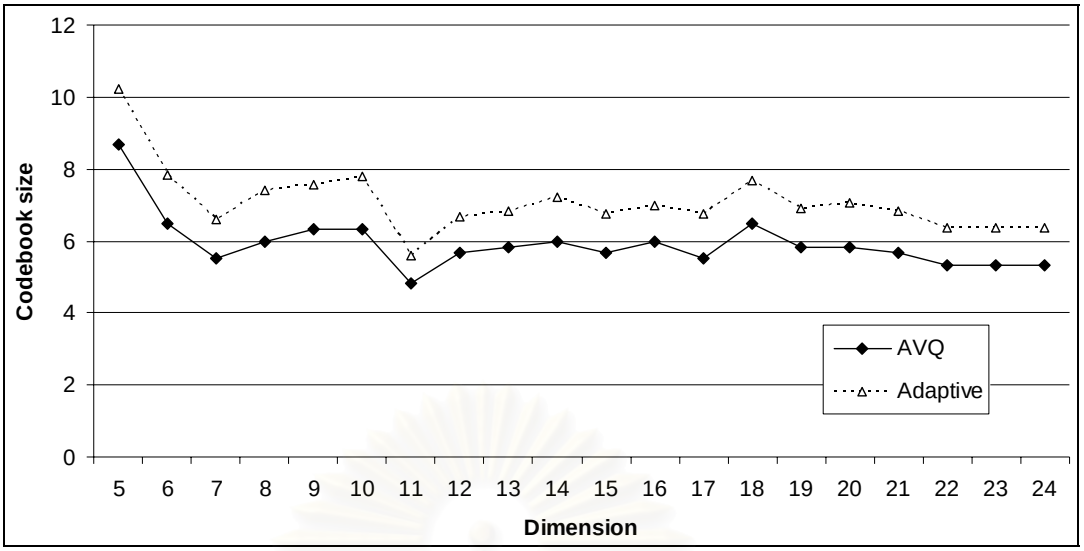
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัสของอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีในหลายมิติ

ชุดข้อมูล / มิติ	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย
5	15.11	10.47	5.34	6.40	12.89	11.11	10.22
6	11.42	7.64	2.79	11.11	7.07	7.03	7.84
7	9.43	6.04	6.58	7.14	4.21	6.20	6.60
8	8.12	8.04	9.76	8.47	4.00	6.13	7.42
9	10.30	10.91	7.37	4.98	6.66	5.06	7.55
10	7.25	5.15	5.24	13.61	9.40	6.17	7.80
11	5.82	3.32	6.46	6.39	4.00	7.48	5.58
12	9.82	5.76	6.02	7.39	6.12	5.00	6.68
13	6.28	10.04	7.84	6.91	5.00	5.00	6.85
14	10.83	7.16	8.06	6.06	4.00	7.16	7.21
15	8.32	6.75	7.20	5.00	6.02	7.17	6.74
16	8.34	9.53	7.43	6.23	4.25	6.12	6.98
17	7.31	9.92	5.04	7.11	4.00	7.12	6.75
18	11.78	7.21	7.86	6.14	8.06	5.00	7.68
19	10.06	6.82	8.46	7.15	4.00	5.00	6.91
20	9.42	8.92	8.03	7.10	4.00	5.00	7.08
21	7.30	8.89	6.72	7.11	4.00	7.02	6.84
22	6.14	7.11	6.80	7.10	4.00	7.03	6.36
23	6.02	7.13	6.82	7.14	4.00	7.02	6.35
24	6.08	7.18	6.80	7.11	4.00	7.03	6.37

จากตารางที่ 4.9-4.10 แสดงให้เห็นถึงขนาดหนังสือรหัสที่ได้จากการทดลองกับ 3 อัลกอริทึมโดยในช่องสุดท้ายเป็นขนาดหนังสือรหัสเฉลี่ยของข้อมูลทั้ง 6 ชุด ซึ่งนำมาแสดงเป็นกราฟให้เห็นได้ชัดในรูปที่ 4.16

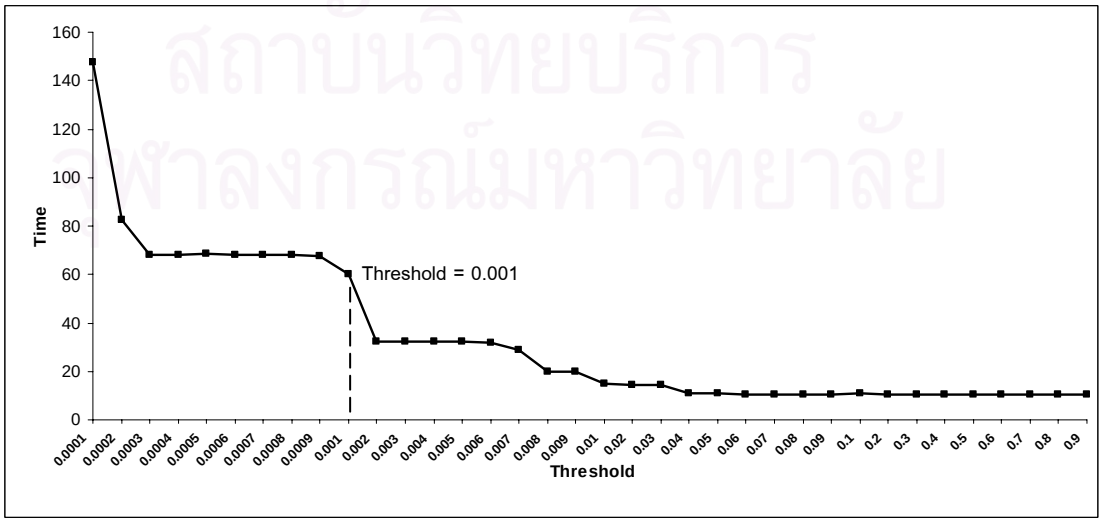
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



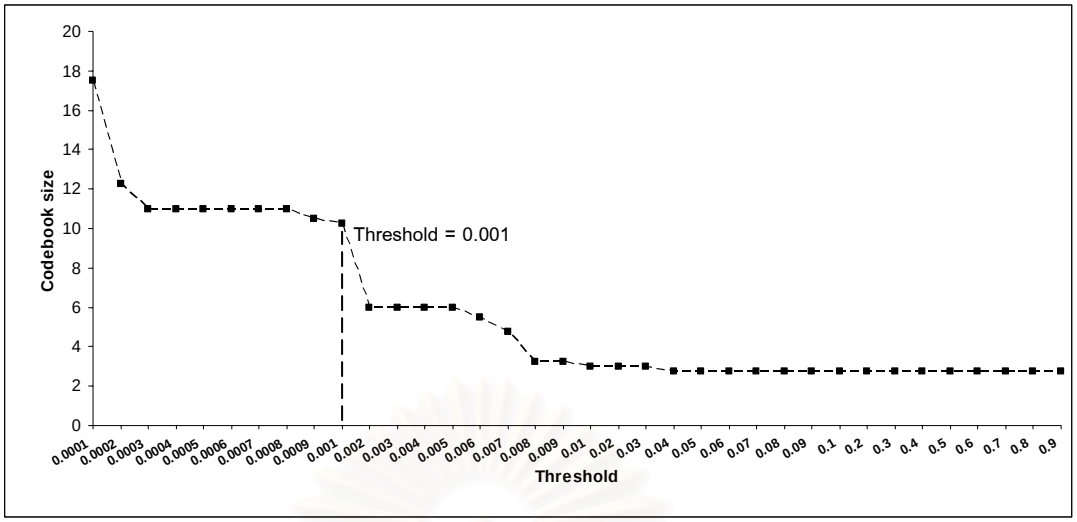
รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบมิติข้อมูลกับขนาดหนังสือรหัสเฉลี่ย

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างมิติของข้อมูลกับขนาดหนังสือรหัสที่ได้รับด้วยการทดลองอัลกอริทึมเอวีคิว กับ อัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่า มิติไม่มีผลกับขนาดหนังสือรหัสที่ได้รับ เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มมิติของข้อมูลให้สูงขึ้น บางช่วงขนาดหนังสือรหัสมีค่าที่เพิ่มขึ้น บางช่วงมีค่าที่ลดลง แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองทำให้เห็นได้ว่าอัลกอริทึมเอวีคิวนั้นถึงแม้จะใช้กับข้อมูลที่มีจำนวนมิติมากขึ้นแต่ก็ให้ขนาดหนังสือรหัสที่ต่ำกว่าอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี

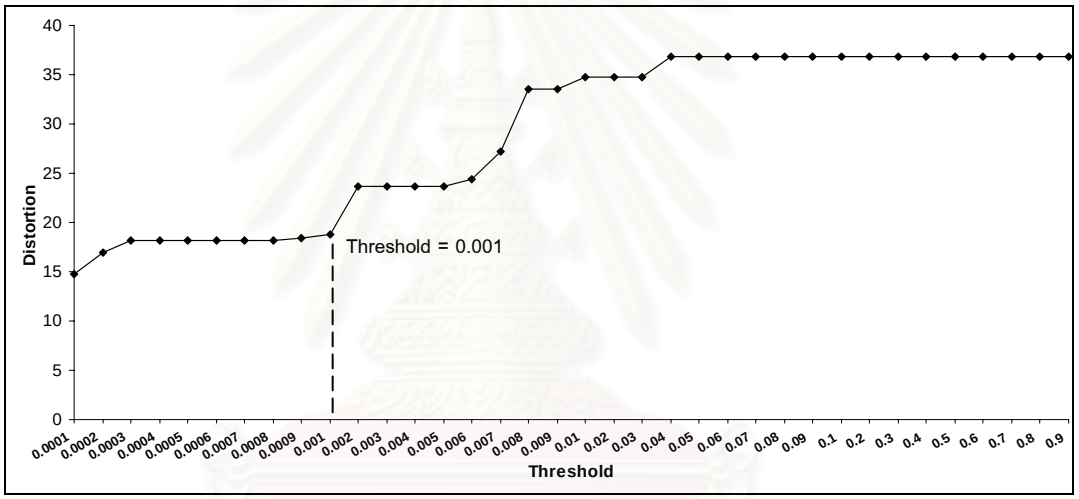
ในส่วนของการพิจารณาการลู่เข้าของค่าบิดเบือนจะพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าบิดเบือนที่ต่ำกว่าค่าขีดแบ่ง (Threshold) 0.001 ซึ่งค่านี้ได้มาจากการศึกษาผลการเปรียบเทียบปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ประการ คือ เวลาในการประมวลผล ขนาดของหนังสือรหัสและค่าบิดเบือนที่ได้จากการแบ่งนับเวกเตอร์ เมื่อทดลองกำหนดค่าขีดแบ่งต่างๆกัน ปรากฏผลดังรูปที่ 4.17 – 4.19



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าขีดแบ่งและเวลาในการประมวลผล



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าขีดแบ่งและขนาดหนังสือรหัส



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบค่าขีดแบ่งและค่าบิดเบือน

จากรูปที่ 4.17-4.19 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่กำหนดค่าขีดแบ่งน้อยจะทำให้มีการประมวลผลหลายครั้ง ทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลสูงขึ้นและขนาดของหนังสือรหัสจะถูกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงส่งผลให้ได้ค่าบิดเบือนที่ต่ำลง แต่ในกรณีที่กำหนดค่าขีดแบ่งมากจะส่งผลให้ได้ขนาดหนังสือรหัสที่เล็กค่าบิดเบือนที่ได้ก็จะสูง ดังนั้นจึงทำให้เห็นว่าควรเลือกค่าขีดแบ่งที่มีค่ามากที่สุด ในช่วงค่าที่ทำให้ได้ค่าบิดเบือนน้อย และใช้เวลาไม่มาก ซึ่งจากรูปเหล่านี้ทำให้ตัดสินใจเลือกค่าขีดแบ่งที่ 0.001 มาใช้พิจารณาการลู่เข้าของค่าบิดเบือน

4.4 การเปรียบเทียบด้านเวลา

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการทดลอง และได้นำฟังก์ชันมาตรฐาน tic,toc มาใช้ในการวัดผลด้านเวลา โดยจะทำการเปรียบเทียบเวลาที่ได้จาก 2 การทดลอง ดังนี้

4.4.1 เวลาที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบค่าบิดเบือนของหนังสือรหัส

เป็นการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทดลองหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิว อัลกอริทึมแอลบีจี และอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี โดยผลการเปรียบเทียบเวลาที่ได้ในแต่ละอัลกอริทึมแสดงในตารางที่ 4.11

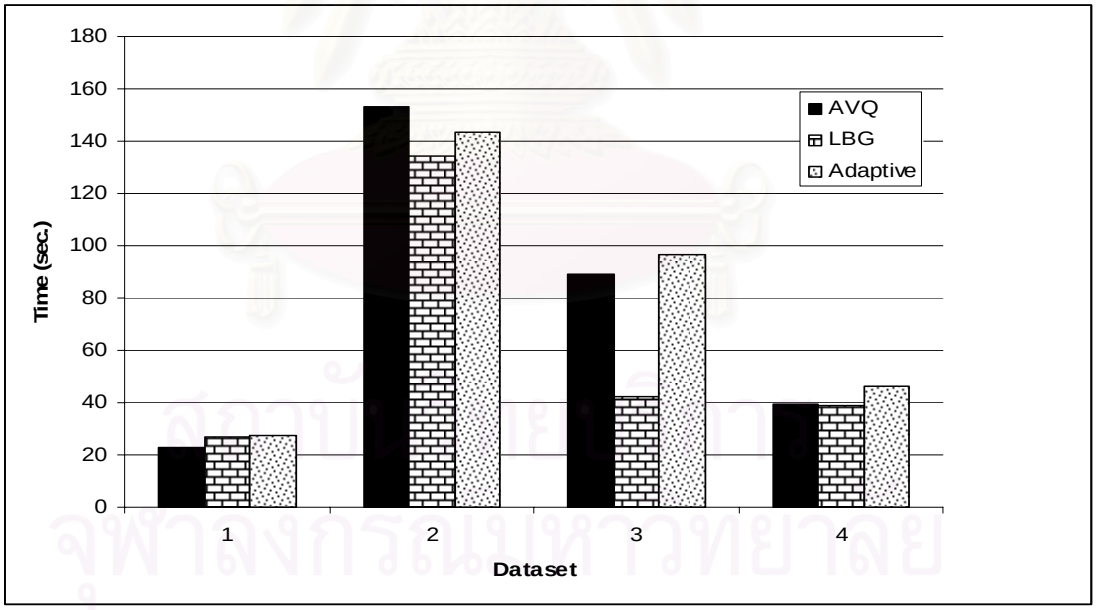
ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบเวลาในการประมวลผลการทดลองที่4.1

ลำดับที่	ข้อมูลที่ใช้ทดลอง	ขนาด (มิติ)	เวลาเฉลี่ย (วินาที)		
			เอวีคิว	แอลบีจี	ปรับเพิ่มเติมแอลบีจี
1	ข้อมูลภาพชุดที่ 1	2	22.672	26.657	27.235
2	ข้อมูลภาพชุดที่ 2	2	153.406	134.110	143.672
3	ข้อมูลภาพชุดที่ 3	2	88.968	42.343	96.782
4	ข้อมูลภาพชุดที่ 4	2	39.359	38.719	46.328
5	ข้อมูลภาพชุดที่ 5	2	11.703	10.500	8.594
6	ข้อมูลภาพชุดที่ 6	2	3.531	4.234	3.765
7	ข้อมูลภาพชุดที่ 7	2	9.671	6.266	14.531
8	ข้อมูลภาพชุดที่ 8	2	1.234	0.875	0.765
9	ข้อมูลภาพชุดที่ 9	2	1.281	0.969	1.344
10	ข้อมูลภาพชุดที่ 10	2	1.703	1.360	1.078
11	ข้อมูลภาพชุดที่ 11	2	0.812	0.922	0.750
12	ข้อมูลภาพชุดที่ 12	2	1.078	0.750	1.578
13	ข้อมูลเสียงชุดที่ 1	5	4.547	2.969	2.844
14	ข้อมูลเสียงชุดที่ 1	13	1.578	1.828	3.609
15	ข้อมูลเสียงชุดที่ 1	15	3.390	3.016	4.672
16	ข้อมูลเสียงชุดที่ 2	13	2.516	3.890	6.688
17	ข้อมูลเสียงชุดที่ 3	5	2.657	1.094	0.859
18	ข้อมูลเสียงชุดที่ 3	10	0.828	0.719	0.953
19	ข้อมูลเสียงชุดที่ 4	5	2.735	1.516	1.953

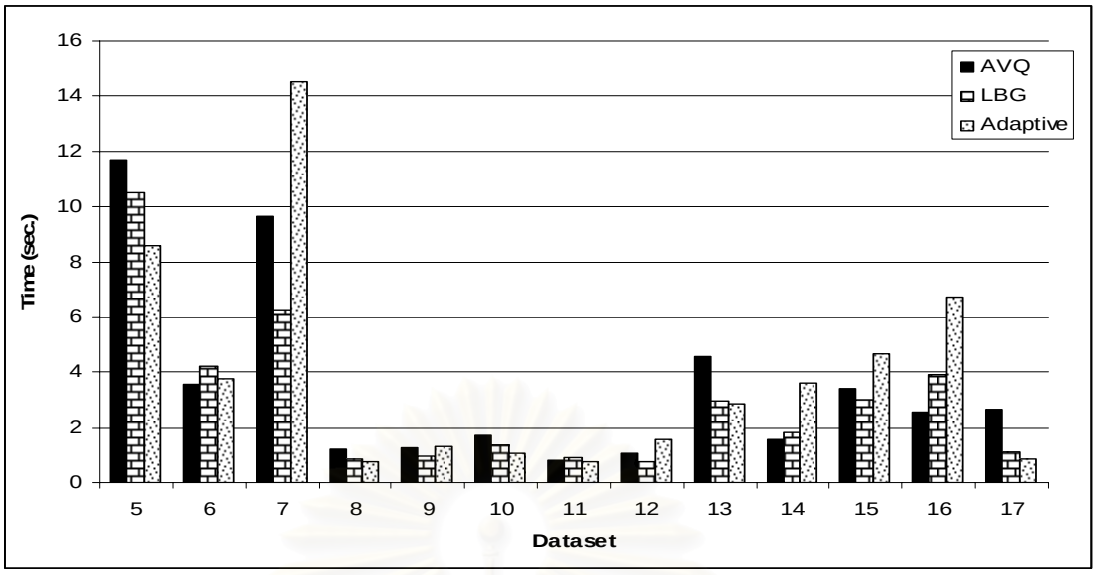
ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบเวลาในการประมวลผลการทดลองที่4.1 (ต่อ)

ลำดับที่	ข้อมูลที่ใช้ทดลอง	ขนาด (มิติ)	เวลาเฉลี่ย (วินาที)		
			เอวีคิว	แอลบีจี	ปรับเพิ่มเติมแอลบีจี
20	ข้อมูลเสียงชุดที่ 4	13	2.562	1.875	2.719
22	ข้อมูลเสียงชุดที่ 5	20	2.047	2.296	3.375
23	ข้อมูลเสียงชุดที่ 6	10	6.312	4.969	3.891
24	ข้อมูลเสียงชุดที่ 7	15	1.532	1.984	4.906
25	ข้อมูลเสียงชุดที่ 7	20	1.140	1.047	5.406
26	ข้อมูลเสียงชุดที่ 8	5	6.703	4.407	5.875
27	ข้อมูลเสียงชุดที่ 8	20	1.546	3.687	14.859
28	ข้อมูลเสียงชุดที่ 9	13	1.218	0.984	2.437
29	ข้อมูลเสียงชุดที่ 10	10	0.547	0.313	0.422
30	ข้อมูลเสียงชุดที่ 10	13	0.750	0.422	0.438

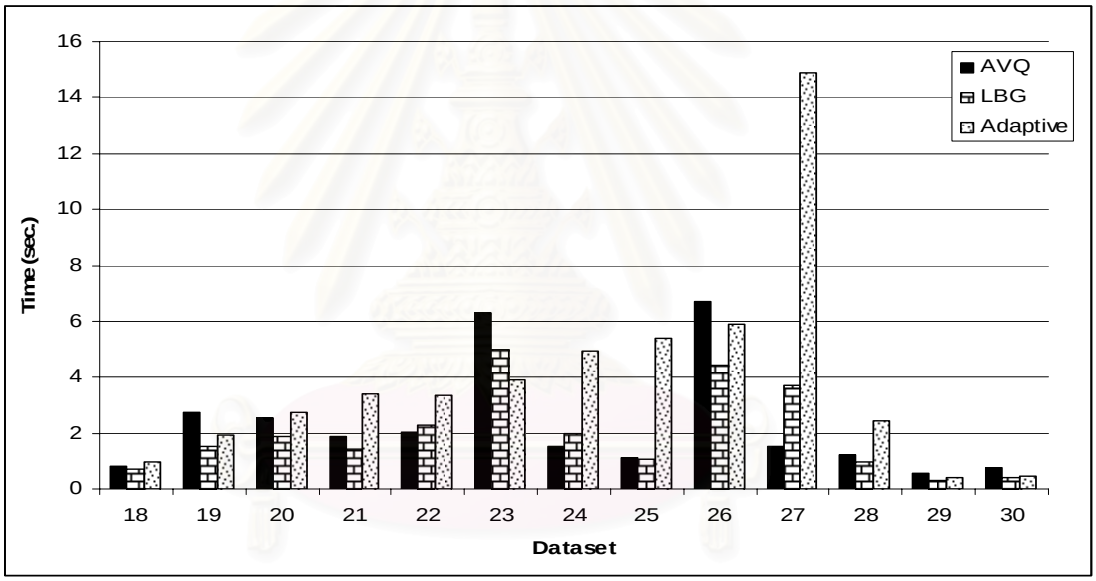
จากการเปรียบเทียบเวลาในตารางด้านบนนำมาเปรียบเทียบด้วยกราฟ ได้ดังรูปที่ 4.20(ก)–(ค)



(ก) เวลาเฉลี่ยในการประมวลผลชุดข้อมูลที่ 1 - 4



(ข) เวลาเฉลี่ยในการประมวลผลชุดข้อมูลที่ 5 - 17



(ค) เวลาเฉลี่ยในการประมวลผลชุดข้อมูลที่ 18 – 30

รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลการทดลองที่ 4.1

จากรูปที่ 4.20 แสดงเวลาที่ใช้ในการประมวลผลตามการทดลองที่ 4.1 ของแต่ละอัลกอริทึม แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมทั้งสามที่ประกอบด้วยอัลกอริทึมเอวีคิว อัลกอริทึมแอลบีจี และอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีนั้นใช้เวลาในการประมวลผลใกล้เคียงกัน

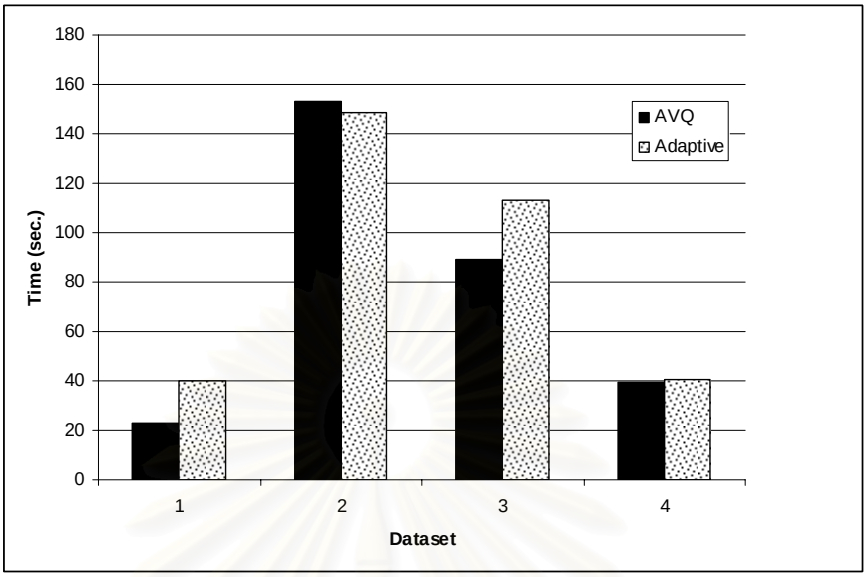
4.4.2 เวลาที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัส

เป็นการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการทดลองหัวข้อที่ 4.2 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัสที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิวและอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจี โดยผลการเปรียบเทียบเวลาที่ได้ในแต่ละอัลกอริทึมแสดงในตารางที่ 4.12

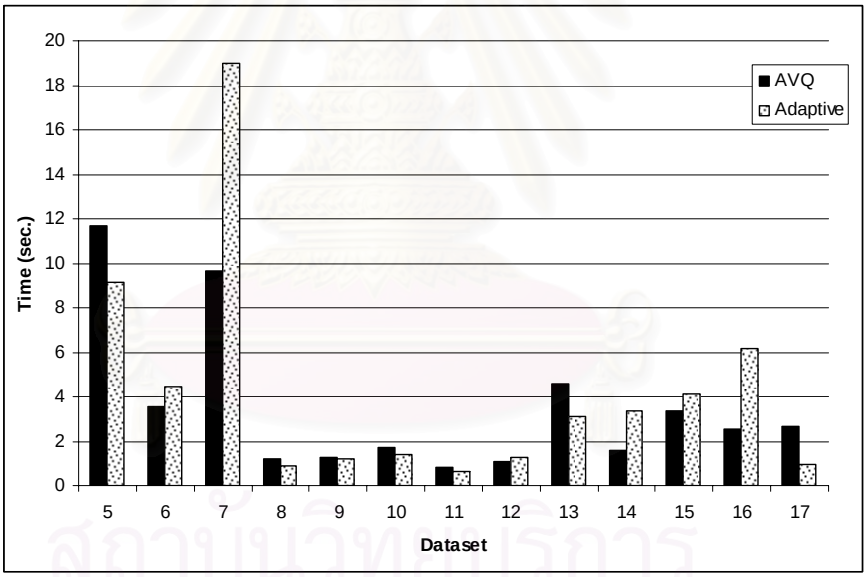
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบเวลาในการประมวลผลการทดลองที่4.2

ลำดับที่	ข้อมูลที่ใช้ทดลอง	ขนาด (มิติ)	เวลาเฉลี่ย (วินาที)	
			เอวีคิว	ปรับเพิ่มเติมแอลบีจี
1	ข้อมูลภาพชุดที่ 1	2	22.672	27.235
2	ข้อมูลภาพชุดที่ 2	2	153.406	143.672
3	ข้อมูลภาพชุดที่ 3	2	88.968	96.782
4	ข้อมูลภาพชุดที่ 4	2	39.359	46.328
5	ข้อมูลภาพชุดที่ 5	2	11.703	8.594
6	ข้อมูลภาพชุดที่ 6	2	3.531	3.765
7	ข้อมูลภาพชุดที่ 7	2	9.671	14.531
8	ข้อมูลภาพชุดที่ 8	2	1.234	0.765
9	ข้อมูลภาพชุดที่ 9	2	1.281	1.344
10	ข้อมูลภาพชุดที่ 10	2	1.703	1.078
11	ข้อมูลภาพชุดที่ 11	2	0.812	0.75
12	ข้อมูลภาพชุดที่ 12	2	1.078	1.578
13	ข้อมูลเสียงชุดที่ 1	5	4.547	2.844
14	ข้อมูลเสียงชุดที่ 1	13	1.578	3.609
15	ข้อมูลเสียงชุดที่ 1	15	3.390	4.672
16	ข้อมูลเสียงชุดที่ 2	13	2.516	6.688
17	ข้อมูลเสียงชุดที่ 3	5	2.657	0.859
18	ข้อมูลเสียงชุดที่ 3	10	0.828	0.953
19	ข้อมูลเสียงชุดที่ 4	5	2.735	1.953
20	ข้อมูลเสียงชุดที่ 4	13	2.562	2.719
22	ข้อมูลเสียงชุดที่ 5	20	2.047	3.422
23	ข้อมูลเสียงชุดที่ 6	10	6.312	3.375
24	ข้อมูลเสียงชุดที่ 7	15	1.532	3.891
25	ข้อมูลเสียงชุดที่ 7	20	1.140	4.906
26	ข้อมูลเสียงชุดที่ 8	5	6.703	5.406
27	ข้อมูลเสียงชุดที่ 8	20	1.546	5.875
28	ข้อมูลเสียงชุดที่ 9	13	1.218	14.859
29	ข้อมูลเสียงชุดที่ 10	10	0.547	2.437
30	ข้อมูลเสียงชุดที่ 10	13	0.750	0.422

จากการเปรียบเทียบเวลาในตารางที่ 4.12 นำมาเปรียบเทียบด้วยกราฟ ได้ดังรูปที่ 4.21(ก)–(ค)

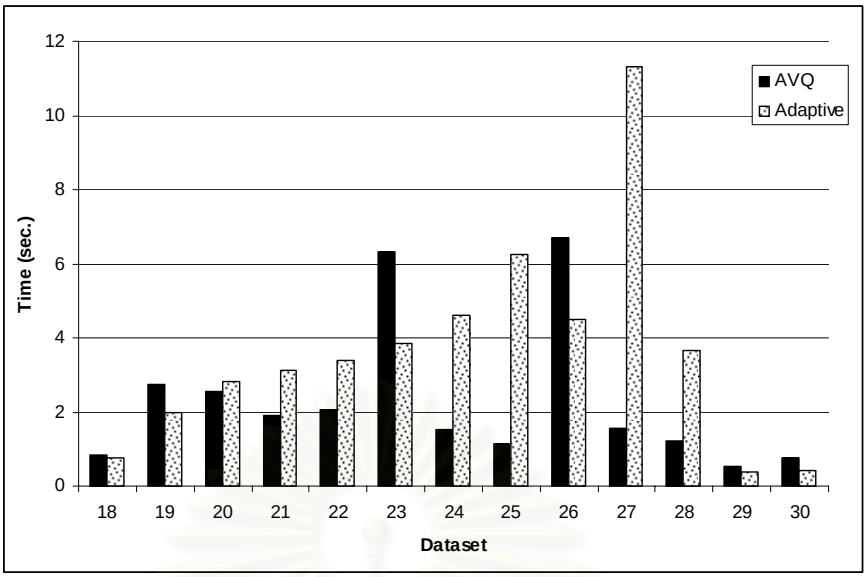


(ก) เวลาเฉลี่ยในการประมวลผลชุดข้อมูลที่ 1 - 4



(ข) เวลาเฉลี่ยในการประมวลผลชุดข้อมูลที่ 5 - 17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ค) เวลาเฉลี่ยในการประมวลผลชุดข้อมูลที่ 18 – 30

รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลการทดลองที่ 4.2

จากรูปที่ 4.21 แสดงเวลาที่ใช้ในการประมวลผลตามการทดลองที่ 4.2 ของแต่ละอัลกอริทึม แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมอัลกอริทึมเอวีคิว และอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีนั้นใช้เวลาในการประมวลผลใกล้เคียงกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การแบ่งนับเวกเตอร์เป็นการประมาณข้อมูลเวกเตอร์ที่มีจำนวนมากด้วยหนังสือรหัสที่สามารถสื่อถึงข้อมูลเวกเตอร์จริงได้ ความบิดเบือนถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการวัดความเหมาะสมของหนังสือรหัสที่ได้ เนื่องจากในงานที่นำการแบ่งนับไปใช้โดยทั่วไปให้ความสำคัญจากค่านี้ แต่การแบ่งนับเวกเตอร์ในปัจจุบันผู้ใช้งานต้องเป็นผู้กำหนดขนาดของหนังสือรหัส หรือ ค่าบิดเบือนควบคู่กับข้อมูลเวกเตอร์ที่ต้องการแบ่งนับ เพื่อใช้ในการพิจารณาการทำงานของอัลกอริทึม ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองในบทที่ผ่านมาว่าค่าบิดเบือนและขนาดหนังสือรหัสนั้นในแต่ละชุดข้อมูลมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นเรื่องยากที่ผู้ใช้จะทราบว่าค่าใดเป็นค่าที่สมควรกำหนดให้กับอัลกอริทึม วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนออัลกอริทึมสำหรับการแบ่งนับเวกเตอร์แบบอัตโนมัติที่มีชื่อว่า อัลกอริทึมเอวีคิว ที่ผู้ใช้ไม่ต้องกำหนดขนาดของหนังสือรหัสและค่าบิดเบือน เพียงระบุข้อมูลที่ใช้ในการแบ่งนับก็สามารถดำเนินการได้ โดยอัลกอริทึมใช้เทคนิคการหด-ขยายบริเวณแบ่งกั้นข้อมูลควบคู่กับการพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าบิดเบือนในขั้นตอนการเพิ่มและปรับค่าหนังสือรหัส ในส่วนของการปรับค่าหนังสือรหัสจะช่วยให้อัลกอริทึมคำนวณหาค่าหนังสือรหัสที่สามารถให้ค่าบิดเบือนที่ต่ำลงได้ในขณะที่ขนาดหนังสือรหัสเท่าเดิม แต่หากการปรับเหล่านั้นไม่สามารถช่วยให้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าบิดเบือนลู่เข้าได้อัลกอริทึมจะทำการเพิ่มขนาดหนังสือรหัสขึ้น เนื่องจากพิจารณาเห็นว่าขนาดหนังสือรหัสดังกล่าวไม่เพียงพอที่จะให้การเปลี่ยนแปลงค่าบิดเบือนอยู่ในช่วงแคบได้ จึงช่วยให้อัลกอริทึมเอวีคิวนี้สามารถคำนวณหาหนังสือรหัสที่มีค่าบิดเบือนต่ำได้โดยไม่จำเป็นต้องให้ผู้ใช้ระบุค่าบิดเบือนหรือขนาดหนังสือรหัสให้กับอัลกอริทึม

จากการพิจารณาความเหมาะสมของการแบ่งนับเวกเตอร์ที่พิจารณาว่าหาค่าบิดเบือนของหนังสือรหัสต่ำแสดงว่าหนังสือรหัสนั้นสื่อถึงข้อมูลมาก จากการทดลองในบทที่ผ่านมาเห็นได้ว่า อัลกอริทึมเอวีคิวนั้นให้ค่าบิดเบือนเฉลี่ยที่ต่ำกว่าอัลกอริทึมแอลบีจีและอัลกอริทึมปรับเพิ่มเติมแอลบีจีที่นำมาเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมเอวีคิวนี้สามารถคำนวณหาหนังสือรหัสที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลได้ดีกว่าอีกสองอัลกอริทึมสำหรับข้อมูลภาพและเสียงที่ได้นำมาทดลอง และจากการเปรียบเทียบขนาดหนังสือรหัสก็พบว่าหนังสือรหัสที่ได้จากอัลกอริทึมเอวีคิวให้ขนาดหนังสือรหัสเฉลี่ยที่เล็กกว่าอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบในขณะที่มีค่าบิดเบือนที่เท่ากัน และเมื่อพิจารณาตามแนวความคิดของออคแคมก็เชื่อได้ว่าอัลกอริทึมเอวีคิวสมควรถูกนำไปมากกว่าอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบ

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพิจารณาประสิทธิภาพการแบ่งนับเวกเตอร์จากค่าบิดเบือนของหนังสือรหัส ดังนั้นอัลกอริทึมที่นำเสนอจึงทำการหาหนังสือรหัสจากการพิจารณาค่าบิดเบือนเพียงเท่านั้น ไม่ได้พิจารณาถึงประเด็นอื่น เช่น การลู่เข้าของขนาดหนังสือรหัส หรือ ความหนาแน่นของข้อมูล เป็นต้น

อีกทั้งงานวิจัยนี้ทำการแบ่งนับเวกเตอร์โดยสนใจให้ได้ค่าบิดเบือนที่ต่ำลงด้วยการพิจารณาจากระยะห่างของข้อมูลจึง ไม่ได้สนใจในเรื่องของการกระจายตัวหรือความหนาแน่นของข้อมูล ดังนั้นในกรณีที่ข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มหนึ่งมีความหนาแน่นของข้อมูลมาก แต่อีกกลุ่มหนึ่งมีความหนาแน่นของข้อมูลน้อย และสองกลุ่มดังกล่าวอยู่ห่างกัน หนังสือรหัสที่ได้อาจจะประกอบด้วยคำรหัส 2 คำที่สื่อถึงข้อมูลทั้ง 2 กลุ่มที่ห่างกัน แต่หากเราใช้การแบ่งนับเวกเตอร์ที่พิจารณาความหนาแน่นของข้อมูลด้วยหนังสือรหัสที่ได้นั้น จะเป็น 2 คำรหัสที่สื่อถึงข้อมูลกลุ่มเดียวที่มีการเกาะกลุ่มของข้อมูลในบริเวณนั้นสูงซึ่งอาจจะทำให้ค่าบิดเบือนที่ได้ต่ำลงกว่าการพิจารณาจากระยะห่างเพียงอย่างเดียว

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. อัลกอริทึมเอวีคิวนี้มีรูปแบบอัลกอริทึมเชิงละโมบ (greedy algorithm) เนื่องจากอัลกอริทึมนี้เลือกที่จะทำการปรับค่าหนังสือรหัส หรือ เพิ่มขนาดหนังสือรหัสโดยยึดบริเวณแบ่งกั้นที่มีค่าบิดเบือนสูงสุดก่อนในทุกรอบการทำงานเพื่อให้ค่าบิดเบือนลดต่ำลง ซึ่งเป็นไปได้ว่าสุดท้ายแล้วค่าบิดเบือนที่ได้อาจไม่ใช่ค่าบิดเบือนต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นหากมีการเสริมด้วยการทำให้อัลกอริทึมมีการย้อนกลับไปดำเนินการเลือกบริเวณแบ่งกั้นที่มีค่าบิดเบือนรองลงมาก็น่าจะทำให้สามารถได้คำรหัสที่ให้ค่าบิดเบือนที่ต่ำที่สุดได้ แต่อัลกอริทึมใหม่นี้จะใช้เวลา และหน่วยความจำในการประมวลผลมากขึ้นตามไปด้วย

2. เนื่องจากอัลกอริทึมเอวีคิวมีการพิจารณาการสิ้นสุดอัลกอริทึมจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าบิดเบือนเพียงอย่างเดียวไม่ได้คำนึงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดหนังสือรหัส ดังนั้นจึงเสนอให้อัลกอริทึมที่จะพัฒนาต่อๆไป หาเทคนิค หรือวิธีการที่จะสามารถพิจารณาค่าบิดเบือนควบคู่กับขนาดหนังสือรหัส

รายการอ้างอิง

[1] Patane, G. Unsupervised Learning on Traditional and Distributed Systems. Doctoral dissertation, Department of Computer Science, University of Palermo, 2001.

[2] Somasundaram, K., and Domnic, S. Modified Vector Quantization Method for Image Compression. Transactions on Engineering Computing and Technology 13 (May 2006): 222-227.

[3] Gerek, O. N., and Cinar, H. Segmentation based coding of human face images for retrieval. Signal Processing 84 (June 2004):1041-1047.

[4] Han, J., and Kamber, M. Data Mining Concepts and Techniques. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001.

[5] Gray, R.M. Vector Quantization. IEEE ASSP Magazine 1 (April 1984): 4-29.

[6] Linde, Y.; Buzo, A.; and Gray, R.M. An algorithm for vector quantization design. IEEE Transactions on Communications 28 (January 1980): 84-95.

[7] Patane, G., and Russo, M. ELBG Implementation. International Journal of Knowledge based Intelligent Engineering Systems 4 (April 2000): 94 -109.

[8] Patane, G., and Russo, M. The enhanced LBG algorithm. Neural Networks 14 (November 2001): 1219-1237.

[9] Patane, G., and Russo, M. Fully Automatic Clustering System. IEEE Transactions on Neural Networks 13 (November 2002): 1285-1298.

[10] Shen, F., and Hasegawa, O. An adaptive incremental LBG for vector quantization. Neural Networks 19 (June 2006): 694-704.

[11] เหมวรรณ ศิวรักษ์ และ อรรถสิทธิ์ สุรฤกษ์. การปรับปรุงอัลกอริทึมแอลบีจีด้วยการระบุขนาดหนังสือรหัสอัตโนมัติ. ในการประชุมวิชาการวิทยาการคอมพิวเตอร์และวิศวกรรมคอมพิวเตอร์แห่งชาติ หน้า 103-110. 25-27 ตุลาคม 2549 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัด ขอนแก่น.

[12] อรรคพล นงนุช. อัลกอริทึมสำหรับการแบ่งนับเวกเตอร์โดยใช้การประมาณความหนาแน่น. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548.

[13] Nongnuch, A., and Surarerks, A. A Novel Approach of Density Estimation for Vector Quantization. WSEAS Transactions on computers 9 (September 2005): 1179-1186.

[14] Steven, C. C. Numerical Methods for Engineers. 5th ed. Singapore: McGraw-Hill, 2006.

[15] Kasuriya, S.; Sornlertlamvanich, V.; Cotsomrong, P.; Kanokphara, S.; and Thatphithakkul., N. Thai Speech Corpus for Thai Speech Recognition [Computer data file]. National Electronics and Computer Technology Center, 2003. Available from: http://vaja.nectec.or.th:8083/lotus/ [2006, November 1]

[16] มนัส สังวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: อินโฟเพรส, 2543.

[17] สัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ และคนอื่นๆ. การใช้งานโปรแกรม MATLAB เบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

[18] Phil Woodland. Hidden Markov Model Toolkit [Computer program]. Cambridge University Engineering Department (HTK3), 2002. Available from: http://htk.eng.cam.ac.uk [2006, October 7]

[19] Mitchell, T. M. Machine Learning. New York: McGraw-Hill, 1997.

[20] กัลยา วานิชย์บัญชา. การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย SPSS for Windows. กรุงเทพมหานคร สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

[21] Virmajoki, O.; Franti, P.; and Kaukoranta, T. Iterative shrinking method for generating clustering. IEEE International Conference on Image Processing (September 2002): 685-688.

[22] Rui Xu. Survey of Clustering Algorithms. IEEE Transactions on Neural Networks 16 (May 2005): 645-678.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว เหมวรรณ ศิวรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2525 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ จากภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย