เทคนิคการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัสคิวอาร์โค้ด โดยใช้ไมโครคิวอาร์โค้ด

ร้อยโทธานี วิพุทธิกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

A TECHNIQUE TO ADD ERROR DETECTION OF QR CODE DECODING BY USING MICRO QR CODE

First Lieutenant Tanee Wiputtikul

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดโดยใช้ไมโครคิวอาร์โค้ด
โดย	นายธานี วิพุทธิกุล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต วงศ์ประทีป

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ประสิทธิ์จูตระกูล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต วงศ์ประทีป)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ทองทักษ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(พันเอก ดร.โชคชัย พัวธนาโชคชัย)

ธานี วิพุทธิกุล : เทคนิคการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดโดยใช้ไมโครคิวอาร์โค้ด. (A TECHNIQUE TO ADD ERROR DETECTION OF QR CODE DECODING BY USING MICRO QR CODE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.สาธิต วงศ์ประทีป, 150 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการในการการตรวจสอบข้อผิดพลาดของข้อมูลใน QR Code โดยใช้ Micro QR Code ภาพ QR code ที่ใช้ในการทดลองจะเป็นภาพ QR Code ที่เป็นภาพระดับเทา Gray Scale. กระบวนการที่นำเสนอนี้จะนำไปใช้ก่อนการถอดรหัสภาพ QR Code ซึ่งกระบวนการประมวลผลภาพได้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงภาพที่มีความเสียหาย อาทิเช่น การบิดการเปื้อน หรือการฉีกขาด เป็นต้น ใน QR Code ปกติทั่วไปจะไม่มีระบบการตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้จากการถอดรหัสเป็นข้อมูลที่ถูกต้อง โดยที่ข้อมูลที่เก็บอยู่ใน Micro QR Code เป็นข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัส MD5 (Message-Digest Algorithm 5) จากนั้นนำ Micro QR Code ที่ได้ไปซ้อนทับในส่วนของ Finder Pattern ของภาพ QR Code ทั่วไป ทั้งสามส่วน ในการทดลองนี้จะใช้ภาพ QR Code ในเวอร์ชั่น 5 และเวอร์ชั่นที่สูงกว่า กระบวนการในการถอดรหัสจะสนใจบริเวณของ Finder Pattern ทั้ง 3 จุดซึ่งมี Micro QR Code ซ้อนทับอยู่ จากนั้นใช้เทคนิค Binarization โดยการกำหนดค่า Threshold เพื่อให้ได้ Micro QR code จาก ROI แล้วทำการใช้เทคนิค Opening เพื่อลดขอบภาพที่ไม่ต้องการพร้อมทั้งกำจัดสัญญาณรบกวน Noise จากนั้นทำการตรวจสอบข้อมูลได้จากการถอดรหัส

ภาควิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

5470527721: COMPUTER SCIENCE
KEYWORDS: QR CODE/MICRO QR CODE/2D BARCODE/QUICK RESPOND CODE

TANEE WIPUTTIKUL: A TECHNIQUE TO ADD ERROR DETECTION OF QR CODE DECODING BY USING MICRO QR CODE. ADVISOR: ASSOC. PROF. SARTID VONGPRADHIP, Ph.D., 150 pp.

This research introduced method for error detection of the information in QR Code by using Micro QR Code, by creating a grayscale QR Code. Image processing technique is used before decoding. Image processing offer ability of fixing error and restore module that have been damaged such as tear, stain or bend before decoding process. General QR Code does not have error detection to verify the correctness of information in QR Code. Therefore, the contents of Micro QR Code is generated using MD5 (Message-Digest Algorithm 5) and superimposed onto the three corners of Finder Pattern of standard QR Code. The experiment is conducted on QR Code version 5 and over. The decoding is done by focusing on the region of interest on the overlapped Micro QR Code. After that the binarization is done using multilevel-thresholding to separate the content of the Micro QR Code. The Opening technique is used to remove edges, eliminate noises and verify the decoding data.

Department : Computer Engineering Student's Signature .....
Field of Study : Computer Science Advisor's Signature .....
Academic Year : 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต วงศ์ประทีป ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้เสียสละเวลา ให้คำปรึกษา คำแนะนำเกี่ยวกับการวิจัย และการสนับสนุนเป็นอย่างดีจนทำให้งานวิจัยในครั้งนี้ประสบความสำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านเป็นอย่างสูง ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ประสิทธิ์จูตระกูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ทองทักษ์ และพันเอก ดร.โชคชัย พัวธนาโชคชัย ที่กรุณาเสียสละเวลา ให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้ให้คำสั่งสอน ชี้แนะ และแนะนำทั้งความรู้และประสพการณ์ต่างๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่าน ที่ช่วยติดต่อ ประสานงานต่างๆ และงานด้านเอกสาร

เพื่อนๆทุกคนในห้องวิจัย Digital System Engineering Laboratory (DSEL) รวมถึงเพื่อนๆ ในรุ่น CS 41 ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ-คุณแม่ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอจนสามารถศึกษาจนกระทั่งประสบความสำเร็จ

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณมน (กมล) คุณจิน (วิรุตต์) ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือด้านงานวิจัย การปรับปรุงพรีเซนเทชั่น และเปเปอร์ที่ไปนำสนอ และขอขอบคุณท่านอื่น ๆ ที่มิได้กล่าวชื่อไว้ ณ ที่นี้ที่มีส่วนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญภาพ ..... ฑ
บทที่
1 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น 4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย 5
1.7 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 6
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับบาร์โค้ด 7
2.2 คิวอาร์โค้ด (QR Code) 9
2.3 ไมโครคิวอาร์โค้ด (Micro QR Code) 11
2.4 โครงสร้างของ QR Code และ Micro QR Code 13
2.5 กระบวนการเข้ารหัส QR Code และ Micro QR Code 15
2.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis) 15
2.5.2 การเข้ารหัสข้อมูล (Data encoding) 18
2.5.3 การเข้ารหัส Error Correction (Error Correction Coding) 19
2.5.4 การเตรียม Structure final message 20
2.5.5 การวางตำแหน่งโมดูลในเมทริกซ์ (Module placement in matrix) 21
2.5.6 การทำ Data masking 22

บทที่ หน้า

2.5.7 การวาง Format information และ Version information 25
2.6 กระบวนการถอดรหัส QR Code และ Micro QR Code 28
2.6.1 การแปลงภาพที่นำเข้าเป็นภาพขาวดำ 29
2.6.2 การค้นหา Finder Pattern 29
2.6.3 การพิจารณาแนวการหมุนของ QR Code 30
2.6.4 การพิจารณาระยะ D 30
2.6.5 การคำนวณหา Nominal X Dimension 30
2.6.6 สมการของการคำนวณหา Version 30
2.6.7 เงื่อนไขในการคำนวณ Version 31
2.6.8 การคำนวณสำหรับ Version 1 32
2.6.9 การทำ Global Threshold 35
2.6.10 การถอดรหัสส่วนของ Format information 35
2.6.11 กรณีไม่สามารถถอดรหัส Format information 36
2.6.12 การพิจารณาแนวการหมุนของ Micro QR Code 36
2.6.13 การหาแกนของ Finder Pattern 36
2.6.14 การคำนวณเงื่อนไขโมดูลของ Finder Pattern 36
2.6.15 การหาขอบนอกของ Finder Pattern 36
2.6.16 การหา Timing Pattern 36
2.6.17 การตรวจสอบเงื่อนไขของเวอร์ชั่น Micro QR Code 36
2.6.18 การทำ XOR 36
2.6.19 การพิจารณาสัญลักษณ์ของ Codewords 36
2.6.20 การจัดลำดับของ Codeword 36
2.6.21 การตรวจหาข้อผิดพลาด 36
2.6.22 การกู้คืนส่วนของข้อมูลต้นฉบับ 37
2.6.23 การแบ่งข้อมูลบิต 37
2.6.24 การถอดรหัส 37
2.7 พื้นฐานการประมวลผลภาพดิจิทัล 37
2.7.1 รูปแบบของภาพดิจิทัล 37

บทที่ หน้า

2.7.1.1 ภาพแบบบิทแมพ (Bitmap Image) 37
2.7.1.2 ภาพแบบเวกเตอร์ (Vector Image) 37
2.7.2 ประเภทของภาพ (Image Type) 38
2.7.2.1 ภาพขาวดำ (Binary Image) 38
2.7.2.2 ภาพแบบระดับเทา (Gray scale Image) 39
2.7.2.3 ภาพสี (Color Image) 39
2.7.2.4 ภาพแบบดัชนี (Index Image) 40
2.8 ประเภทของการประมวลผลภาพ (Image processing) 40
2.8.1 การประมวลผลกับเฉพาะจุด (Point Processing) 40
2.8.2 การประมวลผลกับเฉพาะบริเวณ (Local Processing) 41
2.8.3 การประมวลผลกับทั้งหมด (Global Processing) 42
2.8.3.1 การเทรสโชลด์แบบหนึ่งระดับ (Single Thresholding) 43
2.8.3.2 การเทรสโชลด์แบบหลายระดับ (Multilevel Thresholding) 44
2.9 การแยกองค์ประกอบภาพ (Image Segmentation) 44
2.9.1 Pixel Oriented Image Segmentation 45
2.9.2 Region Oriented Image Segmentation 45
2.9.3 Edge Oriented Image Segmentation 45
2.10 การกำหนดบริเวณสนใจ (Region of Interest) 45
2.11 มอร์โฟโลยี (Mophology) 46
2.11.1 การขยายภาพ (Dilation) 47
2.11.2 การเซาะภาพ (Erosion) 47
2.11.3 การเปิดภาพ (Opening) และการปิดภาพ (Closing) 48
2.12 การเข้ารหัสฟังก์ชันแบบแฮช (Cryptographic Hash Function) 50
2.12.1 การเข้ารหัสแบบ MD5 (Messaage-Digest Algorithm 5) 50
2.12.2 การเข้ารหัสแบบ SHA-1 51
2.13 เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพ 51
2.13.1 การวัดค่าความเหมือนของภาพ (Similarity Measurement) 51
2.13.2 เกณฑ์การวัดเวลาที่ใช้ในการประมวลผล 52

บทที่ หน้า

2.14 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 52
3 วิธีดำเนินการวิจัย 55
3.1 ภาพรวมทั้งหมดของงานวิจัย 56
3.1.1 การเข้ารหัสข้อมูล QR Code 56
3.1.2 การถอดรหัสข้อมูล QR Code 58
3.2 การเข้ารหัส QR Code และ Micro QR Code 61
3.2.1 กระบวนการเข้ารหัสข้อมูล QR Code 61
3.2.2 กระบวนการเข้ารหัสข้อมูล Micro QR Code 62
3.3 การสร้างบาร์โค้ด QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดโดยใช้ไมโครคิวอาร์โค้ด 64
3.3.1 การหมุนเมทริกซ์ Micro QR Code แบบ 90 องศา 64
3.3.2 การหมุนเมทริกซ์ Micro QR Code แบบ 270 องศา 65
3.3.3 การสร้าง QR Code โดยการซ้อนทับข้อมูล Micro QR Code 66
3.4 กระบวนการแบ่งส่วนองค์ประกอบภาพ 67
3.4.1 กระบวนการทำภาพแบบไบนารี QR Code (Binarization QR Code) 68
3.4.2 การกำหนดบริเวณสนใจส่วน Micro QR Code 69
3.4.3 กระบวนการทำภาพแบบไบนารี Micro QR Code 70
3.5 การกรองสัญญาณรบกวน (Filtering) 71
3.6 การถอดรหัส QR Code และ Micro QR Code 72
3.7 การยืนยันความถูกต้องการถอดรหัส QR Code 72
3.8 เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพ 73
3.8.1 การวัดค่าความเหมือนของภาพ (Similarity Measurement) 73
3.8.2 การวัดเวลาที่ใช้ในการประมวลผล 73
3.8.3 การวัดเปอร์เซ็นประสิทธิภาพการถอดรหัส Micro QR Code 73
4 การทดลองและผลการทดลอง 74
4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 74
4.2 ผลการทดลอง 75
5 สรุปผลการวิจัย 112

บทที่ หน้า

5.1 บทสรุป 112
5.2 ข้อเสนอแนะ 113
รายการอ้างอิง 114
ภาคผนวก 117
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 150

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 แสดงความจุของ QR Code แบ่งตามประเภทข้อมูล....10
2-2 แสดงความจุของ Micro QR Code แบ่งตามประเภทข้อมูล....12
2-3 Mode Indicators ของ QR Code....15
2-4 Mode Indicators ของ Micro QR Code....16
2-5 แสดงเวอร์ชั่นและความจุของ QR Code ในแต่ละเวอร์ชั่น....16
2-6 แสดงเวอร์ชั่นและความจุของ Micro QR Code ในแต่ละเวอร์ชั่น....18
2-7 จำนวนบิต Character Count Indicator ของ QR Code และ Micro QR Code....19
2-8 แสดงระดับ Error Correcting....19
2-9 แสดง Error Correction ของ Micro QR Code ในแต่ละเวอร์ชั่น....20
2-10 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการเลือก Pattern ส่วนของ QR Code และ Micro QR Code....23
2-11 ข้อมูล Binary Indicator ของ Error Correction Level ใน QR Code....25
2-12 ข้อมูล Binary Indicator ใน Micro QR Code....26
3-1 ตารางเปรียบเทียบยค่าระดับสีเทาของการซ้อนทับข้อมูล....67
4-1 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 5 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....75
4-2 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 6 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....76
4-3 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 7 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....77
4-4 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 8 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....78
4-5 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 9 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....79
4-6 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 10 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....80
4-7 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 11 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....81
4-8 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 12 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....82
4-9 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 13 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....83
4-10 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 14 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....84
4-11 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 15 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....85
4-12 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 16 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....86
4-13 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 17 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์....87

ตารางที่ หน้า

4-14 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 18 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์.....88
4-15 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 19 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์.....89
4-16 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 20 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์.....90
4-17 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 5 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....91
4-18 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 6 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....92
4-19 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 7 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....93
4-20 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 8 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....94
4-21 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 9 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....95
4-22 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 10 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....96
4-23 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 11 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....97
4-24 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 12 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....98
4-25 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 13 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....99
4-26 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 14 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....100
4-27 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 15 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....101
4-28 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 16 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....102
4-29 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 17 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....103
4-30 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 18 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....104
4-31 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 19 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....105
4-32 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 20 โดยการใช้กล้องดิจิทัล.....106
4-33 ผลการทดลองเฉลี่ยในแต่ละเวอร์ชั่นของ QR Code โดยนำเข้าภาพด้วยเครื่องสแกนเนอร์...107
4-34 ผลการทดลองเฉลี่ยเวลาการประมวลผลในแต่ละเวอร์ชั่นของส่วน Micro QR Code โดยนำเข้าภาพด้วยเครื่องสแกนเนอร์.....108
4-35 ผลการทดลองการถอดรหัสโดยการนำเข้าภาพด้วยกล้องดิจิทัล.....110

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

1-1 ตัวอย่างภาพ QR Code ก่อนเกิดความเสียหาย 3
1-2 ตัวอย่างภาพ QR Code เมื่อเกิดความเสียหาย 3
1-3 ตัวอย่างภาพ QR Code ที่มีข้อมูลคล้ายกัน 3
1-4 เปรียบเทียบส่วนต่างของข้อมูลบน QR Code 3
2-1 บาร์โค้ดรูปแบบ 1 มิติ 7
2-2 ตัวอย่างบาร์โค้ดแบบสแต็ก PDF417 8
2-3 ตัวอย่างบาร์โค้ด 2 มิติ 8
2-4 กระบวนการถอดรหัสภาพ QR Code โดยการใช้โทรศัพท์มือถือ 9
2-5 ตัวอย่างการใช้ QR Code ในเข้าถึง URL 9
2-6 จำนวนของโมดูลใน QR Code Version 1 และ Version 2 10
2-7 แสดงมุมมองของ QR Code ที่สามารถถอดรหัสได้ 11
2-8 แสดงเวอร์ชั่นของ Micro QR Code 11
2-9 แสดงตัวอย่างของ Micro QR Code ที่สามารถถอดรหัสได้ 12
2-10 โครงสร้างของ QR Code ตามมาตรฐาน 13
2-11 โครงสร้างของ Micro QR Code 13
2-12 โครงสร้างของ Finder Pattern 14
2-13 แสดงรูปแบบการวาง Data Codeword และ Error Correction Codewords 20
2-14 ทิศทางการจัดวางในทิศทางขึ้นและลง 21
2-15 ทิศทางการจัดวางในรูปแบบปกติและรูปแบบไม่ปกติ 21
2-16 ตัวอย่างจัดวางในจุดที่ใกล้เคียงกับ Alignment Pattern 21
2-17 รูปแบบ Data mask pattern ของ QR Code 23
2-18 รูปแบบ Data mask pattern ของ Micro QR Code 24
2-19 ขั้นตอนการวาง Data Mask 24
2-20 ตำแหน่งการวาง Format Information ของ QR Code 26
2-21 ตำแหน่งการวาง Format Information ของ Micro QR Code 27
2-22 ตำแหน่งของ Version Information 27

ภาพที่ หน้า

2-23 ทิศทางการวาง Version Information 28
2-24 แสดงกระบวนการถอดรหัส QR Code 28
2-25 การแสกนไลน์ ใน Finder Pattern 29
2-26 แสดง Finder Pattern ที่อยู่ส่วนบนของ QR Code 30
2-27 ตำแหน่งของ Finder Pattern และ Version Information 31
2-28 ตำแหน่ง Finder Patterns และ Alignment Pattern ในการ Sampling grids 32
2-29 จุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern 33
2-30 สัญลักษณ์บริเวณบนซ้ายของ QR Code 34
2-31 สัญลักษณ์ในบริเวณขวาล่างของ QR Code 35
2-32 ตัวอย่างภาพในแบบ Bitmap และVector 38
2-33 ตัวอย่างภาพขาวดำ 38
2-34 ตัวอย่างภาพแบบระดับเทา 39
2-35 ตัวอย่างภาพสี 39
2-36 ตัวอย่างภาพแบบดัชนี 40
2-37 การกระทำเฉพาะจุด (Point Processing) 41
2-38 การกระทำเฉพาะบริเวณ (Local Processing) 42
2-39 การพิจารณาค่าเทรสโชลด์จากภาพฮิสโตรแกรม 43
2-40 ภาพผลลัพธ์จาก Single Thresholding และ Multilevel Thresholding 44
2-41 ตัวอย่างการกำหนดบริเวณสนใจของภาพ 46
2-42 ตัวอย่างส่วนย่อยโครงสร้าง B ที่มีขนาด 3x3 จุดภาพ 46
2-43 ตัวอย่างการขยายภาพ (Dilation) $A \oplus B$ 47
2-44 ตัวอย่างการเซาะภาพ (Erosion) $A \ominus B$ 48
2-45 ตัวอย่างการทำการเปิดภาพ (Opening) $A \circ B$ 49
2-46 ตัวอย่างการทำการปิดภาพ (Closing) $A \bullet B$ 49
2-47 การดำเนินการ MD5 50
2-48 การดำเนินการ SHA-1 51
3-1 การเข้ารหัส QR Code โดยเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส 58
3-2 การถอดรหัส QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส 60

ภาพที่ หน้า

3-3 ขั้นตอนการเข้ารหัสของ QR Code....61
3-4 ตัวอย่างข้อมูลเมทริกซ์ที่ได้จากการเข้ารหัส QR Code....62
3-5 ขั้นตอนการเข้ารหัส Micro QR Code....63
3-6 ตัวอย่างข้อมูลเมทริกซ์ที่ได้จากการเข้ารหัส Micro QR Code....63
3-7 ผลลัพธ์จากการหมุนเมตริกซ์แบบ 90 องศา....65
3-8 ผลลัพธ์จากการหมุนเมตริกซ์แบบ 270 องศา....66
3-9 แสดงพื้นที่ในการซ้อนทับข้อมูล....66
3-10 ผลลัพธ์ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของการถอดรหัส....67
3-11 ตัวอย่างภาพที่นำเข้า....68
3-12 แผนภูมิฮิสโทแกรมของภาพ QR Code....68
3-13 ภาพไบนารีของ QR Code....69
3-14 โครงสร้างของ Finder Pattern....69
3-15 การหาขนาดของโมดูล....69
3-16 ผลลัพธ์จากการกำหนดบริเวณที่สนใจของส่วน Micro QR Code....70
3-17 แผนภูมิฮิสโทแกรมของภาพ Micro QR Code ในส่วนของซ้ายบน....70
3-18 ภาพไบนารีของ Micro QR Code....71
3-19 ผลลัพธ์จากการทำการเปิดภาพ Micro QR Code ทั้งสามส่วน....71
3-20 แสดงกระบวนการถอดรหัสภาพ QR Code....72
4-1 แผนภาพค่า NCC เฉลี่ยของการนำเข้าภาพด้วยเครื่องสแกนเนอร์....108
4-2 แผนภาพค่าเวลาที่ใช้ในการประมวลผลเฉลี่ยในแต่ละเวอร์ชั่น....109
4-3 แผนภาพค่า NCC เฉลี่ยของการนำเข้าภาพด้วยกล้องดิจิทัล....111
4-4 แผนภาพค่าเปอร์เซ็นผลการถอดรหัสสำเร็จส่วนของ Micro QR Code....111

บทที่ 1
ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีบาร์โค้ดช่วยอำนวยความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลต่างๆ ทั้งข้อมูลผลิตภัณฑ์ โดยทำการเก็บรหัสของข้อมูลผลิตภัณฑ์ รหัสข้อมูลด้านราคา ทำให้ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องทำการกรอกข้อมูลด้วยตนเอง ทั้งยังช่วยในการจัดการในเรื่องจำนวนของสินค้า ทำให้การเช็คยอดสินค้าคงเหลือทำได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีบาร์โค้ดประกอบด้วยบาร์โค้ดแบบ 1 มิติ ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งข้อมูล สามารถพบเห็นได้ทั่วไปตามผลิตภัณฑ์หรือสินค้าทั่วไป โดยข้อมูลในบาร์โค้ดประเภทนี้สามารถบรรจุข้อมูลได้เพียง 20 ตัวอักษร ซึ่งทำให้สามารถเก็บได้เฉพาะข้อมูลดัชนีที่ใช้ระบุผลิตภัณฑ์หรือสินค้าเท่านั้น ส่วนบาร์โค้ดอีกประเภทหนึ่งคือ บาร์โค้ดแบบ 2 มิติ ซึ่งมีลักษณะแบบเมทริกซ์ ซึ่งมีความสามารถเก็บข้อมูลได้หลากหลาย บาร์โค้ดแบบ 2 มิติมีหลากหลายรูปแบบ เช่น PDF417 Data Matrix Maxi Code และ QR Code คิวอาร์โค้ด (QR Code) ย่อมาจาก Quick Response Code เป็นบาร์โค้ด 2 มิติแบบเมตริกซ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Nippon Denso ประเทศญี่ปุ่นในปี 2537 [1] และได้รับการยอมรับให้เป็นมาตรฐานหนึ่งของบาร์โค้ดในระดับสากล [2] โดย QR Code เป็นสัญลักษณ์ที่ง่ายต่อการใช้งานและตีความหมาย โดยการถอดรหัสของบาร์โค้ดด้วยเครื่องแสกนเนอร์หรือกล้องดิจิทัลโดยทั่วไป ซึ่ง QR Code ถูกพัฒนาจนมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน นอกจากนี้ QR Code ยังถูกนำไปใช้ในการโฆษณาสินค้าเพื่อให้ผู้ใช้สินค้าสามารถเข้าถึงข้อมูลของผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้นโดยการสแกนบาร์โค้ดที่ติดมากับผลิตภัณฑ์นั้น นอกจากนี้ QR Code ยังถูกนำมาใช้ในการประยุกต์งานด้านต่างๆ เช่น การนำระบบคิวอาร์โค้ดไปประยุกต์ใช้ในการบอกตำแหน่งภายในอาคาร [3] การนำไปประยุกต์ใช้ในระบบ E-learning [4] ทั้ง ถึงแม้ว่า qr code จะมีส่วนของ Error Correction และ Error Detection ที่ช่วยในซ่อมแซมข้อมูลและการตรวจสอบกระบวนการถอดรหัส แต่เมื่อส่วนของข้อมูลบนบาร์โค้ดมีความเสียหายมากกว่าเปอร์เซ็นที่ Error Correction จะทำการซ่อมแซมหรือแก้ไขได้ จะทำให้ไม่สามารถนำ QR Code ดังกล่าวมาทำการถอดรหัสข้อมูลออกได้ จึงได้มีงานวิจัยต่างๆ ที่ใช้กระบวนการทางการประมวลผลภาพมาช่วยในการฟื้นฟูข้อมูลบนภาพบาร์โค้ด [5] ให้สามารถนำมาใช้ในการถอดรหัสได้ แต่ด้วยข้อจำกัดด้านขนาดและโครงสร้างของ QR Code ทำให้ข้อมูลที่คล้ายกัน เมื่อทำการเข้ารหัส QR Code จะมีลักษณะการเข้ารหัสข้อมูลที่แตกต่างกันเล็กน้อยเท่านั้น ดังตัวอย่างภาพที่ 1-1 ซึ่งเป็นภาพ QR Code ต้นฉบับ เมื่อภาพ QR Code ถูกรบกวนด้วยรอยขีดข่วนดังภาพที่ 1-2 ทำให้การถอดรหัสไม่สามารถทำได้ จากภาพที่ 1-3 เป็น

ภาพ QR Code ที่มีข้อมูลคล้ายกับภาพที่ 1-1 ซึ่งขอ้มูลที่ทำการถอดรหัสมีความต่างกันเพียง 1 ตัวอักษร และภาพที่ 1-4 เป็นการเปรียบเทียบข้อมูลบนภาพ QR Code ทั้งสอง ซึ่งมีความต่างของข้อมูลอยู่เพียงประมาณ 7.895 เปอร์เซ็น จากข้อมูลดังกล่าวจึงอาจส่งผลให้กระบวนการประมวลผลภาพเพื่อกู้คืนโมดูลของในงานวิจัยต่างๆ อาจทำการแก้ไขผิดพลาดและทำให้ผลลัพธ์จากการถอดรหัสไม่ถูกต้องกับข้อมูลที่มีอยู่จริงได้ งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการเพิ่มส่วนตรวจสอบความถูกต้องของการถอดรหัส QR Code โดยการใช้ Micro QR Code ซึ่งมีขั้นตอนประกอบไปด้วย ขั้นตอนการเข้ารหัส QR Code โดยการนำข้อความที่ต้องการทำการเข้ารหัสเพื่อสร้าง QR Code จากนั้นนำข้อความดังกล่าวเข้ารหัสฟังก์ชั่นแบบแฮชเพื่อย่อยข้อความก่อนทำการเข้ารหัสแบบ Micro QR Code และทำการผสานบาร์โค้ด โดยการซ้อนทับบริเวณส่วนโครงสร้าง Finder Pattern บาร์โค้ดที่ได้จากการผสานจะเป็นภาพระดับเทา (Grayscale Image) ขั้นตอนการถอดรหัส QR Code โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ (Image Processing) โดยทำการทดลองอ่านภาพบาร์โค้ดที่ได้จากการสร้างดังกล่าว และใช้วิธีการแยกองค์ประกอบภาพ (Image Segmentation) เพื่อแยกส่วนของคิวอาร์โค้ดและ Micro QR Code ออกจากกัน ในส่วนคิวอาร์โค้ดจะทำการหาค่าเทรสโชลด์หนึ่งระดับ (Single Thresholding) แล้วนำภาพที่ได้เข้าสู่การทำ Binarization ซึ่งเป็นขั้นตอนการแปลงภาพ QR Code ให้เป็นภาพไบนารี (Binary Image) จากนั้นทำการถอดรหัสเพื่อหาผลลัพธ์และนำผลลัพธ์ ที่ได้ทำการเข้ารหัสโดยการใช้ MD5 ในส่วน Micro QR Code จะทำการกำหนดบริเวณสนใจ (Region of Interest) ของภาพบาร์โค้ด ซึ่งเป็นบริเวณที่มี Finder Pattern ของ QR Code และมีการซ้อนทับของ Micro QR Code อยู่ จากนั้นทำการหาค่าเทรสโชลด์มากกว่าหนึ่งระดับ (Multilevel Thresholding) เพื่อทำการแยกส่วนที่ไม่ใช่ Micro QR Code ออก และนำเข้าสู่กระบวนการทำ Binarization เพื่อแปลงภาพ Micro QR Code ให้เป็นภาพไบนารี จากนั้นทำการกรองข้อมูลโดยใช้เทคนิค การทำ Morphological Image Processing โดยใช้เทคนิค Opening เพื่อปรับปรุงส่วนของโมดูล Micro QR Code เพื่อลดส่วนโมดูลที่เหลือจาก QR Code จากนั้นทำการถอดรหัสเพื่อหาผลลัพธ์ และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลลัพท์ ที่ได้จากการเข้ารหัสแบบ MD5 ของ QR Code โดยผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบจะใช้พิสูจน์ความถูกต้องในการถอดรหัสของ QR Code ได้ โดยผลลัพธ์ที่เหมือนกันจะสามารถระบุได้ว่าการถอดรหัส QR Code มีความถูกต้องและผลลัพธ์ที่ต่างกันระบุได้ว่าการถอดรหัส QR Code เกิดความผิดพลาด

ภาพที่ 1-1 ตัวอย่างภาพ QR Code ก่อนเกิดความเสียหาย

ภาพที่ 1-2 ตัวอย่างภาพ QR Code เมื่อเกิดความเสียหาย

ภาพที่ 1-3 ตัวอย่างภาพ QR Code ที่มีข้อมูลคล้ายกัน

ภาพที่ 1-4 เปรียบเทียบส่วนต่างของข้อมูลบน QR Code

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาออกแบบและพัฒนาวิธีการที่เหมาะสมในการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส QR Code โดยการเพิ่มส่วน Micro QR Code ลงในบาร์โค้ด และใช้วิธีการประมวลผลภาพในการแยกส่วนบาร์โค้ดก่อนการถอดรหัส เพื่อใช้เป็นส่วนตรวจหาความผิดพลาดผลของการถอดรหัส QR Code ได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เป็นการปรับปรุง QR Code เพื่อให้สามารถตรวจหาความผิดพลาดในการถอดรหัสได้
2. หาวิธีประมวลผลภาพหลายๆวิธี เพื่อทำการถอดรหัสในส่วน Micro QR Code ที่ใช้เป็นส่วนตรวจหาความผิดพลาดได้
3. ภาพ QR Code ที่ใช้ในการทดลองต้องเป็นภาพถ่ายที่มีสภาพแสงสม่ำเสมอ
4. การถอดรหัสจะใช้ Library ZXing Version 2.1 [6]
5. QR Code ที่ใช้ในการทดลองต้องมีขนาดของเวอร์ชั่น 5 ขึ้นไป
6. Micro QR Code ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเวอร์ชั่น M4 เท่านั้น
7. เกณฑ์การวัดคุณภาพโดยการวัดค่าความเหมือนของภาพ QR Code จากกระบวนการ Binarization และวัดประสิทธิภาพของการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์โดยวัดเวลาการทำงานของการประมวลผลของ Clock cycle
8. ขั้นตอนในการถอดรหัสภาพส่วน QR Code ในงานวิจัยนี้ใช้ Zxing เวอร์ชั่น 2.1
9. ขั้นตอนในการถอดรหัสภาพส่วน Micro QR Code ในงานวิจัยนี้ใช้การปรับปรุง Zxing เวอร์ชั่น 2.1
10. ขั้นตอนการประมวลผลภาพ QR Code ในงานวิจัยนี้ใช้ Java เวอร์ชั่น 1.7.0_25 ร่วมกับ Netbeans เวอร์ชั่น 7.3.1 [7]

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ภาพ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนตรวจหาความผิดผลาดโดยใช้ Micro QR Code ที่พิมพ์เพื่อทำการทดสอบในแต่ละเวอร์ชั่นมีขนาดกว้าง 72 มิลลิเมตรและสูง 72 มิลลิเมตร

2. ภาพที่นำเข้าเพื่อทดลองการประมวลผลด้วยวิธีการนำเข้าผ่านเครื่องสแกนเนอร์มีขนาด กว้าง 620 พิกเซล และสูง 620 พิกเซล มีสกุล JPEG
3. เวลาในการประมวลผล (Process Time) หมายถึง เวลาที่ใช้ในการถอดรหัส QR Code โดยใช้ Zxing Library และเวลาในการประมวลผลส่วนภาพและถอดรหัส Micro QR Code

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อให้ได้กระบวนการในการเพิ่มส่วนสำหรับการตรวจหาความผิดพลาดของถอดรหัสของ QR Code
2. เป็นแนวทางการวิจัยด้านการพัฒนากระบวนการที่ช่วยในการตรวจหาความผิดพลาดของถอดรหัส QR Code ได้
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาร่วมกับบาร์โค้ดรูปแบบอื่นๆ
4. เป็นแนวทางในการพัฒนาการสร้างบาร์โค้ดแบบสามมิติ
5. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการใช้งาน QR Code ให้มีประสิทธิภาพ

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎี หลักการพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาเทคนิคต่างๆ ที่มีอยู่ถึงแนวคิด หลักการ ข้อดี และข้อบกพร่องของแต่ละเทคนิคที่อยู่ในขอบเขต
3. ออกแบบและนำเสนอวิธีการเพิ่ม Micro QR Code เพื่อตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส QR Code และเทคนิคในการแยกส่วน Micro QR Code เพื่อใช้ในการตรวจหาความผิดพลาดของผลลัพธ์ของการถอดรหัส QR Code
4. ทดสอบและปรับปรุงวิธีการที่นำเสนอ
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง
6. สรุปผลและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

1.7 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

Tanee W. ,and Sartid V., ”A Technique to Add Error Detection of QR Code Decoding by Using Micro QR Code”, International Journal of Electrical Energy (IJOEE), September 2013,pp. 173-176.

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้เป็นแนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับ QR Code, Micro QR Code, การประมวลผลภาพดิจิทัลและการเข้ารหัสฟังก์ชันแบบแฮช ซึ่งจะกล่าวถึงข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับบาร์โค้ด องค์ประกอบและโครงสร้างของ QR Code ขั้นตอนการเข้ารหัสและการถอดรหัสของ QR Code องค์ประกอบและโครงสร้างของ Micro QR Code ขั้นตอนการเข้ารหัสและการถอดรหัสของ Micro QR Code พื้นฐานการประมวลผลภาพดิจิทัล การประมวลผลภาพไบนารี (Binary Image) การประมวลผลภาพระดับเทา (Grayscale Image) การประมวลผลรูปร่างโครงสร้างภาพ (Morphological Image Processing) การเข้ารหัสฟังก์ชันแบบแฮชแบบ MD5 (Message-Digest Algorithm 5) ตามลำดับ

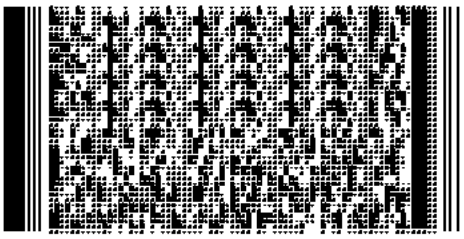
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับบาร์โค้ด

ภาพที่ 2-1 บาร์โค้ดรูปแบบ 1 มิติ

ปัจจุบันเทคโนโลยีบาร์โค้ดมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย อาทิ เช่น การใช้งานเพื่อความสะดวกรวดเร็วในการเข้าถึงข้อมูลของผลิตภัณฑ์ การตรวจสอบรายการสินค้า รายการสินค้าคงเหลือ และราคาของสินค้าในการขาย โดยเจ้าหน้าที่หรือพนักงานจะทำการใช้อุปกรณ์เพื่อสแกนส่วนบาร์โค้ดบนผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วกว่าการป้อนข้อมูลเข้าระบบ จากนั้นระบบจะทำการแสดงราคาหรือรายการคงเหลือของผลิตภัณฑ์นั้นให้แก่เจ้าหน้าที่หรือพนักงานได้ทราบ วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่ายและรวดเร็ว และช่วยประหยัดเวลาการทำงานได้เป็นอย่างมาก โดยบาร์โค้ดที่มีการใช้งานทั่วไปบนผลิตภัณฑ์ต่างๆ เป็นบาร์โค้ดแบบแถบเส้นสีดำและสีขาวสลับกัน ซึ่งเรียกรูปแบบนี้ว่า บาร์โค้ดในรูปแบบหนึ่งมิติ (One Dimension Barcode) ดังภาพที่ 2-1 ซึ่งเป็นบาร์โค้ดรูปแบบแท่งมีการเก็บข้อมูลในรูปแบบแกนเดียว บาร์โค้ดแบบหนึ่งมิตินั้นจะพบเห็นได้ทั่วไปตามห้างสรรพสินค้าหรือร้านค้าต่างๆ แต่ด้วยข้อจำกัดของบาร์โค้ดแบบหนึ่งมิติที่สามารถเก็บข้อมูลได้ไม่มากนัก จึงได้มีการพัฒนาบาร์โค้ดแบบสองมิติ (Two Dimension Barcode) เป็น

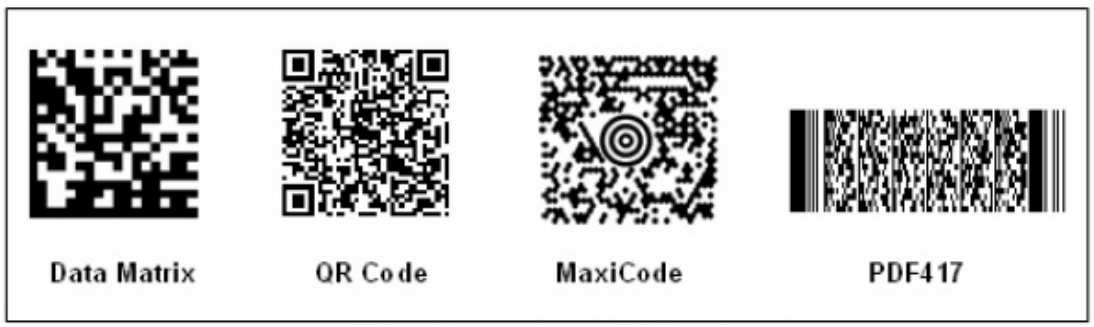
บาร์โค้ดที่มีการออกแบบเก็บข้อมูลในแนวแกนนอนและแกนตั้ง ทำให้ประสิทธิภาพในการเก็บข้อมูลมีมากกว่าบาร์โค้ดรูปแบบหนึ่งมิติ บาร์โค้ดสองมิติสามารถแบ่งรูปแบบได้ 2 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

1. บาร์โค้ดแบบสแต็ก (Stacked Barcode) เป็นบาร์โค้ดที่มีลักษณะคล้ายบาร์โค้ด 1 มิติ แต่มีข้อมูลหลายๆ แถวซ้อนต่อกัน ทิศทางการอ่านบาร์โค้ดแบบสแต็กสามารถทำได้เพียงหนึ่งทิศทางในการอ่าน และจะต้องเป็นทิศทางดังต่อไปนี้ จากทางขวาไปทางซ้าย ทางซ้ายไปทางขวา จากล่างขึ้นบน และจากบนลงล่าง ตัวอย่างบาร์โค้ดแบบสแต็กได้แก่ PDF417 (Portable Data File) ดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ตัวอย่างบาร์โค้ดแบบสแต็ก PDF417

2. บาร์โค้ดแบบเมทริกซ์ (Matrix Barcode) เป็นบาร์โค้ดที่มีลักษณะแตกต่างจากบาร์โค้ดแบบสแต็ก โดยในโครงสร้างของบาร์โค้ดแบบเมทริกซ์จะมีองค์ประกอบที่ใช้ในการช่วยค้นหาเรียกว่า Finder Pattern ทำให้การอ่านบาร์โค้ดได้อย่างรวดเร็ว และสามารถอ่านในลักษณะกลับด้าน เอียง หรือหมุนได้ ตัวอย่างบาร์โค้ดประเภทเมตริกซ์นี้ ได้แก่ Maxicode, Data Matrix, Aztec Code, QR Code เป็นต้นดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ตัวอย่างบาร์โค้ด 2 มิติ

2.2 คิวอาร์โค้ด (QR Code)

QR Code เป็นบาร์โค้ดสองมิติ ย่อมาจาก Quick Response Code ซึ่งถูกคิดค้นโดยบริษัท Denso Wave ซึ่ง QR Code มีโครงสร้างเป็นบาร์โค้ดสองมิติ สามารถใช้งานได้อย่างรวดเร็ว โดยในเริ่มแรก QR Code ถูกใช้ในด้านอุตสาหกรรม ต่อมามีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งด้านงานโฆษณาและสื่อสิ่งพิมพ์ต่างๆ ทำให้มีการเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว โดย QR Code มีลักษณะเด่นในด้านการเก็บข้อมูลที่สามารถเก็บข้อมูลได้สูงสุดถึง 7,089 ตัวอักษร และในการอ่านยังสามารถใช้งานได้ง่ายโดยการใช้สมาร์ทโฟนทั่วไปที่มีกล้อง โดยกระบวนการใช้งาน QR Code แสดงดังภาพที่ 2-4 โดย ซึ่งสมาร์ทโฟนทั่วไปในปัจจุบันสามารถติดตั้งซอฟแวร์ที่สามารถอ่าน QR Code เพิ่มเติมได้ ทำให้การโฆษณาสินค้าหรือบริการต่างๆ มักใช้ QR Code ให้ลูกค้าทำการแสกนและรับบริการดังภาพที่ 2-5

ภาพที่ 2-4 กระบวนการถอดรหัสภาพ QR Code โดยการใช้โทรศัพท์มือถือ

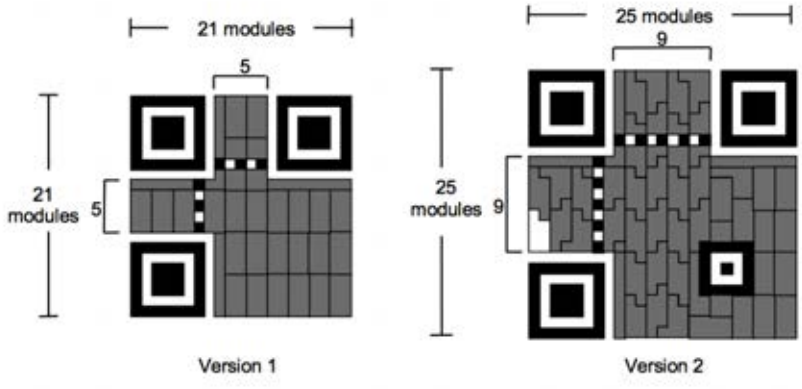
ภาพที่ 2-5 ตัวอย่างการใช้ QR Code ในการเข้าถึง URL

จากมาตรฐานของ QR Code [2] สามารถเก็บข้อมูลตัวอักษรได้หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ ข้อมูลประเภทตัวเลข (Numeric), ข้อมูลแบบอักขระ (Alphanumeric), ข้อมูลตัวอักษร Kana, Kanji, ข้อมูลสัญลักษณ์ (Symbols) และข้อมูลประเภทไบนารี (Binary) และ Control โดยแสดงรายระเอียดดังตารางตารางที่ 2-1

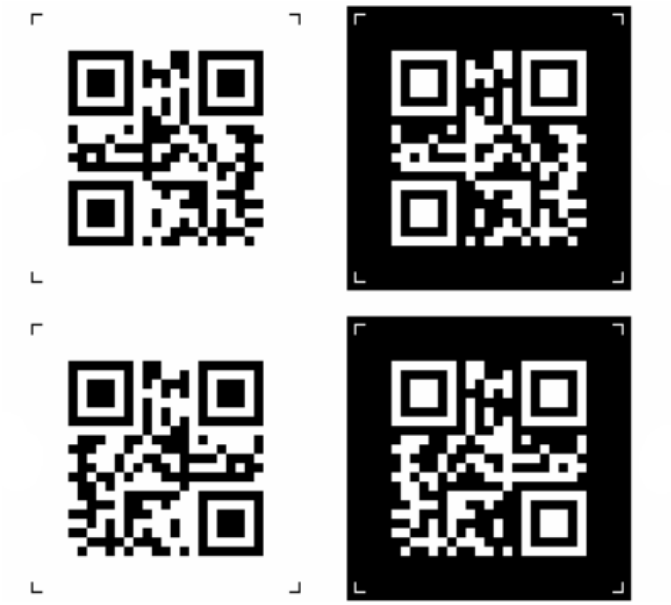
ตารางที่ 2-1 แสดงความจุของ QR Code แบ่งตามประเภทข้อมูล

ประเภทข้อมูล	จำนวนข้อมูลสูงสุด
Numeric (0-9)	7,089 characters
Alphanumeric (0-9, A-Z,$%*+-/:)	4,296 characters
8Bit byte (Binary)	2,953 bytes
Kanji, Kana	1,817 characters

ข้อมูลบนบาร์โค้ดแบบ QR Code นั้นจะมีการแทนความหมายของสัญลักษณ์ด้วยค่าแบบไบนารี โดยในส่วนของโมดูลสีดำจะแทนที่ด้วยค่า 1 และส่วนของโมดูลสีขาวจะแทนที่ด้วยค่า 0 ขนาดของ QR Code จะขึ้นอยู่กับจำนวนเวอร์ชั่น โดยใน QR Code เวอร์ชั่น 1 จะมีขนาดเท่ากับ 21 x 21 โมดูล จนสิ้นสุดที่ QR Code เวอร์ชั่น 40 จะมีขนาดโมดูลเท่ากับ 177 x 177 โมดูล ซึ่งเกิดจาก {(39*4)+21}*{(39*4)+21} [8] ดังภาพที่ 2-1 ใน International Standard ของ QR Code [2] ได้บอกถึงคุณสมบัติสะท้อนกลับ (Reflectance reversal) ของ QR Code โดยการแสดงส่วนโมดูลสีดำเป็นสีขาว และการแสดงโมดูลส่วนสีขาวเป็นสีดำ และภาพสะท้อน (Mirror Imaging) โดยการสลับเปลี่ยนแถวและคอลัมน์ แต่ยังคงสามารถอ่านได้ดังแสดงในภาพที่ 2-6



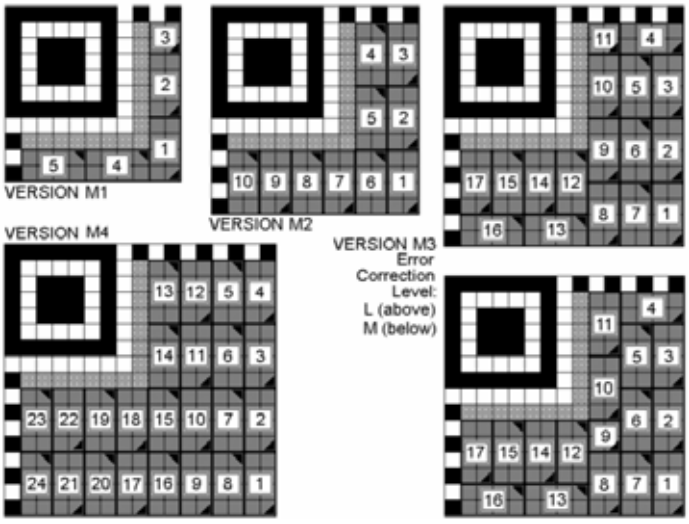
ภาพที่ 2-6 จำนวนของโมดูลใน QR Code Version 1 และ Version 2



ภาพที่ 2-7 แสดงมุมมองของ QR Code ที่สามารถถอดรหัสได้

2.3 ไมโครคิวอาร์โค้ด (Micro QR Code)

Micro QR Code เป็นบาร์โค้ดสองมิติซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของบาร์โค้ดประเภท QR Code โดยการลดทอนบางส่วนของโครงสร้าง QR Code ที่มีซ้ำซ้อนลง [2] เพื่อให้มีจำนวนโมดูลและองค์ประกอบของตัวบาร์โค้ดลดลง ซึ่ง Micro QR Code นั้นมีจำนวนเวอร์ชั่นทั้งหมด 4 เวอร์ชั่น โดยมีขนาดดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 แสดงเวอร์ชั่นของ Micro QR Code

ในแต่ละเวอร์ชั่นของ Micro QR Code จะมีจำนวนโมดูลที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละเวอร์ชั่นจะมีการเพิ่มทีละ 2 โมดูลดังนี้

1. เวอร์ชั่น M1 มีเมททริกซ์ขนาด 11x11 โมดูล
2. เวอร์ชั่น M2 มีเมททริกซ์ขนาด 13x13 โมดูล
3. เวอร์ชั่น M3 มีเมททริกซ์ขนาด 15x15 โมดูล
4. เวอร์ชั่น M4 มีเมททริกซ์ขนาด 17x17 โมดูล

ความสามารถในการเก็บข้อมูลของ Micro QR Code สามารถเก็บข้อมูลได้ 4 รูปแบบเหมือนกับ QR Code ทั่วไปแต่ด้วยจำนวนโมดูลที่น้อยทำให้ประสิทธิภาพของความจุข้อมูลลดลงตามจำนวนโมดูลที่มี จากมาตรฐาน QR Code [2] ได้ระบุความจุของ Micro QR Code ไว้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2-2 แสดงความจุของ Micro QR Code แบ่งตามประเภทข้อมูล

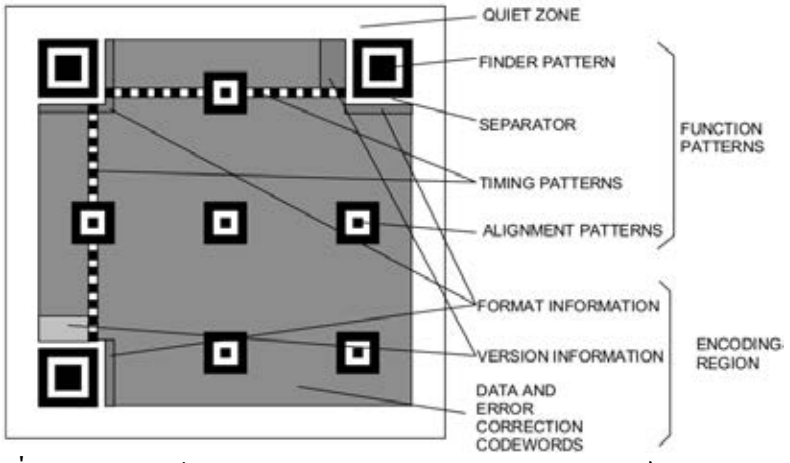
ประเภทข้อมูล	จำนวนข้อมูลสูงสุด
Numeric (0-9)	35 characters
Alphanumeric (0-9, A-Z,$%*+-/:)	21 characters
8Bit byte (Binary)	15 bytes
Kanji, Kana	9 characters

Micro QR Code นั้นมีคุณสมบัติสะท้อนกลับ (Reflectance reversal) ภาพสะท้อน (Mirror Imaging) เหมือนใน QR Code ซึ่งอธิบายในหัวข้อที่ 2.2 โดยตัวอย่างของคุณสมบัติสะท้อนกลับและภาพสะท้อนของ Micro QR Code แสดงดังภาพที่ 2-9

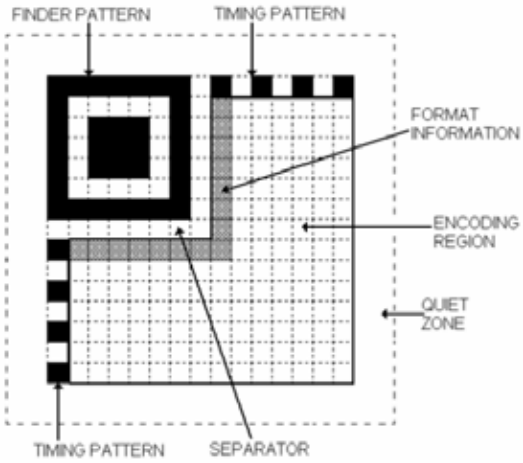
ภาพที่ 2-9 แสดงตัวอย่างของ Micro QR Code เวอร์ชั่น M2 ที่สามารถถอดรหัสได้

2.4 โครงสร้างของ QR Code และ Micro QR Code

ในส่วนโครงสร้างของ QR Code ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2-10 และ Micro QR Code ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2-11 นั้นตามมาตรฐาน [2] จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยภายในจะประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนหลักดังนี้



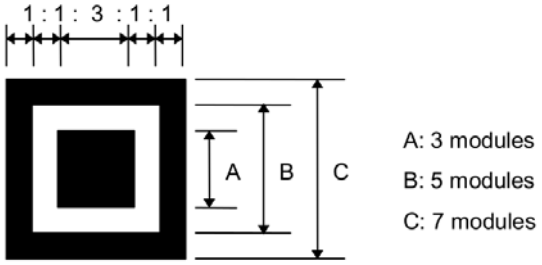
ภาพที่ 2-10 โครงสร้างของ QR Code ตามมาตรฐานสัญลักษณ์ QR Code 2005



ภาพที่ 2-11 โครงสร้างของ Micro QR Code เวอร์ชั่น M3

1. Function Pattern เป็นองค์ประกอบสำคัญในการค้นหาและใช้ในการอ่านเพื่อถอดรหัส QR Code ประกอบด้วย
    a. Quiet Zone เป็นบริเวณพื้นที่สีขาวรอบๆ QR Code ซึ่งมีขนาดความกว้างจำนวน 4 โมดูล ซึ่งเป็นส่วนช่วยให้สามารถค้นหา QR Code ได้อย่างรวดเร็ว

b. Finder Pattern เป็นส่วนที่ใช้ในการค้นหาตำแหน่งของ QR Code ซึ่งจะแสดงอยู่บริเวณ มุมซ้ายบน, มุมขวาบน และมุมซ้ายล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4 และแต่ละ Finder Pattern จะประกอบไปด้วยโมดูลสีดำ 7x7 โมดูล ซ้อนทับด้วยโมดูลสีขาว 5x5 โมดูล และซ้อนทับด้วยโมดูลสีดำ 3x3 โมดูล ซึ่ง Finder Pattern มีความสำคัญอย่างมากต่อการถอดรหัส QR Code ดังภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 โครงสร้างของ Finder Pattern

c. Separator เป็นโมดูลสีขาวซึ่งมีขนาดความกว้าง 1 โมดูล จะอยู่บริเวณระหว่าง Finder Pattern และ Encoding Region เพื่อให้สามารถแยกแยะส่วนของ Finder Pattern ได้

d. Timing Pattern ประกอบด้วยโมดูลสีดำและขาวสลับกัน โดยมีการเริ่มต้นและสิ้นสุดด้วยโมดูลสีดำ โดยหน้าที่ของ Timing Pattern ช่วยในการตรวจจับพิกัดของสัญลักษณ์เพื่อใช้ในการถอดรหัส

e. Alignment Pattern จะปรากฏใน QR Code เวอร์ชั่น 2 เป็นต้นไป ซึ่งแต่ละ Alignment Pattern นั้นจะประกอบไปด้วย โมดูลสีดำขนาด 5x5 ซ้อนทับด้วยโมดูลสีขาวขนาด 3x3 และซ้อนทับด้วยโมดูลสีดำขนาด 1x1 โดยจำนวนของ Alignment Pattern จะขึ้นอยู่กับเวอร์ชั่นของ QR Code โดยหน้าที่ของ Alignment Pattern นั้นใช้แก้ไขภาพที่มีลักษณะเอียงหรือบิดเพื่อปรับภาพให้มีลักษณะเดิม และสามารถถอดรหัสได้

2. Encoding Region เป็นองค์ประกอบสำคัญในการเข้ารหัสข้อมูล ซึ่งประกอบด้วย

a. Format Information เป็นส่วนเก็บข้อมูลประเภท Data Type , Binary Indicator ของ Error Correction Level และ Data Mask ที่ใช้ใน QR Code เพื่อใช้ในขั้นตอนการถอดรหัส

b. Version Information ปรากฏใน QR Code เวอร์ชั่น 7 ขึ้นไป เป็นส่วนบ่งบอกข้อมูลเวอร์ชั่นของ QR Code

c. Data and Error Correction Codewords เป็นส่วนที่ใช้ในการเก็บข้อมูลของการเข้ารหัสรวมถึงส่วนของข้อมูล Error Correction ซึ่งช่วยในการฟื้นฟูการถอดรหัสเมื่อ QR Code เกิดความเสียหายเกิดขึ้น

2.5 กระบวนการเข้ารหัส QR Code และ Micro QR Code

2.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis)

เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเข้าของตัวอักษร เพื่อระบุความแตกต่างของ Characters โดย QR Code มี Extended Channel Interpretation feature ซึ่งทำให้การเข้ารหัสใน Character ที่ต่างกันสามารถทำการเข้ารหัสได้ แต่ไม่สนับสนุนในการเข้ารหัส Micro QR Code ในมาตรฐานของ QR Code 2005 [2] ได้ระบุโหมดที่ใช้ใน QR Code ดังตารางที่ 2-3 และส่วนของ Micro QR Code ดังตารางที่ 2-4โดยการเข้ารหัสข้อมูลสามารถสลับโหมดข้อมูลได้หากมีความจำเป็น จากนั้นทำการระบุ Error Detection และ Correction Level โดยเลือกเวอร์ชั่นที่ต่ำที่สุดและสอดคล้องกับปริมาณของข้อมูลซึ่งแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2-5 และตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-3 Mode Indicators ของ QR Code

Mode	**QR Code symbols**
Numeric	0001
Alphanumeric	0010
Byte	0100
Kanji	1000
Structured Append	0011
Terminator	0000

ตารางที่ 2-4 Mode Indicators ของ Micro QR Code

Mode	M1	M2	M3	M4
Numeric	n/a	0	00	000
Alphanumeric	n/a	1	01	001
Byte	n/a	n/a	10	010
Kanji	n/a	n/a	11	011
Structured Append	n/a	n/a	n/a	n/a
Terminator	000	00000	0000000	000000000

ตารางที่ 2-5 แสดงเวอร์ชั่นและความจุของ QR Code ในแต่ละเวอร์ชั่น

Version	Number of modules side	Function pattern modules	Format information / version information modules	Data modules except	Data Capacity
1	21	202	31	208	26
2	25	235	31	359	44
3	29	243	31	567	70
4	33	251	31	807	100
5	37	259	31	1079	134
6	41	267	31	1383	172
7	45	390	31	1568	196
8	49	398	67	1936	242
9	53	406	67	2336	292
10	57	414	67	2768	346
11	61	422	67	3232	404
12	65	430	67	3728	466
13	69	438	67	4256	532
14	73	611	67	4651	581
15	77	619	67	5243	655

16	81	627	67	5867	733
17	85	635	67	6523	815
18	89	643	67	7211	901
19	93	651	67	7931	991
20	97	659	67	8683	1085
21	101	882	67	9252	1156
22	104	890	67	10068	1258
23	109	898	67	10916	1364
24	113	906	67	11796	1474
25	117	914	67	12708	1588
26	121	922	67	13652	1706
27	125	930	67	14628	1828
28	129	1203	67	15371	1921
29	133	1211	67	16411	2051
30	137	1219	67	17483	2185
31	141	1227	67	18587	2323
32	145	1235	67	19723	2465
33	149	1243	67	20891	2611
34	153	1251	67	22091	2761
35	157	1574	67	23008	2876
36	161	1582	67	24272	3034
37	165	1590	67	25568	3196
38	168	1598	67	26896	3362
39	173	1606	67	28256	3532
40	177	1614	67	29648	3706

ตารางที่ 2-6 แสดงเวอร์ชั่นและความจุของ Micro QR Code ในแต่ละเวอร์ชั่น

Version	Number of modules side	Function pattern modules	Format information / version information modules	Data modules except	Data Capacity
M1	11	70	15	36	5
M2	13	74	15	80	10
M3	15	78	15	132	17
M4	17	82	15	192	24

2.5.2 การเข้ารหัสข้อมูล (Data encoding)

เป็นการแปลงข้อมูลตัวอักษรไปเป็นข้อมูลแบบ Bit Stream ซึ่งเป็นไปตามข้อบังคับในการแปลงข้อมูล QR Code [2] โดยทำการแทรกข้อมูลของ Mode Indicators ด้านหน้าของ Segment จากนั้นทำการเติม Terminator ในส่วนท้ายสุดของข้อมูล และทำการแบ่ง Bit Stream เป็น Codewords โดยมีความยาวแต่ละชุด 8 บิต แล้วทำการเพิ่มจำนวนของ Codeword ให้ครบตามจำนวนของเวอร์ชั่นที่กำหนดในการเข้ารหัส ตัวอย่าง เช่น หากต้องการเข้ารหัสข้อมูลที่เป็น Numeric จะต้องเลือกโหมด Numeric ในตารางที่ 2-3 และตารางที่ 2-4 คือ 0001 ในส่วนของการเข้ารหัส QR Code และ 000 ในส่วนการเข้ารหัส Micro QR Code ซึ่งจะต้องดูจำนวนของข้อมูลบิตสำหรับการนับ [8] ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 จำนวนบิต Character Count Indicator ของ QR Code และ Micro QR Code

Version	Numeric mode	Alphanumeric mode	Byte mode	Kanji mode
M1	3	n/a	n/a	n/a
M2	4	3	n/a	n/a
M3	5	4	4	3
M4	6	5	5	4
1 ถึง 9	10	9	8	8
10 ถึง 26	12	11	16	10
27 ถึง 40	14	13	16	12

2.5.3 การเข้ารหัส Error Correction (Error Correction Coding)

การเข้ารหัสในส่วนของ Error Correcting Codeword จะใช้อัลกอริทึมของ Reed-Solomo Error Correcting [2] โดยทุกบล็อกของ Codeword นั้นจะมีการคำนวณ Error Correction Codeword [8] เมื่อได้ข้อมูล Error Correction Codewords ทำการนำมาต่อท้ายส่วนของข้อมูลเป็นลำดับ ซึ่งในมาตรฐาน QR Code [2] จะมีการแบ่งระดับของ Error Correcting ดังแสดงในตารางที่ 2-8 ซึ่งส่วนของ Error Correcting ของ Micro QR Code จะมีการแบ่งตามเวอร์ชั่นดังแสดงในตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-8 แสดงระดับ Error Correcting

Error Correcting Level	**Recovery Capacity % (approx.)**
L	7
M	15
Q	25
H	30

ตารางที่ 2-9 แสดง Error Correction ของ Micro QR Code ในแต่ละเวอร์ชั่น

Version	Error Correction Level
M1	Error Detection only
M2	L, M
M3	L, M
M4	L, M, Q

2.5.4 การเตรียม Structure final message

การเตรียม Structure final message โดยการแทรกส่วนของ Data Codewords และ Error Correction Codeword ในแต่ละบล็อกโดยแสดงด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.5.4.1 แบ่งข้อมูลของ Data Codewords ออกตามลำดับเป็น n บล็อกตามที่ระบุใน [8] โดยจะถูกกำหนดตามระดับของ Error Correcting และข้อมูลของเวอร์ชั่น

2.5.4.2 ส่วน Data Codewords ทุกส่วนจะต้องมีการคำนวณ Corresponding Block ของ Error Correction Codeword [8]

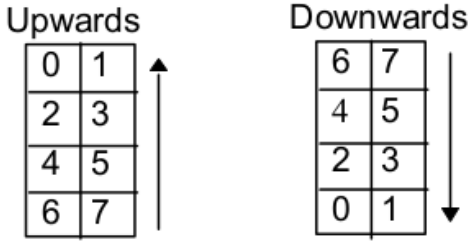
2.5.4.3 เรียงข้อมูลโดยเริ่มจาก Data block 1, Codeword 1 ตามด้วย Data block 2, Codeword 2 ทำไปเรื่อยๆ จนถึง Data block และ Codeword ตัวสุดท้าย จากนั้นจะทำการต่อข้อมูลด้วย Error Correction Codeword ดังแสดงในภาพที่ 2-13 ซึ่งจากรายการลำดับที่แสดงในภาพ 2-11 โดยข้อมูล Final Message Codeword จะได้ดังนี้ D1, D12, D23, D35, D2, D13, D24, D36, ... D11, D22, D33, D45, D34, D46, E1, E23, E45, E67, E2, E24, E46, E68, ... E22, E44, E66, E88

	Data codewords					Error correction codewords			
Block 1	D_1	D_2	.....	D_{11}		E_1	E_2	.....	E_{22}
Block 2	D_{12}	D_{13}	.....	D_{22}		E_{23}	E_{24}	.....	E_{44}
Block 3	D_{23}	D_{24}	.....	D_{33}	D_{34}	E_{45}	E_{46}	.....	E_{66}
Block 4	D_{35}	D_{36}	.....	D_{45}	D_{46}	E_{67}	E_{68}	.....	E_{88}

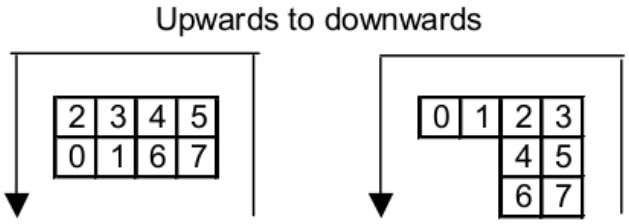
ภาพที่ 2-13 แสดงรูปแบบการวาง Data Codeword และ Error Correction Codewords

2.5.5 การวางตำแหน่งโมดูลในเมทริกซ์ (Module placement in matrix)

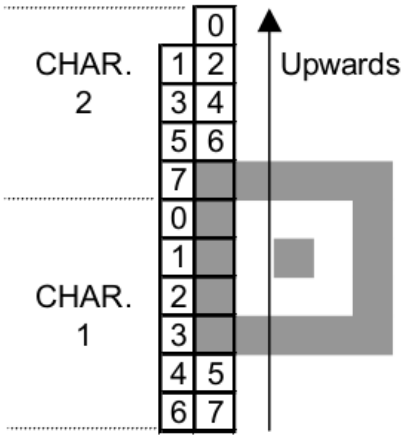
การวางตำแหน่งโมดูลของ QR Code และ Micro QR Code มีการจัดวางในรูปแบบแนวตั้งและแนวนอน โดยรูปแบบการจัดวางนั้นมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ การจัดวางแบบปกติ และการจัดวางแบบไม่ปกติ โดยรูปแบบการจัดวางแบบไม่ปกติจะขึ้นอยู่กับส่วนของ Function Pattern โดยเมื่อการจัดเรียงมีการผ่านส่วนของ Function Pattern จะต้องมีการเปลี่ยนทิศทางของการจัดวางเพื่อไม่ให้เกิดการซ้อนกันกับส่วนของ Function Pattern โดยรูปแบบการจัดวางแสดงดังภาพที่ 2-14, ภาพที่ 2-15 และภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-14 ทิศทางจัดวางในทิศทางขึ้นและลง



ภาพที่ 2-15 ทิศทางการจัดวางในรูปแบบปกติและรูปแบบไม่ปกติ



ภาพที่ 2-16 ตัวอย่างจัดวางในจุดที่ใกล้เคียงกับ Alignment Pattern

2.5.6 การทำ Data masking

ในการทำ Data masking จะต้องมีพิจารณารูปแบบของ Masking ที่เหมาะสมในอัตราส่วนที่สม่ำเสมอระหว่างโมดูลที่เป็นสีขาวและโมดูลที่เป็นสีดำ ตามข้อมูลใน QR Code [8] เพื่อป้องกันปัญหาเนื่องจากอัตราส่วน Bit pattern ของ Finder Pattern ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1011101 ดังนั้น Data masking ที่ได้จะไม่สามารถมี Bit pattern เหมือนกับ Finder Pattern จึงจำเป็นต้องทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.3.6.1 การวางตำแหน่งของ Data masking จะไม่ถูกนำไปวางในพื้นที่ที่มีองค์ประกอบของ Quiet Zone, Finder Pattern, Separator , Timing Patterns และ Alignment Patterns ซึ่งการทำ Data masking จะทำในส่วนของ Data และ Error correction Codewords เท่านั้น

2.3.6.2 พิจารณาโมดูลโดยใช้ XOR ในส่วนผลของการจัดวางโมดูลกับ Data Masking ทุกรูปแบบ ซึงอาจจะทำให้มีการสลับผลของโมดูลแต่ละตำแหน่งจากสีดำเป็นสีขาว หรือจากสีขาวเป็นสีดำก็ได้

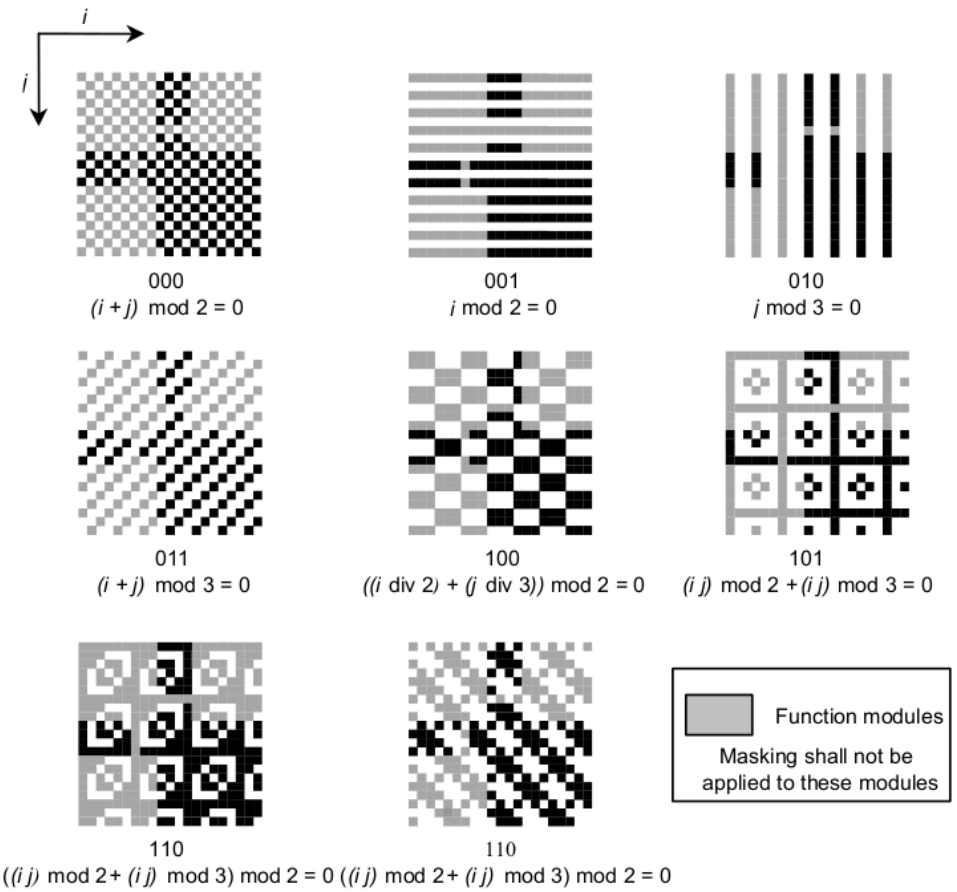
2.3.6.3 ประเมินผลลัพธ์จากการแปลง Pattern โดยให้คะแนน Penalty กับรูปแบบที่ไม่ต้องการ โดยทำการให้คะแนนในทุกๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลง

2.3.6.4 การเลือก Mask Pattern ผลจากการประเมินที่มีคะแนน Penalty น้อยที่สุด

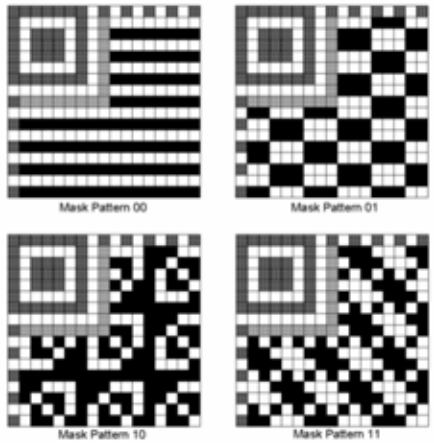
จากตารางที่ 2-10 เป็นการแสดงรูปแบบของ Data Masking โดยมีการอ้างอิงถึงบิตที่ใช้ในส่วนของ Format Information โดย Mask Pattern ที่สร้างขึ้นจะอยู่ภายในบริเวณของ Encoding Region ซึ่งไม่รวมถึงพื้นที่ของ Format Information และ Version Information ตัวอย่างเช่น Mask Pattern ที่ 001 : ที่ตำแหน่ง (10,10) จะได้ 10 mod 2 = 0 หมายถึงให้ทำการสลับสีบิตจากสีเดิม ที่ตำแหน่ง (9,10) จะได้ 9 mod 2 = 1 หมายถึงให้บิตสีเดิม โดยรูปแบบของ Data Mask pattern ของ QR Code แสดงดังภาพที่ 2-17 Data Mask pattern ของ Micro QR Code แสดงดังภาพที่ 2-18 และภาพขั้นตอนการวาง Data Mask ในภาพรวมแสดงดังภาพที่ 2-19

ตารางที่ 2-10 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการเลือก Pattern ส่วนของ QR Code และ Micro QR Code

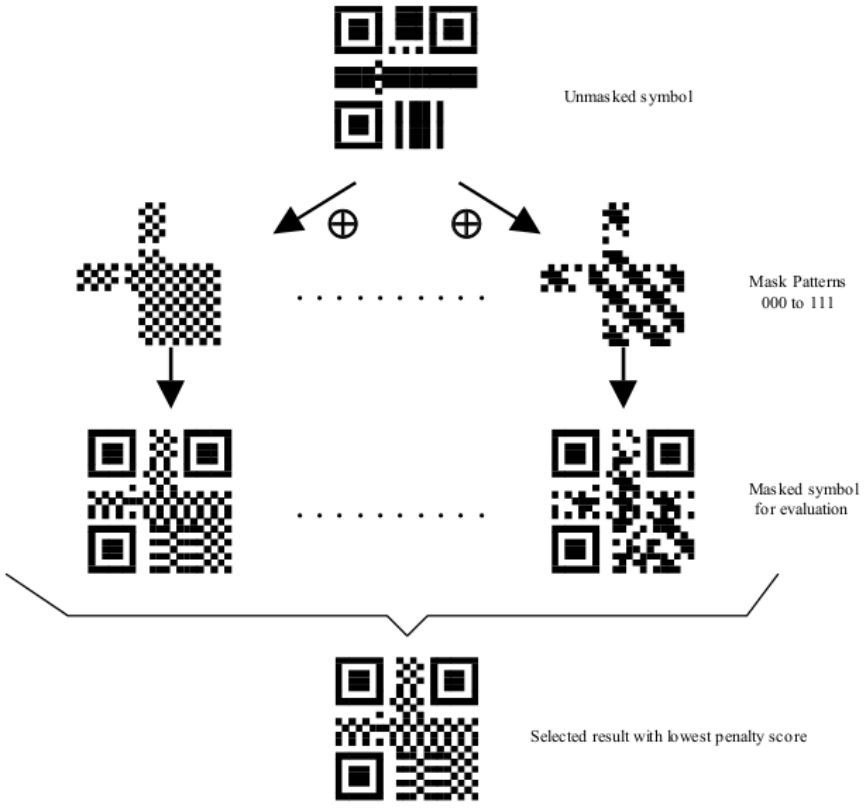
Data mask pattern reference for QR Code symbols	**Data mask pattern reference for Micro QR Code symbols**	**Condition**
000		(i+j) mod 2 =0
001	00	i mod 2 =0
010		j mod 3 =0
011		(i+j) mod 3 =0
100	01	((i div 2) + (j div 3)) mod 2 =0
101		(i+j) mod 2 + (i+j) mod 3 =0
110	10	((i+j) mod 2 + (i+j) mod 3) mod 2 =0
111	11	((i+j)mod 2 + (i+j) mod 3) mod 2 =0



ภาพที่ 2-17 รูปแบบ Data mask pattern ของ QR Code



ภาพที่ 2-18 รูปแบบ Data mask pattern ของ Micro QR Code



ภาพที่ 2-19 ขั้นตอนการวาง Data Mask

2.5.7 การวาง Format information และ Version information

เป็นกระบวนการสุดท้ายในการสร้าง QR Code และ Micro QR Code

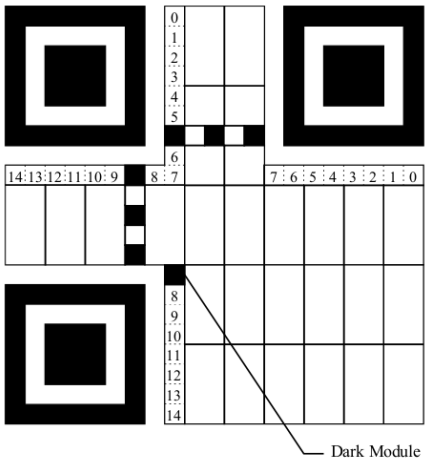
2.5.7.1 Format information ในส่วนของข้อมูล QR Code เป็นส่วนของข้อมูลจำนวน 15 บิต โดยประกอบด้วย Data bits จำนวน 5 บิต และ Error Correction bits จำนวน 10 บิต โดยได้จากการคำนวณ BCH (15,5) [8] โดยข้อมูล 2 บิตแรกจะบอกถึงระดับของ Error Correction ซึ่งเป็นไปตามตารางที่ 2-11

ตารางที่ 2-11 ข้อมูล Binary Indicator ของ Error Correction Level ใน QR Code

Error Correction Level	Binary indicator
L	10
M	00
Q	11
H	10

ตัวอย่างของ Format information

สมมุติว่าจะเลือก Error Correction level M	:	00
เลือก Data mask pattern reference	:	101
ตัวอย่างข้อมูล	:	00101
BCH bit	:	0011011100
Unmasked bit sequence	:	001010011011100
Mask pattern สำหรับ XOR operation	:	101010000010010
Format information module pattern	:	100000011001110

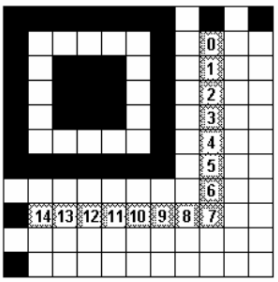


ภาพที่ 2-20 ตำแหน่งการวาง Format Information ของ QR Code

2.5.7.2 Format information ในส่วนของ Micro QR Code เป็นส่วนของข้อมูล จำนวน 15 บิต โดยประกอบด้วย Data bits จำนวน 5 บิต และ Error Correction bits จำนวน 10 บิต โดยได้จากการคำนวณ BCH (15,5) [8] โดยข้อมูล 3 บิตแรกจะบอกถึงระดับของ Error Correction และ Version ของ Micro QR Code ซึ่งเป็นไปตามตารางที่ 2-12

ตารางที่ 2-12 ข้อมูล Binary Indicator ใน Micro QR Code

Version	Error Correction Level	Binary indicator
M1	Error Detection Only	000
M2	L	001
M2	M	010
M3	L	011
M3	M	100
M4	L	101
M4	M	110
M4	Q	111

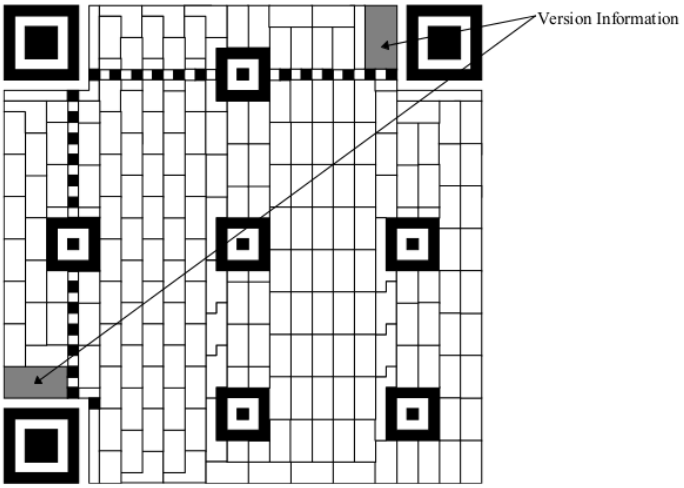


ภาพที่ 2-21 ตำแหน่งการวาง Format Information ของ Micro QR Code

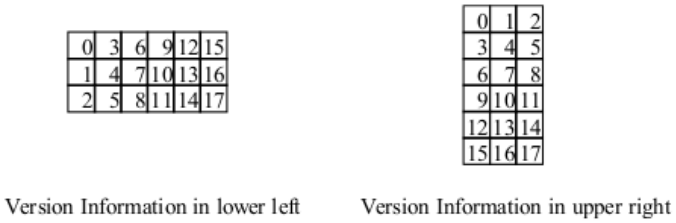
2.5.7.3 Version information จะมีใน QR Code เวอร์ชั่นตั้งแต่ 7 เป็นต้นไป ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลจำนวน 18 บิต โดยเป็นข้อมูล Data bits 5 บิต และข้อมูล Error Correction bits 12 บิต โดยสามารถคำนวณได้จาก [8] ส่วนของ QR Code ที่มีเวอร์ชั่นต่ำกว่า 7 นั้นจะมีข้อมูล Vertion Information เป็น 0 ทั้งหมด โดยตำแหน่งการวางข้อมูล Vertion Information จะแสดงดังภาพที่ 2-22

ตัวอย่างของข้อมูล Version information

สมมุติหมายเลข Version	:	7
ตัวอย่างข้อมูล	:	000111
BCH bits	:	110010010100
Format information module pattern	:	000111110010010100



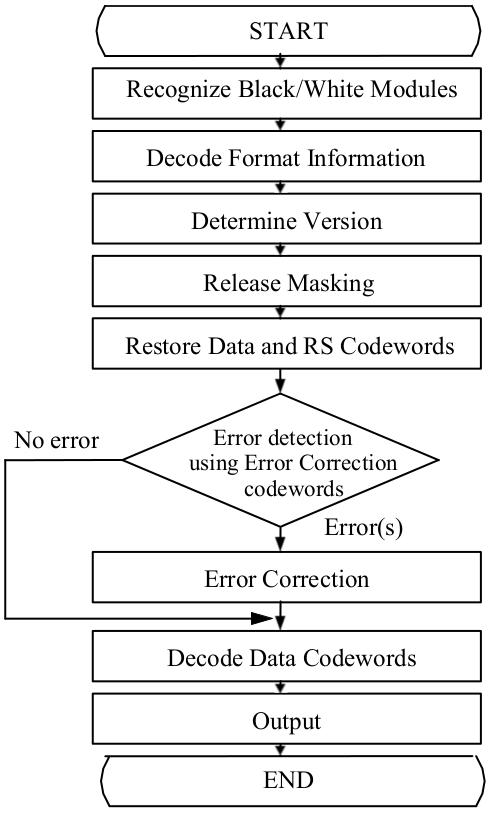
ภาพที่ 2-22 ตำแหน่งของ Version Information



ภาพที่ 2-23 ทิศทางการวาง Version Information

2.6 กระบวนการถอดรหัส QR Code และ Micro QR Code

กระบวนการในการถอดรหัส QR Code นั้น ใน QR Code 2005 [2] ได้แสดงขั้นตอนการถอดรหัส ซึ่งแสดงในภาพที่ 2-24 เป็นกระบวนการย้อนกลับของกระบวนการเข้ารหัส QR Code และ Micro QR Code



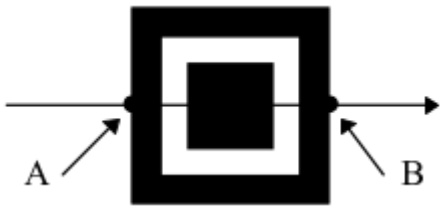
ภาพที่ 2-24 แสดงกระบวนการถอดรหัส QR Code

โดยขั้นตอนของการถอดรหัส QR Code และ Micro QR Code มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1 แปลงภาพที่นำเข้าโดยการแปลงเป็นภาพขาวดำ

2.6.2 ค้นหา Finder Pattern ใน QR Code [8] จะมีใน 3 แห่งที่ ซึ่งลักษณะของ Finder Pattern ทั้ง 3 จะประกอบไปด้วยโมดูล dark-light-dark-light-dark โดยมีอัตราส่วนอยู่ที่ 1:1:3:1:1

2.6.2.1 ในการค้นหาจะทำการหาส่วนขอบนอกของ Finder Pattern ซึ่งคือจุดเริ่มต้น A ไปจนถึงจุด B จากนั้นทำการหาจุดศูนย์กลางของ Finder Pattern ซึ่งคือจุดกลางระหว่างระยะ A และ B และผลลัพธ์จะได้แกน x ที่ต้องการ ดังภาพที่ 2-25



ภาพที่ 2-25 การแสกนไลน์ ใน Finder Pattern

2.6.2.2 ทำขั้นตอน 2.6.2.1 ซ้ำอีก 2 ครั้งโดยเลือกพิจารณาจุดกึ่งกลางในแกน y

2.6.2.3 การพิจารณาจุดศูนย์กลางของ Finder Pattern ทำได้โดยวาดเส้นจากตำแหน่ง A ไป B ในแกน x และแกน y ซึ่งจุดของเส้นที่ตัดกัน คือ จุดศูนย์กลางของ Finder Pattern

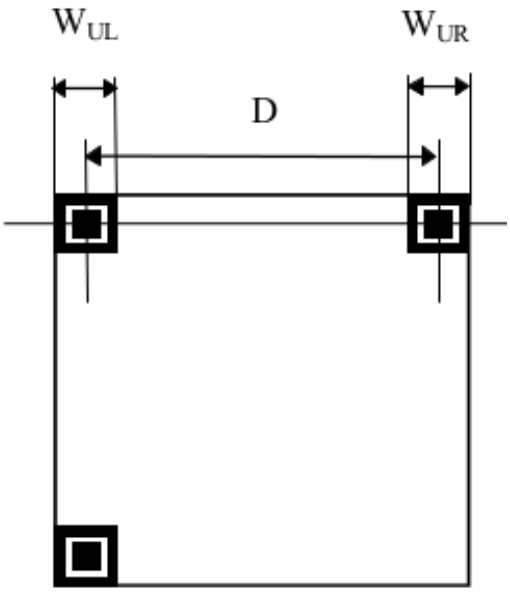
2.6.2.4 ทำขั้นตอนที่ 2.6.2.1 และ 2.6.2.3 ซ้ำเพื่อหาส่วน Finder Pattern ที่เหลืออีก 2 ตำแหน่ง

2.6.2.5 ในกรณีที่ไม่สามารถหาพื้นที่ที่สนใจได้ ให้ทำกระบวนการ Reverse module ก่อนทำกระบวนการในขั้นตอนที่ 2.6.2.1

2.6.2.6 ในกรณีที่พบ Finder Pattern เพียง 1 ตำแหน่ง กระบวนการถอดรหัสนั้นจะมอง QR Code นั้นเป็น Micro QR Code

2.6.3 ทำการพิจารณาแนวการหมุนของ QR Code โดยวิเคราะห์จุดศูนย์กลางของคู่อันดับของ Finder Pattern เพื่อระบุตำแหน่ง ว่า Finder Pattern ใด จะต้องอยู่ในตำแหน่งซ้ายบนของ QR Code และมุมในการหมุนของ QR Code

2.6.4 พิจารณาระยะ D โดยได้จากการนำจุดศูนย์กลางของ Finder Pattern ในข้อที่ 2.6.1 มาวัดระยะจากจุดศูนย์กลางของ Finder Pattern มุมซ้ายบนถึงจุดศูนย์กลางของ Finder Pattern มุมขวาบน โดยให้สัญลักษณ์ความกว้างของ Finder Pattern ทั้งสองตัวแทนด้วย W_{UL} ในฝั่งบนซ้าย และ W_{UR} ในฝั่งบนขวา ดังแสดงในภาพที่ 2-26



ภาพที่ 2-26 แสดง Finder Pattern ที่อยู่ส่วนบนของ QR Code

2.6.5 การคำนวณหา Nominal X Dimension ของสัญลักษณ์ QR Code โดยคำนวณจากสมการที่ 2-1

$$X = \frac{(W_{UL}+W_{UR})}{14} \tag{2-1}$$

2.6.6 การคำนวณหา Version (V) ของ QR Code โดยคำนวณจากสมการที่ 2-2

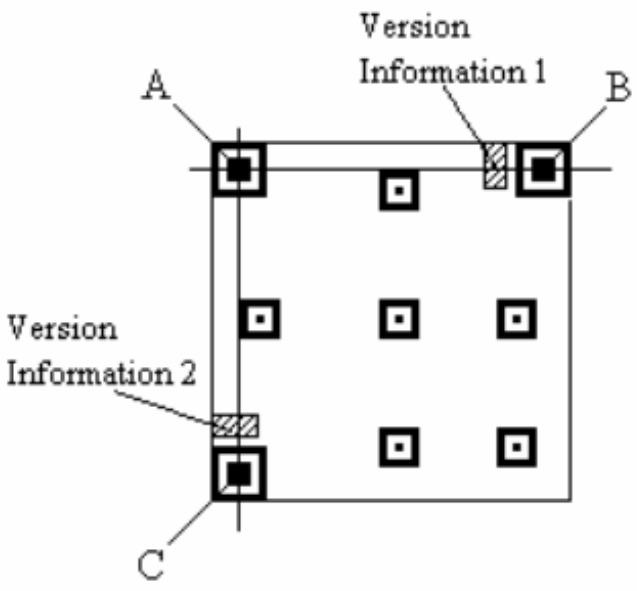
$$V = \frac{\left[\left(\frac{D}{X}\right)-10\right]}{14} \tag{2-2}$$

2.6.7 ในการคำนวณ Version ของ QR Code โดยถ้าผลลัพธ์จากการคำนวณในข้อที่ 2.6.6 ได้ค่า 6 หรือน้อยกว่า ให้ถือว่าผลลัพธ์ที่ได้เป็นหมายเลข Version ของ QR Code แต่กรณีที่ได้ค่า 7 หรือมากกว่านั้นให้ใช้กระบวนการต่อไปนี้ในการระบุ Version

2.6.7.1 ทำการคำนวณโดยนำค่าความกว้าง W_{UR} หารด้วย 7 หาขนาดของโมดูล CP_{UR} โดยใช้สมการที่ 2.3

$$CP_{UR} = \frac{W_{UR}}{7} \tag{2.3}$$

2.6.7.2 หาเส้น Sampling Guide Line AB และ AC โดยพิจารณาจากจุด A, B และ C ซึ่งแต่ละจุดคือจุดกึ่งกลางของ Finder Pattern โดยทำการลากเส้นผ่านทั้งสามจุดของ Finder Pattern ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2-27 ผลลัพธ์จากการหาเส้น Guide ที่ผ่านจุดกึ่งกลางของโมดูล โดยพื้นที่ของ Version Information 1 สามารถทำการคำนวณได้จากพื้นที่ที่ขนานกับเส้นที่ Guid ซึ่งขนาดของโมดูล CP_{UR} ค่าไบนารีจะถูกพิจารณาจากโมดูลสีดำ (Dark Pattern) หรือโมดูลสีขาว (Light Pattern) จากกระบวนการทำ Sampling Grid

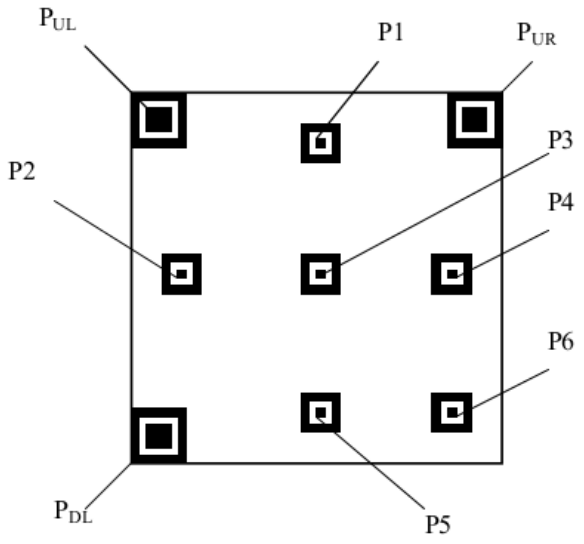


ภาพที่ 2-27 ตำแหน่งของ Finder Pattern และ Version Information

2.6.7.3 การระบุ Version ด้วยการหา Error Correcting ในตาราง Anex D.2 [2]

2.6.7.4 ถ้า Error ที่ได้มีค่ามากกว่า Error Correction ให้ทำการคำนวณความกว้างของ Finder Pattern ที่อยู่ตำแหน่งล่างซ้ายของ QR Code โดยทำตามขั้นตอนในข้อที่ 2.6.7.1 ถึงขั้นตอนในข้อที่ 2.6.2.3 โดยการถอดรหัสข้อมูล Version จะทำการถอดรหัสส่วน Version information 2 ดังแสดงในภาพที่ 2-27

2.6.8 สำหรับ Version 1 ให้กำหนดค่า X โดยการประมาณระยะของโมดูลสีขาวถึงโมดูลสีดำในบริเวณ Timing Patterns และทำแบบเดียวกันโดยให้ Y เป็นการประมาณช่องว่างของจุดกึ่งกลางของโมดูลสีดำและโมดูลสีขาวในส่วนของ Timing Pattern ในฝั่งซ้าย จากนั้นสร้าง Sampling grid โดยทำการลากเส้นแนวนอนผ่านส่วนของ Timing Pattern ด้านบน โดยใช้เส้นที่ขนานกันในตำแหน่งช่องว่างแนวตั้งของจุด Y ประกอบด้วย 6 เส้นเหนือ Timing Pattern และทุกเส้นใต้ Timing Pattern จะบ่งบอกถึง Version ของ QR Code จากนั้นทำการลากเส้นแนวตั้งผ่าน Timing Pattern ฝั่งซ้าย โดยเส้นที่ขนานกันในตำแหน่งช่องว่างแนวนอนของ X จะประกอบด้วยเส้นอ้างอิงในแนวตั้งทั้ง 6 เส้น โดยในทุกเส้นทางขวาของ Timing Pattern เป็นไปตาม Version ของ QR Code ส่วนของ QR Code ใน Version ที่มากกว่า ให้ทำการพิจารณาคู่อันดับกึ่งกลางของแต่ละ Alignment Pattern สามารถดูได้ที่ Annex E [2] ในการทำ Sampling grid ระหว่างจุดดังในภาพที่ 2-28



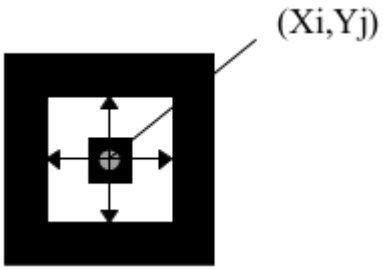
ภาพที่ 2-28 ตำแหน่ง Finder Patterns และ Alignment Pattern ในการ Sampling grids

2.6.8.1 หาความกว้างของ W_{UL} ของ Finder Pattern บริเวณบนซ้าย P_{UL} ด้วยการหาร 7 เพื่อหาขนาด C_{UL} ได้จากสมการที่ 2.4

$$CP_{UL} = \frac{W_{UL}}{7} \tag{2.4}$$

2.6.8.2 พิจารณาคู่อันดับระหว่าง Alignment Pattern P1 และ Alignment Pattern P2 แสดงดังภาพที่ 2-27 โดยขึ้นกับคู่อันดับกึ่งกลางของ A ใน Finder Pattern บริเวณบนซ้าย P_{UL} โดยขนานกับเส้น AB และ AC รวมถึงขนาดของ CP_{UL}

2.6.8.3 หาพื้นที่บริเวณขาวซึ่งอยู่ภายใน Alignment Pattern ที่จุด P1 และจุด P2 เริ่มจากพิกเซลคู่อันดับคู่อันดับกึ่งกลางเพื่อหาจุดกึ่งกลาง Xi และ Yj ดังภาพที่ 2-29



ภาพที่ 2-29 จุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern

2.6.8.4 ประมาณจุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern P3 โดยขึ้นกับคู่อันดับศูนย์กลางของ Finder Pattern บริเวณบนซ้าย P_{UL} และการหาจุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern P1 และ Alignment Pattern P2 สามารถหาได้จากขั้นตอนที่ 2.6.8.3

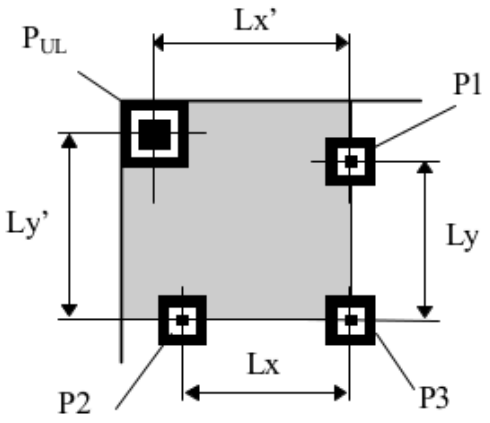
2.6.8.5 หาจุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern P3 ตามขั้นตอนที่ 2.6.8.3

2.6.8.6 ทำการหาระยะของ L_x ซึ่งเป็นระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern P2 ไปยังจุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern P3

และระยะของ L_y ซึ่งเป็นระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern P ไปยังจุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern P3 ทำการแบ่ง L_x และ L_y ด้วยการกำหนดพื้นที่ว่างของ Alignment Pattern โดยกำหนดให้ AP คือเป็นพื้นที่ว่างในส่วนของโมดูลของ Alignment Pattern ซึ่งดูได้จากใน (Table E.1)[6] และในแนวเดียวกัน $L_{x'}$ ซึ่งเป็นระยะทางในแนวนอนระหว่างจุดกึ่งกลางของ Finder Pattern P_{UL} กับจุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern P1 และ $L_{y'}$ ซึ่งเป็นระยะทางแนวตั้งฉากระหว่างจุดศูนย์กลางของ Finder Pattern ด้านบนซ้าย P_{UL} กับ จุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern P2 จากนั้นแบ่ง $L_{x'}$ และ $L_{y'}$ เพื่อให้ได้ค่า $CP_{y'}$ ของตำแหน่งด้านบนและ $CP_{y'}$ ในฝั่งซ้ายบนของภาพสัญลักษณ์ QR Code โดยใช้สมการดังนี้

$CP_{y'} = L_{x'}/$ (คอลัมน์ของคู่อันดับจุดศูนย์กลางของ Alignment pattern P1 – คอลัมน์ของคู่อันดับของจุดศูนย์กลางของ Finder pattern P_{UL} ซึ่งเป็น Finder pattern ที่อยู่ทางด้านซ้ายบน (2.5)

$CP_{y'} = L_{x'}/$ (แถวของคู่อันดับของจุดศูนย์กลางใน Alignment pattern P2 – แถวของคู่อันดับของจุดศูนย์กลางของ Finder Pattern P_{UL} ซึ่งเป็น Finder pattern ที่อยู่ทางด้านซ้ายบน (2.6)

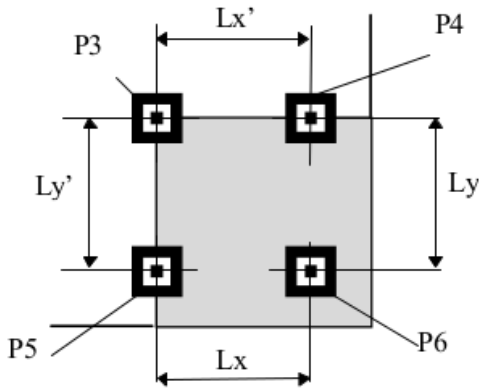


ภาพที่ 2-30 สัญลักษณ์บริเวณบนซ้ายของ QR Code

2.6.8.7 พิจารณาพื้นที่ Sampling grid ที่ครอบคลุมบริเวณด้านบนซ้ายของ QR Code โดยขึ้นอยู่กับ CPx, CPx', CPy และ CPy' ซึ่งมีแสดงพื้นที่ของสัญลักษณ์ QR Code ในตำแหน่งด้านบนซ้าย

2.6.8.8 ในการพิจารณา Sampling grids บริเวณพื้นที่ในส่วนบนขวา (ครอบคลุมด้วยส่วนของ Finder Pattern ฝั่งบนขวา P_{UR}, Alignment Pattern P1, Alignment Pattern P3 และ Alignment Pattern P4) บริเวณพื้นที่ในส่วนล่างซ้าย (ครอบคลุมด้วยส่วนของ Finder Pattern ฝั่งล่างซ้าย P_{UR}, Alignment Pattern P2, Alignment Pattern P3 และ Alignment Pattern P5)ของสัญลักษณ์ QR Code

2.6.8.9 ใน Alignment Pattern P6 จากภาพที่ 2-28 ประมาณคู่อันดับของจุดศูนย์กลางจากส่วนระดับของ CPx' และ CPy' โดยเป็นค่าที่ได้จากพื้นที่ว่างของ Alignment Pattern ในจุดที่ P3, P4 และ P5 ตามลำดับ ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern



ภาพที่ 2-31 สัญลักษณ์ในบริเวณขวาล่างของ QR Code

2.6.8.10 ทำขั้นตอน 2.6.8.5 ถึง 2.6.8.8 ในส่วนพื้นที่ด้านล่างขวา ของ QR Code

2.6.8.11 ตรวจสอบผลของการทำ sampling grid ว่ามีพื้นที่ใดยังไม่ได้ทำบ้างโดยใช้วิธีเดียวกัน

2.6.9 ทำ Global Threshold กับส่วนตัวอย่างซึ่งมีขนาด 3x3 พิกเซล และทำการแบ่งเป็น 2 กลุ่ม โดยให้กลุ่มมืดแทนค่าด้วย 1 และกลุ่มสว่างแทนค่าด้วย 0

2.6.10 ถอดรหัสส่วนของ Format information ซึ่งอยู่ใกล้บริเวณของ Finder Pattern ซ้ายบน ถ้าการถอดรหัส Format information ไม่ถูกต้อง ให้ทำการย้ายพิจารณาใน

ส่วนของ Format information ซึ่งอยู่ใกล้บริเวณของ Finder Pattern ขวาบน และล่างซ้ายตามลำดับ

2.6.11 สำหรับกรณีไม่สามารถถอดรหัส Format information ได้ทำการอ่านในทิศทางตรงกันข้าม และทำการถอดรหัสแบบ Mirror ของตำแหน่ง Row และ Column ที่เป็นคู่อันดับ Transposed

2.6.12 สำหรับ Micro QR Code ให้ทำการตรวจสอบมุมที่เป็นไปได้ในการหมุน โดยการวิเคราะห์จากข้อที่ 2.6.2.3 โดยเทียบกับภาพที่แกนเซ็นเซอร์เป็น θ, $\theta + 90^o$, $\theta + 180^o$ และ $\theta + 270^o$

2.6.13 ทำการวาดเส้น 3 เส้นขนานบนแกนของ Finder Pattern โดยให้มีระยะเท่ากัน และทำการวัดระยะจากจุด A ไปจุด B ในแต่ละเส้น

2.6.14 ทำการคำนวณเงื่อนไขขนาดโมดูลโดยกำหนดค่า X โดยมีขนาดหนึ่งในเจ็ดในแต่ละแกนจากระยะจากจุด A ไปจุด B

2.6.15 ใช้ส่วนด้านข้างของขอบนอก Finder Pattern ขยายเส้นภายนอกจาก Finder Pattern ไปยังสองทิศทาง โดยขนานไปกับขอบ และขนาด 0.5X จากขอบ

2.6.16 การหา Timing Pattern

2.6.16.1 การระบุส่วนขอบของ Finder Pattern ซึ่งตั้งฉากกับส่วนอื่น

a. พื้นที่ที่ชัดเจนอย่างน้อยที่สุดขนาด 1.5X

b. ส่วนสลับระหว่างพื้นที่มืดและพื้นที่สว่าง จะมีระยะเท่ากันที่ 1X จากขอบของ Finder Pattern ในทิศทางตรงข้าม

2.6.16.2 ตรวจสอบจำนวนของโมดูลมืดซึ่งอยู่ระหว่าง 2 โมดูลถึง 5 โมดูล

2.6.17 ทำการตรวจสอบเงื่อนไขของเวอร์ชั่นจากจำนวนโมดูลดำบน Timing Pattern โดยจำนวน 2 โมดูล คือ เวอร์ชั่น M1 จำนวน 3 โมดูล คือ เวอร์ชั่น M2 จำนวน 4 โมดูล คือ เวอร์ชั่น M3 และจำนวน 5 โมดูล คือ เวอร์ชั่น M4

2.6.18 ทำการ XOR ส่วนของ Encoding region กับส่วนของ Data Mask Pattern เพื่อทำการถอด Data Mask เพื่อนำส่วนข้อมูลของ Data Codewords และ Error Codeword ออกมา

2.6.19 พิจารณาสัญลักษณ์ของ Codewords ตามกฎการวาง [2] (6.7.3)

2.6.20 จัดลำดับของ Codeword ให้อยู่ในรูปแบบ Block โดยเป็นไปตามรูปแบบของ Version และ Error Correction Level

2.6.21 ตรวจหาข้อผิดพลาด และทำการกู้คืนข้อมูลซึ่งแสดงใน Annex B [2]

2.6.22 กู้คืนส่วนของข้อมูลต้นฉบับ โดยประกอบตามลำดับของ Data Block

2.6.23 แบ่งข้อมูลบิตออกเป็นส่วนๆ โดยเริ่มที่ Mode Indicator ในส่วนของความยาวจะขึ้นอยู่กับ Character Count Indicator

2.6.24 ทำการถอดรหัสในแต่ละส่วนที่ได้จากการแบ่ง Data bit stream

2.7 พื้นฐานการประมวลผลภาพดิจิทัล

ภาพดิจิทัล (Digital Image) เป็นข้อมูลที่มีการแสดงผลและเก็บอยู่ในลักษณะของข้อมูลแบบสองมิติ ซึ่งข้อมูลแต่ละตำแหน่งถูกแทนที่ด้วยข้อมูลบิท ภาพดิจิทัลมีที่มาหลากหลายรูปแบบซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยผ่านอุปกรณ์กล้องหรือเครื่องสแกนเนอร์ในรูปแบบต่าง ซึ่งการประมวลผลภาพดิจิทัลถูกนำไปประยุกต์ในงานต่างๆ [9] เช่นการประมวลผลทางการแพทย์เพื่อวินิจฉัยโรค การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อวิเคราะห์พื้นที่ เป็นต้น

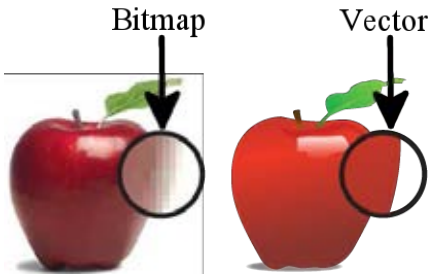
2.7.1 รูปแบบของภาพดิจิทัล

2.7.1.1 ภาพแบบบิทแมพ (Bitmap Image)

คือภาพที่เกิดจากการประกอบกันของจุดสีต่างๆ เรียกว่า พิกเซล (Pixel) โดยการเรียงต่อกันของจุดภาพในลักษณะของตาราง ซึ่งแต่ละจุดภาพจะมีการเก็บค่าสีหรือระดับของความเข้มแสง โดยในตารางของภาพบิทแมพจะมีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถแยกแยะในส่วนรายละเอียดย่อยๆด้วยตาได้ โดยทั่วไปภาพแบบบิทแมพจะได้แก่ ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องดิจิทัล หรือภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์

2.7.1.2 ภาพแบบเวกเตอร์ (Vector Image)

คือภาพที่เกิดจากกระบวนการทางเรขาคณิต โดยมีคุณสมบัติที่ต่างจากภาพแบบบิทแมพ คือไม่ว่าจะมีการขยายขนาดภาพแบบเวกเตอร์มากเท่าไร ก็จะยังคงเห็นภาพที่มีความระเอียดมากเช่นเดิม เนื่องจากข้อมูลภายในภาพเวกเตอร์นั้นประกอบด้วยข้อมูลแบบเส้นตรงหรือเส้นโค้งในแบบของรูปทรงต่างๆ โดยการใช้งานภาพแบบเวกเตอร์นั้นจะต้องมีการคำนวณสมการที่บันทึกไว้และสร้างรูปทรงของภาพขึ้นมาแสดงผลใหม่ทุกครั้ง ภาพแบบเวกเตอร์จึงเหมาะสมกับการทำงานแบบกราฟิกหรือการสร้างภาพวาด



ภาพที่ 2-32 ตัวอย่างภาพในแบบ Bitmap และVector

2.7.2 ประเภทของภาพ (Image Type)

ภาพแบบบิตแมพนั้นโดยทั่วไปสามารถจำแนกประเภทตามคุณสมบัติของสี [10] ได้ดังนี้

2.7.2.1 ภาพขาวดำ (Binary Image)

ภาพขาวดำ คือ ภาพที่ประกอบด้วยสีขาวและสีดำ โดยในแต่ละพิกเซลจะประกอบด้วยค่าแบบไบนารี่ (Binary) โดยใช้ค่า 0 แทนการบอกลักษณะของสีดำ และใช้ค่า 1 แทนการบอกลักษณะของสีขาว การมีระดับสีเพียงสองระดับในภาพขาวดำนั้น ทำให้การพิจารณาเพื่อแยกองค์ประกอบที่สนใจในภาพทำได้ง่าย โดยการพิจารณาที่ระดับความเข้มหนึ่งแทนส่วนที่สนใจ และอีกระดับความเข้มแทนพื้นหลังของภาพดังภาพที่ 2-33

ภาพที่ 2-33 ตัวอย่างภาพขาวดำ

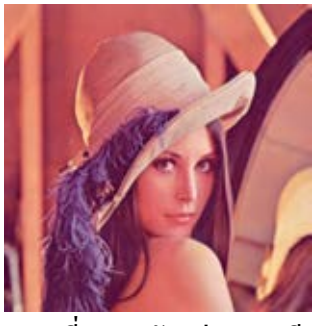
2.7.2.2 ภาพแบบระดับเทา (Gray scale Image)

ภาพแบบระดับเทา เป็นภาพที่มีระดับความเข้มของแสงในแต่ละระดับแตกต่างกันไปตั้งแต่สีดำไปจนถึงสีขาว โดยภาพแบบระดับเทาจะมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 8 บิทซึ่งระดับความเข้มแสงของสีดำจะมีค่าเท่ากับ 0 ส่วนระดับความเข้มแสงสีขาวจะมีค่าเท่ากับ 255 ดังภาพที่ 2-34

ภาพที่ 2-34 ตัวอย่างภาพแบบระดับเทา

2.7.2.3 ภาพสี (Color Image)

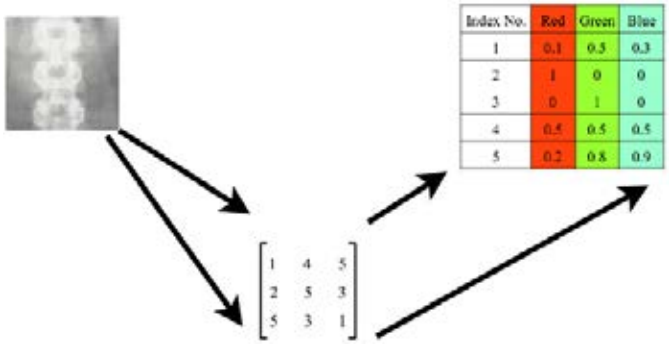
ภาพสี คือ ภาพที่มีการเก็บข้อมูลในแต่ละพิกเซลเป็นค่าความเข้มของแต่ละแถบแสงของแม่สีหลัก คือ แดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน(Blue) ซึ่งแต่ละพิกเซลจะมีการแสดงค่าสีของแต่ละแม่สีในระดับความเข้มในแต่ละแถบแสงนั้นๆ ดังภาพที่ 2-35



ภาพที่ 2-35 ตัวอย่างภาพสี

2.7.2.4 ภาพแบบดัชนี (Index Image)

ภาพแบบดัชนี เป็นภาพที่มีการเก็บข้อมูลในแต่ละพิกเซลเป็นค่าดัชนี (Index Number) ซึ่งเป็นตัวเลขแบบจำนวนเต็ม โดยใช้ค่าดัชนีในแต่ละพิกเซลในการเปรียบเทียบกับตารางสีซึ่งเป็นตารางในการเก็บค่าความเข้มแสงของแม่สีแดง เขียว และน้ำเงิน ซึ่งจะแสดงได้ว่าในแต่ละพิกเซลนั้นๆมีอัตราส่วนความเข้มแสงของแต่ละแม่สีเท่าใด โดยตัวอย่างภาพแบบดัชนีแสดงดังภาพที่ 2-36



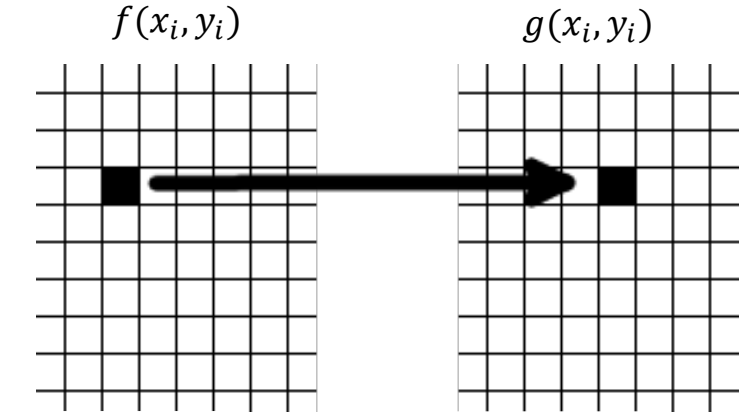
ภาพที่ 2-36 ตัวอย่างภาพแบบดัชนี

2.8 ประเภทของการประมวลผลภาพ (Image processing)

กระบวนการในการประมวลผลภาพดิจิทัลมีหลายวิธี ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของภาพและการใช้งาน โดยวิธีการประมวลผลกับภาพดิจิทัลแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [10] ดังต่อไปนี้

2.8.1 การประมวลผลกับเฉพาะจุด (Point Processing)

การประมวลผลภาพแบบเฉพาะจุดนั้น เป็นการประมวลผลกับค่าในแต่ละพิกเซล โดยดำเนินการแบบจุดต่อจุด โดยตัวอย่างในภาพที่ 2-37 เป็นการกระทำกับภาพแบบจุดต่อจุด (จากสมการที่ 2.7) ซึ่งค่าผลลัพธ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของพิกเซลที่อยู่บริเวณใกล้เคียง



ภาพที่ 2-37 การกระทำเฉพาะจุด (Point Processing)

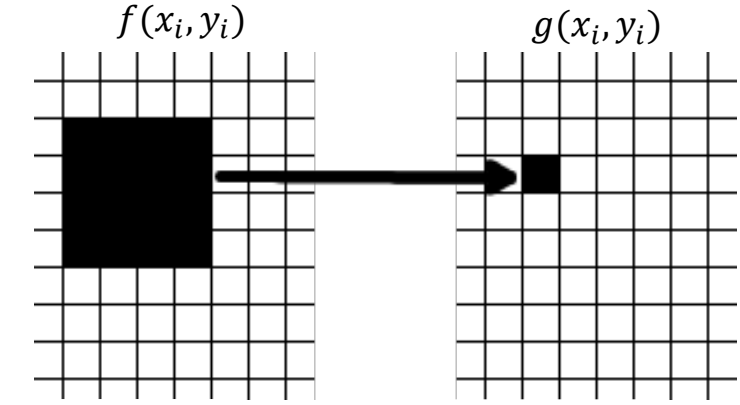
$$g(x_i, y_i) = P[f(x_i, y_i)] \tag{2.7}$$

จากสมการที่ (2.7) กำหนดให้ $f(x_i, y_i)$ และ $g(x_i, y_i)$ เป็นภาพนำเข้าและภาพผลลัพธ์ตามลำดับ

2.8.2 การประมวลผลกับเฉพาะบริเวณ (Local Processing)

การประมวลผลกับเฉพาะบริเวณของภาพ เป็นการกระทำกับกลุ่มของพิเซลซึ่งอยู่ในบริเวณข้างเคียงกัน โดยผลลัพธ์ของแต่ละจุดในภาพจะขึ้นอยู่กับค่าระดับความเข้มของกลุ่มพิกเซลที่อยู่ใกล้เคียงกัน

สำหรับการประมวลผลภากับเฉพาะบริเวณแสดงดังภาพที่ 2-38 โดยกำหนดให้ $f(x_i, y_i)$ เป็นภาพต้นฉบับ และ $g(x_i, y_i)$ เป็นภาพผลลัพธ์ โดยค่าของพิกเซล $g(x_i, y_i)$ จะมีค่าผลลัพธ์ตามสมการที่ 2.8



ภาพที่ 2-38 การกระทำเฉพาะบริเวณ (Local Processing)

$$g(x,y) = T[neighborhood\ of\ f(x,y)] \tag{2.8}$$

2.8.3 การประมวลผลกับทั้งหมด (Global Processing)

การประมวลผลกับทั้งหมดเป็นการกระทำกับทั้งภาพ โดยผลลัพธ์ของค่าในแต่ละพิกเซลของภาพจะขึ้นอยู่กับค่าระดับความเข้มในกับค่าความเข้มของพิกเซลทั้งหมดของภาพต้นฉบับ โดยการประมวลผลกับทั้งหมดของภาพนั้น ได้แก่ กระบวนการทำ Histogram Equalization และ กระบวนการทำเทรสโชลด์ (Thresholding)

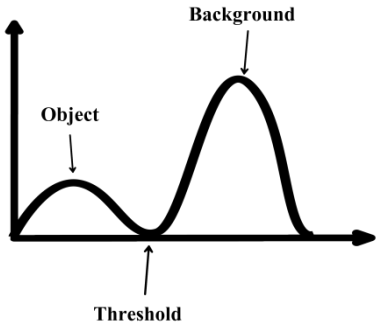
ให้ $I(x,y)$ และ $O(x,y)$ เป็นภาพต้นแบบและภาพผลลัพธ์ตามลำดับ ผลลัพธ์ของค่าในตำแหน่งพิกเซล $O(x,y)$ จะมีผลลัพธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$O(x,y) = G[I(x,y) \quad for \quad all \quad pixels] \tag{2.9}$$

กระบวนการเทรสโชลด์ (Thresholding) เป็นการกำหนดระดับความเข้มที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง เพื่อใช้ในการแยกสิ่งที่ต้องการอกจากพื้นหลังของภาพ และยังเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ได้ภาพแบบขาวดำ (Binary Image)

2.8.3.1 กระบวนการเทรสโชลด์แบบหนึ่งระดับ (Single Thresholding)

กระบวนการทำเทรสโชลด์แบบหนึ่งระดับกับภาพนั้น เป็นการกำหนดค่าความเข้มในระดับหนึ่งเพื่อใช้ในการแยกองค์ประกอบของภาพหรือสิ่งที่ต้องการจากภาพออกจากส่วนที่ไม่ต้องการหรือข้อมูลพื้นหลังของภาพ (Background) โดยกระบวนการในการเลือกค่าระดับความเข้มที่ใช้ในการกำหนดเทรสโชลด์สามารถพิจารณาจากฮิสโทแกรม (Histogram) ของภาพ โดยค่าที่เลือกจะต้องทีความเหมาะสมกับภาพเพื่อแยกวัตถุออกจากพื้นหลังดังแสดงในภาพที่ 2-39



ภาพที่ 2-39 การพิจารณาค่าเทรสโชลด์จากภาพฮิสโตรแกรม

เมื่อพิจารณาฮิสโทแกรมที่ได้จากภาพต้นฉบับ จะพบว่าข้อมูลถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มข้อมูลที่เป็นค่าระดับความเข้มของวัตถุ และกลุ่มข้อมูลที่เป็นค่าระดับความเข้มของพื้นหลัง ดังสมการที่ 2.8 โดยมีการกำหนดค่าเทรสโชด์ (T) เป็นระดับความเข้มที่ใช้เป็นจุดแบ่งส่วนของวัตถุกับพื้นหลังของภาพ ดังสมการที่ (2.10) โดย $f(x,y)$ คือค่าระดับค่าความเข้มในตำแหน่ง (x,y) และ $p(x,y)$ คือค่าระดับความเข้มที่อยู่กึ่งกลางของกลุ่มข้อมูลในตำแหน่ง (x,y) สำหรับผลลัพธ์ของภาพที่ได้ของ $g(x,y)$ มีค่าดังสมการที่ (2.11) โดยข้อมูลในส่วนที่เป็นวัตถุจะมีค่าเท่ากับ 1 และข้อมูลส่วนที่เป็นพื้นหลังจะมีค่าเท่ากับ 0

$$T = T[x, y, \big(p(x,y), f(x.y)\big)] \tag{2.10}$$

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & if \quad f(x,y) > T \\ 0 & if \quad f(x,y) \leq T \end{cases} \tag{2.11}$$

2.8.3.2 กระบวนการเทรสโชลด์แบบหลายระดับ (Multilevel Thresholding)

ในการทำเทรดโชลด์แบบหลายระดับจะมีการกำหนดค่าระดับความเข้มที่ใช้แยกวัตถุและพื้นหลังมากกว่าหนึ่งค่า โดยจะทำการกำหนดค่าสำหรับทำเทรดโชดล์ที่สนใจแทนด้วย (T_1, T_2) โดยค่าที่ได้ดังกล่าวเป็นค่าที่พิจารณาจากฮิสโทแกรม กำหนดให้ $I(x,y)$ คือข้อมูลของภาพต้นฉบับ และ $O(x,y)$ คือข้อมูลภาพผลลัพธ์ โดยทำการพิจารณาตามเงื่อนไขของสมการที่ (2.12) โดยผลลัพธ์จากการกระทำเทรดโชลด์แบบหนึ่งระดับ และเทรดโชลด์แบบหลายระดับจะแสดงดังภาพที่ 2-40 โดยภาพแรกจะเป็นการกำหนดค่าเทรดโชลด์ที่ระดับเดียวและภาพที่ถัดมาจะเป็นการกำหนดค่าเทรดโชลด์แบบหลายระดับ

$$O(x,y)\begin{cases} 0 & if\ \ I(x,y) < T_1 \\ I(x,y) & if\ T_1 \le I(x,y) \le T_2 \\ 0 & if\ I(x,y) > T_2 \end{cases} \tag{2.12}$$

ภาพที่ 2-40 ภาพผลลัพธ์จาก Single Thresholding และ Multilevel Thresholding

2.9 การแยกองค์ประกอบภาพ (Image Segmentation)

การแยกองค์ประกอบภาพ เป็นการแบ่งแยกองค์ประกอบต่าง ๆ ของรูปภาพออกจากกันตามลักษณะความสำคัญที่ใช้พิจารณา [11] เพื่อลดจำนวนข้อมูลในรูปภาพที่ไม่จำเป็นในการวิเคราะห์ลง จัดระเบียบข้อมูลในรูปภาพให้เป็นกลุ่มได้ดีขึ้น และแสดงข้อมูลในรูปที่เข้าใจง่ายขึ้น โดยการแยกองค์ประกอบภาพสามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบคือ

2.9.1 Pixel Oriented Image Segmentation

เป็นวิธีการแยกองค์ประกอบโดยพิจารณาความเหมือนของคุณสมบัติของจุดภาพ เช่น คุณสมบัติของสี ค่าความเข้มของแสง โดยการพิจารณานั้นจะทำการเปรียบเทียบภายในพื้นที่ที่มีความใกล้เคียงกันจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกัน ผลลัพธ์จะเป็นพื้นที่ของวัตถุที่สนใจ

2.9.2 Region Oriented Image Segmentation

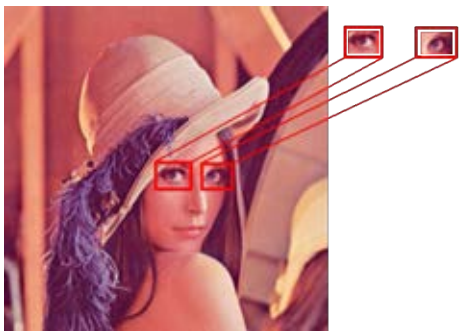
เป็นการแยกองค์ประกอบของภาพโดยพิจารณาจากตำแหน่งและความเหมือนของคุณสมบัติของจุดภาพภายในพื้นที่กำหนด โดยความเหมือนของจุดภาพที่อยู่ใกล้เคียงกันจะถูกจัดกลุ่มให้อยู่เข้ากลุ่มเดียวกัน หรือใช้การแบ่งภาพออกเป็นพื้นที่ย่อย โดยให้แต่ละพื้นที่ย่อยมีความหนาแน่นเดียวกัน จากนั้นทำการรวมพื้นที่ย่อยที่มีความหนาแน่นเดียวกันเข้าด้วยกันเป็นพื้นที่ใหญ่ ซึ่งข้อดีของการทำวิธีนี้จะได้พื้นที่ที่มีความต่อเนื่อง

2.9.3 Edge Oriented Image Segmentation

เป็นวิธีการแยกองค์ประกอบของภาพโดยอาศัยความไม่ต่อเนื่องกันของบริเวณรอยต่อของวัตถุกับส่วนของพื้นหลัง โดยวิธีการนี้มุ่งเน้นที่ขอบของผลลัพธ์ซึ่งจะสามารถใช้ในการแบ่งขอบเขตของวัตถุและพื้นหลังออกจากกันได้

2.10 การกำหนดบริเวณสนใจ (Region of Interest)

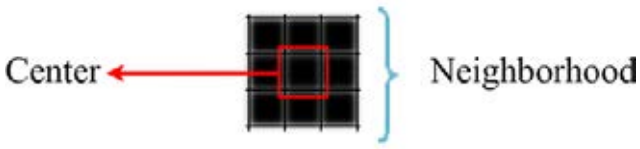
การกำหนดบริเวณสนใจ คือการกำหนดบริเวณหรือพื้นที่โดยการตีกรอบล้อมรอบบริเวณที่จะใช้ในการประมวลผลภาพ ด้วยโครงสร้างแบบวงกลม กรอบสี่เหลี่ยม หรือกรอบรูปเหลี่ยมใดๆ เพื่อนำภาพในบริเวณที่ต้องการมากระทำการประมวลผลและช่วยลดภาระงานการประมวลผลลง โดยพิจารณาตำแหน่งของวัตถุที่สนใจในภาพและกำหนดบริเวณเพื่อให้สามารถแยกวัตถุที่มีความใกล้เคียงกับวัตุที่สนใจให้ออกจากการประมวลผลภายในส่วนนี้ได้ ซึ่งภายในภาพหนึ่งภาพสามารถกำหนดบริเวณที่สนใจได้หลายบริเวณ



ภาพที่ 2-41 ตัวอย่างการกำหนดบริเวณสนใจของภาพ

2.11 มอร์โฟโลยี (Mophology)

มอร์โฟโลยีเป็นทฤษฎีในการประมวลผลภาพดิจิทัลเพื่อใช้ในการแยกองค์ประกอบของภาพ ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากในการจัดการปัญหาด้านการประมวลผลภาพ [12] โดยเป็นการวิเคราะห์ภาพโดยอยู่บนพื้นฐานของเรขาคณิต [13] หลักของกระบวนการมอร์โฟโลยีจะทำการพิจารณาเป็นกลุ่มของวัตถุภายในภาพ โดยอาจจะทำการพิจารณาจากวัตถุสีดำบนภาพพื้นหลังสีขาว หรือวัตถุสีขาวบนภาพพื้นหลังสีดำก็ได้ โดยแต่ละกลุ่มของวัตถุนั้นอาจมีสัญญาณรบกวน จึงจะต้องมีกระบวนการในการกำจัดส่วนสัญญาณรบกวนนั้นออกก่อนที่จะนำภาพไปทำการประมวลผล โดยกระบวนการกำจัดสัญญาณรบกวนนั้นจะต้องมีการกำหนดส่วนย่อยโครงสร้าง (Structure Elements) เพื่อช่วยในการพิจารณา โดยส่วนย่อยโครงสร้างจุดภาพดำ B ที่มีขนาด 3x3 ดังภาพที่ 2-42 จะทำการนำจุดกลางของส่วนย่อยโครงสร้าง (Center) และจุดบริเวณข้างเคียง (Neighborhood) มาทำการพิจารณาร่วมกับวัตถุ



ภาพที่ 2-42 ตัวอย่างส่วนย่อยโครงสร้าง B ที่มีขนาด 3x3 จุดภาพ

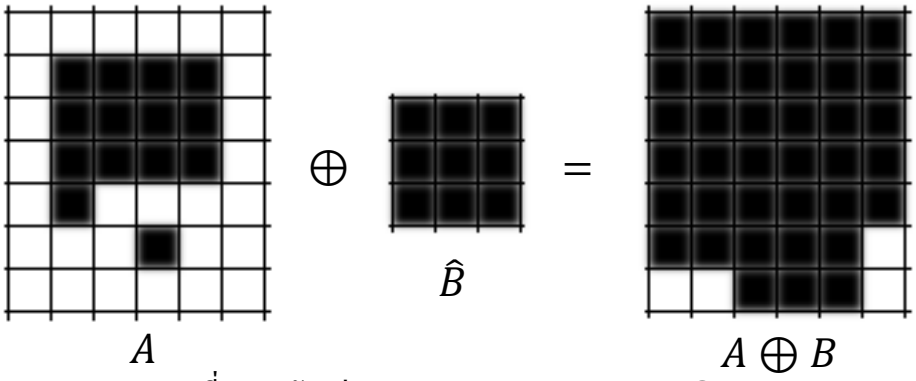
2.11.1 การขยายภาพ (Dilation)

วิธีการขยายภาพเป็นการเพิ่มจำนวนจุดภาพของกลุ่มวัตถุ โดยใช้ส่วนย่อยโครงสร้างในการทำการขยายขนาด ทำให้ช่วงความห่างของวัตถุภายในภาพที่อยู่ใกล้เคียงแคบลงหรือเชื่อมต่อกันได้

$$A \oplus B = \{x|(\hat{B}_x) \cap A \neq \emptyset\} \tag{2.13}$$

$$A \oplus B = \{x|[(\hat{B}_x) \cap A] \subseteq A\} \tag{2.14}$$

จากสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14)ให้เซตของ A แทนข้อมูลภาพที่ต้องการนำมาขยายภาพโดยใช้ส่วนย่อยโครงสร้าง B ซึ่งมีขนาด 3×3 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการขยายภาพคือ $A \oplus B$ โดยมีการแสดงข้อมูลผลลัพธ์ของการขยายภาพดังภาพที่ 2-43



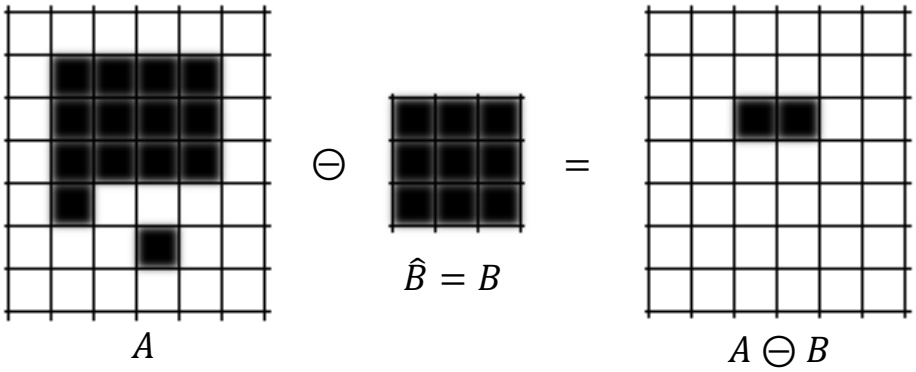
ภาพที่ 2-43 ตัวอย่างการขยายภาพ (Dilation) $A \oplus B$

2.11.2 การเซาะภาพ (Erosion)

การเซาะภาพเป็นกระบวนการตรงข้ามกับการขยายภาพ โดยการลดจำนวนของจุดภาพวัตถุที่ต้องการลงโดยใช้ส่วนย่อยโครงสร้างในการพิจารณา เพื่อให้เห็นความชัดเจนโครงสร้างของภาพได้มากขึ้น

$$A \ominus B = \{x|(\hat{B}_x) \subseteq A\} \tag{2.15}$$

จากสมการที่ (2.15) ให้เซตของ A แทนข้อมูลภาพที่ต้องการนำมาเซาะภาพโดยใช้ส่วนย่อยโครงสร้าง B ซึ่งมีขนาด 3×3 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการเซาะภาพคือ $A \ominus B$ โดยมีการแสดงข้อมูลการเซาะภาพดังภาพที่ 2-44



ภาพที่ 2-44 ตัวอย่างการเซาะภาพ (Erosion) $A \ominus B$

2.11.3 การเปิดภาพ (Opening) และการปิดภาพ (Closing)

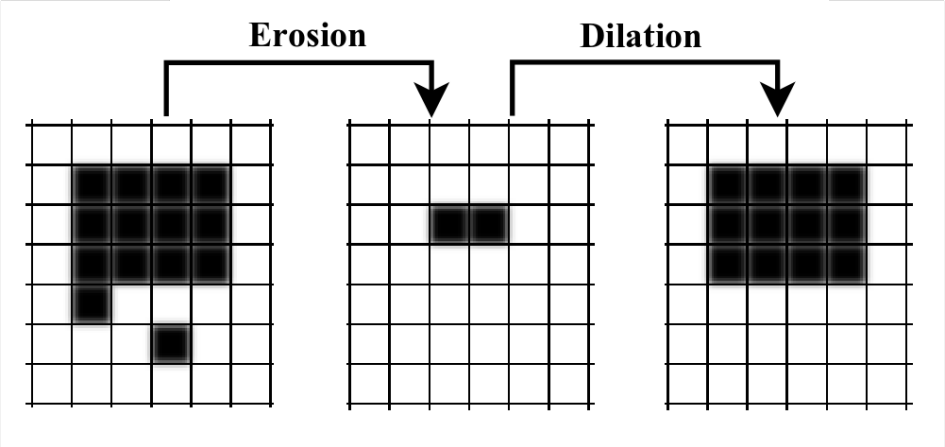
การเปิดภาพ (Opening) เป็นการนำภาพมาทำการขยายภาพ และเซาะภาพมาทำงานพร้อมกัน โดยจะทำการเซาะภาพเพื่อลดจำนวนจุดภาพที่สนใจ จากนั้นทำการขยายภาพ ทำให้บริเวณวัตถุในภาพที่สนใจมีลักษณะที่เรียบขึ้น ส่วนการปิดภาพ (Closing) เป็นการทำงานตรงข้ามกับการเปิดภาพ โดยจะทำการขยายภาพเพื่อเพิ่มจำนวนจุดภาพของวัตถุที่สนใจก่อน จากนั้นทำการเซาะภาพ ทำให้ส่วนของวัตถุในภาพเชื่อมต่อกันและมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \tag{2.16}$$

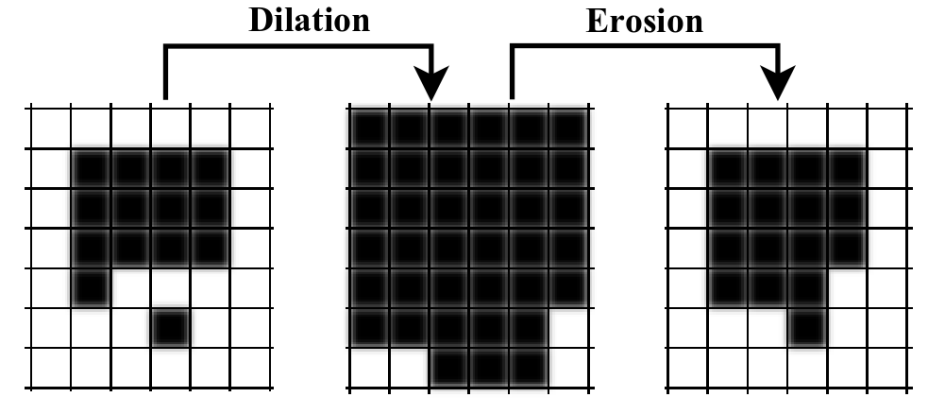
$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \tag{2.17}$$

จากสมการที่ (2.16) เป็นการเปิดภาพโดยให้เซตของ A แทนข้อมูลภาพที่ต้องการเปิดภาพโดยใช้ส่วนย่อยโครงสร้าง B โดยเริ่มจากการเซาะภาพ A ด้วยส่วนย่อยโครงสร้าง B

จากนั้นนำผลลัพธ์จากการเซาะภาพมาทำการขยายภาพด้วยส่วนย่อยโครงสร้าง B ซึ่งผลลัพธ์การเปิดภาพแทนด้วย $A \circ B$ โดยมีการแสดงข้อมูลการเปิดภาพดังภาพที่ 2-45 จากสมการที่ (2.17) เป็นการปิดภาพโดยให้เซตของ A แทนข้อมูลภาพที่ต้องการเปิดภาพโดยใช้ส่วนย่อยโครงสร้าง B โดยเริ่มจากการขยายภาพ A ด้วยส่วนย่อยโครงสร้าง B จากนั้นนำผลลัพธ์จากการขยายภาพมาทำการเซาะภาพด้วยส่วนย่อยโครงสร้าง B ซึ่งผลลัพธ์การเปิดภาพแทนด้วย $A \bullet B$ โดยมีการแสดงข้อมูลการปิดภาพดังภาพที่ 2-46



ภาพที่ 2-45 ตัวอย่างการทำการเปิดภาพ (Opening) $A \circ B$



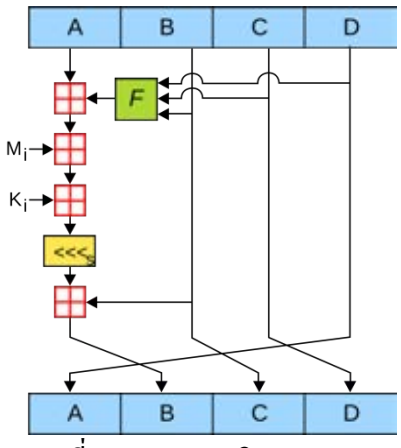
ภาพที่ 2-46 ตัวอย่างการทำการปิดภาพ (Closing) $A \bullet B$

2.12 การเข้ารหัสฟังก์ชันแบบแฮช (Cryptographic Hash Function)

การเข้ารหัสฟังค์ชั่นแฮช เป็นวิธีการอย่างหนึ่งในการแปลงข้อมูลบางส่วนหรือทั้งหมด ให้กลายเป็นข้อมูลขนาดคงที่ซึ่งเรียกข้อมูลส่วนนี้ว่าค่าแฮช (Hash Value) [14] โดยวิธีการแบ่งย่อย ข้อมูลและการผสมข้อมูลย่อยทั้งหมดเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ข้อมูลสุดท้าย ซึ่งผลลัพธ์ของ ข้อมูลสุดท้ายจะไม่สามารถถอดรหัสข้อมูล (Decryption) เพื่อเรียกดูข้อมูลต้นฉบับได้ โดยส่วนมากข้อมูลประเภทนี้จะใช้ในการตรวจความน่าเชื่อถือ หรือการรับรอง [15] ในการติดต่อสื่อสารของข้อมูล

2.12.1 การเข้ารหัสแบบ MD5 (Messaage-Digest Algorithm 5)

MD5 (Message-Digest Algorithm 5) เป็นการเข้ารหัสฟังชั่นแบบแฮชชนิดหนึ่ง ถูกพัฒนาโดย Ron Rivest และได้ประกาศเป็นมาตรฐานใน RFC 1321 [16] การเข้ารหัสที่ได้จะเป็นรูปแบบตัวอักษร ASCII ขนาด 128 บิทหรือ 32 ตัวอักษร รูปแบบการเข้า MD5 เป็นการเข้ารหัสแบบทางเดียวซึ่งไม่สามารถทำการถอดรหัส (Decrypt) จากข้อความได้ จึงนิยมนำไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องแบบทางเดียว



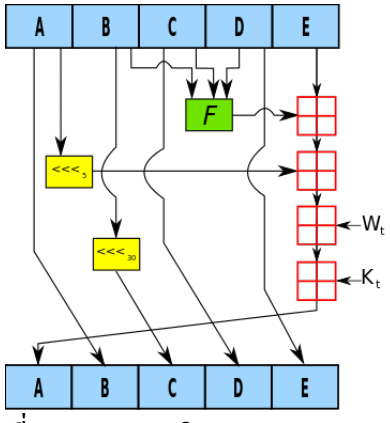
ภาพที่ 2-47 การดำเนินการ MD5

ตัวอย่างผลลัพธ์ของการเข้ารหัสฟังค์ชันแบบแฮชแบบ MD5

ตัวอย่างข้อความ	:	Chulalongkorn University
ผลลัพธ์ที่ถูกเข้ารหัส	:	1776D15BDF1B2D30DAF31C53B7F7CDF1

2.12.2 การเข้ารหัสแบบ SHA-1

SHA-1 เป็นการเข้ารหัสที่ได้รับการพัฒนาโดย NIST (National Institute of Standard and Technology) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ทำหน้าที่กำหนดมาตรฐานทางเทคโนโลยีของสหรัฐอเมริกา โดยมีการปรับปรุงมาจาก การเข้ารหัสแบบ SHA โดยได้รับมาตรฐานจาก FIPS PUB 180 [17] ซึ่งการเข้ารหัสแบบ SHA-1 นั้นจะได้ข้อมูลตัวเลขแบบ 160 บิต หรือ 40 ตัวอักษร



ภาพที่ 2-48 การดำเนินการ SHA-1

ตัวอย่างผลลัพธ์ของการเข้ารหัสฟังค์ชันแบบแฮชแบบ SHA-1

ตัวอย่างข้อความ	:	Chulalongkorn University
ผลลัพธ์ที่ถูกเข้ารหัส	:	CF6766D458D564BE97C4B68FAC95386 CE9B8CD0A

2.13 เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพ

2.13.1 การวัดค่าความเหมือนของภาพ (Similarity Measurement)

การวัดค่าความเหมือนของภาพระหว่างภาพ QR Code ต้นฉบับที่ไม่มีการเพิ่มส่วนตรวจหาความผิดพลาด กับภาพผลลัพธ์จากการทำ Binarization ของภาพ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนตรวจหาความผิดพลาดจะใช้ค่า NCC (Normalized Cross Correlation) ซึ่งได้จากการคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$\mathrm{NCC(A,B)} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(a_{ij} \oplus b_{ij})}{n^2} \tag{2.18}$$

ให้ A แทนข้อมูลภาพต้นฉบับของ QR Code แบบปกติและ B แทนภาพผลลัพธ์จากการทำ Binarization ของภาพ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนตรวจหาความผิดพลาด โดยที่ A และ B เป็นเมทริกซ์ซึ่งมีขนาด $n \times n$ โดยที่ a_{ij} เป็นสมาชิกแถวที่ i หลักที่ j ของเมทริกซ์ A และ b_{ij} เป็นสมาชิกแถวที่ i หลักที่ j ของเมทริกซ์ B ซึ่งผลลัพธ์ของ $a_{ij} \oplus b_{ij}$ เท่ากับ 0 เมื่อ $a_{ij} = b_{ij}$ และผลลัพธ์เท่ากับ 1 เมื่อ $a_{ij} \neq b_{ij}$

ค่า NCC ที่เป็นไปได้มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยเมื่อค่า NCC เข้าใกล้ 1 นั้นมีความหมายว่าภาพผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกับต้นฉบับ และค่า NCC เท่ากับ 1 หมายความว่าภาพผลลัพธ์ที่ได้เหมือนกับภาพต้นฉบับ

2.13.2 เกณฑ์การวัดเวลาที่ใช้ในการประมวลผล

เนื่องด้วยกระบวนการประมวลผลภาพ การถอดรหัส QR Code และ Micro QR Code จำเป็นต้องมีการวัดค่าเวลาการประมวลผลเพื่อช่วยในการประเมินประสิทธิภาพ โดยทำการจับเวลาตั้งต้น T_{start} และเวลาสิ้นสุดกระบวนการ T_{stop} โดยใช้เวลาหน่วยประมวลผลกลาง (CPU Time) โดยใช้สมการในการวัดเวลาดังนี้

$$\Delta T = T_{start} - T_{stop} \tag{2.19}$$

2.14 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

QR Code เป็นบาร์โค้ดแบบสองมิติซึ่งถูกพัฒนาโดยบริษัท DensoWave [18] และถูกเผยแพร่ในปี 1994 จนปัจจุบันมีมาตรฐานรองรับ [2] และถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากความสามารถของ QR Code ที่ใช้งานได้อย่างรวดเร็ว และสามารถเก็บข้อมูลได้มากกว่าบาร์โค้ดประเภทอื่น ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้สูงสุดถึง 7,089 ตัวอักษร

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวกับ QR Code นั้นจะมุ่งเน้นไปด้านการเพิ่มประสิทธภาพในการเก็บข้อมูล และปรับปรุงภาพ QR Code ก่อนการถอดรหัส วิธีการวัดผลและนำไปสู่การได้ผลลัพธ์ที่

มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งผลงานจำนวนหนึ่งได้เสนอออกมานั้นจะขอกล่าวในลักษณะสรุปสั้นๆ เพื่อให้เห็นถึงวิธีการต่างๆ ดังนี้

ผลงานวิจัยของ Yue Liu, Ju Yang และ Mingjun Liu [19] ได้ทำการศึกษาการอ่านคิวอาร์โค้ดผ่านโทรศัพท์มือถือ ซึ่งการอ่านมักเกิดปัญหาจากความไม่สม่ำเสมอของแสง การบิดรูปของบาร์โค้ด โดยได้เสนอวิธีการในการแก้ปัญหาดังนี้ ทำการแปลงภาพที่ได้จากโทรศัพท์มือถือจากภาพแบบ RGB เป็นภาพระดับเทาเพื่อสามารถทำงานได้เร็วกว่า จากนั้นทำการ Binarization โดยวิเคราะห์ค่า Threshold จาก Histogram จากภาพระดับเทา และทำการกำจัด Noise โดยวิธี Opening และ Closing แล้วนำภาพที่ได้มาทำการหาพื้นที่ของคิวอาร์โค้ดโดยใช้ Finder Pattern แต่ถ้าส่วนของ Finder Pattern ใดมีการเสียหายก็สามารถนำ Timing Pattern เป็นส่วนช่วยเพิ่มเติมได้ หลังจากนั้นทำการหาตำแหน่งของ Alignment Pattern โดยเริ่มที่ส่วนกลางของภาพ จากนั้นทำการสร้าง Grid และพิจารณาส่วนในแต่ละ Block ในคิวอาร์โค้ด แล้วเข้าสู่กระบวนการถอดรหัส โดยได้มีการเปรียบเทียบผลที่ได้กับ Otsu's method , Ohbuchi's method และ QR Code standard's method พบว่าวิธีนีมีอัตราการ Recognition rate ดีกว่า แต่เวลาการทำงานของ Ohbuchi's method เร็วที่สุด

ผลงานวิจัยของ Jiejing Zhou, Yunfei Liu และ Peng Li [20] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทำ Binarization บนภาพคิวอาร์โค้ดที่มีความไม่สม่ำเสมอของแสงที่เกิดจากการนำเข้าภาพคิวอาร์โค้ดซึ่งมีผลกระทบต่อกระบวนการทำ Thresholding ในแบบต่าง ทำให้ภาพคิวอาร์โค้ดที่ได้ไม่สมบูรณ์และไม่สามารถใช้งานได้ โดยได้แสดงการเปรียบเทียบและผลของการทำ Thresholding ทั้งแบบ Local Thresholding และ Global Thresholding ที่มีการใช้งานโดยทั่วไป และได้นำเสนอวิธีการทำ Local Threshodling โดยการปรับเปลี่ยนวิธีการจาก Sauvola's Thresholding ผลจากการเปรียบเทียบวิธีการแบบ maximum entropy ใช้เวลาในการทำงานน้อยที่สุดแต่มีค่า Recognition Rate อยู่ที่ 63% ส่วนวิธีการที่ปรับปรุงใหม่นั้นให้ค่า Recognition Rate สูงที่สุด คือ 100% ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบอื่น

ผลงานวิจัยของ Gang Xu และคณะ [21] ได้อธิบายปัญหาจากการถ่ายภาพคิวอาร์โค้ดที่เกิดการเบลอของภาพที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของอุปกรณ์ถ่ายหรือสิ่งที่ถูกถ่าย ทำให้การตรวจหาภาพคิวอาร์โค้ดทำได้ยาก จึงได้ทดลองวิธีการใช้อัลกอริทึมแบบ NAS-RIF ในการแก้ปัญหา และได้ปรับปรุงวิธีการ NAS-RIF โดยใช้พื้นฐานแบบ Bimodal ซึ่งเป็นคุณลักษณะของคิวอาร์โค้ดที่มีอยู่สองส่วนคือ ส่วนของบาร์โค้ดที่มีโมดูลสีดำและส่วนของพื้นหลังที่เป็นสีขาว โดยผลการ

เปรียบเทียบทั้งสองวิธีการ วิธีการแบบใหม่นั้นให้ผลของค่า PSNR ที่ดีกว่าและค่า SSD Error ที่ลดลงจากวิธีการแบบ NAS-RIF แบบปกติ

ผลงานวิจัยของ Kris Antoni Hadiputra Nurwono และ Raymondus Kosala [22] ได้นำเสนอวิธีการสร้างคิวอาร์โค้ดแบบสี โดยใช้การซ้อนทับคิวอาร์โค้ดจำนวน 3 เลเยอร์ในแต่ละเลเยอร์ใช้แม่สี คือ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) ในการแทนที่โมดูลสีดำของคิวอาร์โค้ด เมื่อซ้อนทับของเลเยอร์โมดูลสีจะผสมกัน ทำให้คิวอาร์โค้ดสีสามารถเก็บข้อมูลได้มากกว่าเดิมประมาณ 3 เท่าของเดิม ส่วนของการถอดรหัสจะทำการถ่ายภาพคิวอาร์โค้ดและอ่านค่า RGB ของแต่ละพิกเวล จากนั้นทำการแยก Layer โดยอาศัย RGB แต่ละ Layer และทำการถอดรหัสจากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้ทั้งสามมารวมกัน และวัดผลเปรียบเทียบการทดลองการถอดรหัสโดยใช้โทรศัพท์มือถือ โดยผลการทดลองค่าของแสงที่มีค่าน้อยกว่า 25 Watt ไม่สามารถใช้งานและถอดรหัสได้ แต่การอ่านคิวอาร์โค้ดสีที่มีความสม่ำเสมอและความสว่างของแสงที่มากกว่า 40 Watt สามารถอ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพมากสุด

ผลงานวิจัยของ Max E. Vizcarra Melgar และคณะ [23] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบการเก็บข้อมูลคิวอาร์โค้ดโดยการแทนที่โมดูลสีขาวและสีดำ โดยการใช้ความแตกต่างของสี 5 สีแทนค่าไบนารี (Binary) คือ สีแดง (Red) แทนค่าบิท 00 สีเขียว (Green) แทนค่าบิท 01 สีน้ำเงิน (Blue) แทนค่าบิท 10 สีขาว (White)แทนค่าบิท 11 และสีดำ (Black) แทนส่วน Function Patterns ของคิวอาร์โค้ด กระบวนการเข้ารหัสและถอดรหัสของคิวอาร์โค้ดจะทำการเรียงโมดูลส่วนของข้อมูลในทิศทางจากล่างขึ้นบน และขวาไปซ้าย โดยทำการทดลองบนคิวอาร์โค้ดเวอร์ชั่น 8 ขนาดมีขนาด 49x49 โมดูล โดยการนำข้อมูลทำการ Binarize และใช้อัลกอริธึมของ Reed-Solomon กับข้อมูลโดยมีค่า Error-Correction อยู่ที่ 38.41% และนำข้อมูลบิทที่ได้ทำการเทียบค่าสีเพื่อสร้างเป็นคิวอาร์โค้ดและพิมพ์ในขนาด 1.3 cm x 1.3 cm และทำการทดสอบการอ่านโดยใช้กล้องดิจิทัล แปลงเป็นภาพระดับเทาและหาค่า threshold ของภาพเพื่อทำการหาส่วนของ Finder Pattern แยกส่วนบาร์โค้ดออกและทดสอบการถอดรหัส ผลการทดสอบจากการถอดรหัสโดยคิดค่าความผิดพลาดของบาร์โค้ดโดยคิดค่าเฉลี่ยต่ำสุดคือ 0.53% และสูงสุดคือ 14.8%

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการดำเนินการวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนการเข้ารหัส QR Code โดยการนำเข้าข้อมูลเพื่อเข้ารหัส QR Code (จากหัวข้อ 2.5) นำข้อมูลเข้ารหัสฟังก์ชันแบบแฮชโดยใช้ MD5 (จากหัวข้อ 2.12.1) จากนั้นทำการเข้ารหัส Micro QR Code (จากหัวข้อ 2.5) นำข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัส QR Code และ Micro QR Code จากนั้นทำการสร้างภาพบาร์โค้ด QR Code โดยทำการซ้อนทับภาพ Micro QR Code เพื่อเพิ่มส่วนตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส QR Code โดยมีแผนภาพส่วนของการเข้ารหัสดังภาพที่ 3-1 ส่วนการถอดรหัส QR Code โดยการนำเข้าภาพ QR Code ที่มีการซ้อนทับส่วนของ Micro QR Code ซึ่งเป็นส่วนตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส QR Code จากนั้นเข้าสู่กระบวนการแยกองค์ประกอบของภาพ (Image Segmentation) โดยแยกส่วนของ QR Code และ Micro QR Code โดยนำส่วนของ QR Code เข้ากระบวนการ Binarization โดยใช้วิธีการแบบ Global-Thresholding (จากหัวข้อ 2.8.3.1) เพื่อให้ภาพเหลือแต่ส่วนโมดูลของ QR Code และนำเข้าสู่กระบวนการถอดรหัสทั่วไป เมื่อได้ข้อมูลส่วนของ QR Code นำเข้ารหัสฟังก์ชันแบบแฮชแบบ MD5 เพื่อใช้ตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส ส่วน Micro QR Code ทำการกำหนดบริเวณที่สนใจ (Region of Interest) (จากหัวข้อ 2.10) ของภาพเพื่อระบุบริเวณที่มีการซ้อน Micro QR Code และนำเข้ากระบวนการ Binarization โดยใช้วิธีการแบบ Multilevel Thresholding (จากหัวข้อ 2.8.3.2) เพื่อให้ได้ส่วนโมดูลของ Micro QR Code จากนั้นทำการกรองส่วนโมดูลที่เกินจาก QR Code ออกโดยใช้วิธีการแบบเปิดภาพ (Opening) และนำเข้าสู่กระบวนการถอดรหัส จากนั้นนำข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบข้อมูลของ QR Code เพื่อยืนยันความถูกต้องของการถอดรหัส QR Code และวัดประสิทธิภาพของผลลัพธ์จากการวิจัย โดยมีแผนภาพส่วนของการถอดรหัสดังภาพที่ 3-2 ซึ่งขั้นตอนงานวิจัยทั้งหมดประกอบไปด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ภาพรวมทั้งหมดของงานวิจัย

ภาพรวมของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกระบวนการสองส่วนคือ กระบวนการเข้ารหัสข้อมูล QR Code โดยเพิ่มส่วนตรวจหาความผิดพลาด และกระบวนการถอดรหัสข้อมูล QR Code ทีมีการเพิ่มส่วนตรวจหาความผิดพลาด

3.1.1 การเข้ารหัสข้อมูล QR Code

3.1.1.1 การนำเข้าข้อมูล (Input Information)
เริ่มต้นด้วยการนำเข้าข้อมูลหรือข้อความที่จะทำการเข้ารหัส QR Code

3.1.1.2 การเข้ารหัสข้อมูล QR Code (Encode QR Code)
นำข้อมูลหรือข้อความ (ผลลัพธ์จาก 3.1.1) ผ่านกระบวนการเข้ารหัส QR Code

3.1.1.3 เมทริกซ์ของ QR Code (Matrix of QR Code)
ข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัส QR Code (ผลลัพธ์จาก 3.1.2) จะได้ข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของไบนารี (Binary) ซึ่งมีลักษณะแบบอาเรย์สองมิติ

3.1.1.4 การเข้ารหัสแฮชฟังค์ชั่นโดยการใช้วิธีการแบบ MD5 (Encryption using MD5)
โดยการนำข้อมูลหรือข้อความที่นำเข้า (ผลลัพธ์จาก 3.1.1) มาทำการเข้ารหัสแฮชฟังค์ชั่นโดยใช้วิธีการแบบ MD5 เพื่อให้ได้ข้อความย่อยจำนวน 32 ตัวอักษร

3.1.1.5 ข้อความจากการเข้ารหัสแบบ MD5 (MD5 Message)
เป็นข้อความที่ได้จากการเข้ารหัสแบบแฮชฟังค์ชั่น (ผลลัพธ์จาก 3.1.4) โดยนำข้อความที่ได้มาทำการตัดส่วนท้ายออกจำนวน 16 อักษร เพื่อให้เหลือข้อความเพียง 16 ตัวอักษร

3.1.1.6 การเข้ารหัสข้อมูล Micro QR Code (Encode Micro QR Code)
นำข้อความย่อย (ผลลัพธ์จาก 3.1.5) ผ่านกระบวนการเข้ารหัส Micro QR Code

3.1.1.7 เมทริกซ์ของ Micro QR Code (Matrix of Micro QR Code)

ข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัส Micro QR Code (ผลลัพธ์จาก 3.1.6) จะได้ข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของไบนารี (Binary) ซึ่งมีลักษณะแบบอาเรย์สองมิติ

3.1.1.8 ผสานเมทริกซ์ (Merge Matrix)

เป็นกระบวนการนำเมทริกซ์ที่ได้จากการเข้ารหัส QR Code (ผลลัพธ์จาก 3.1.3) และเมทริกซ์ที่ได้จากการเข้ารหัส Micro QR Code (ผลลัพธ์จาก 3.1.7) มาทำการซ้อนข้อมูล

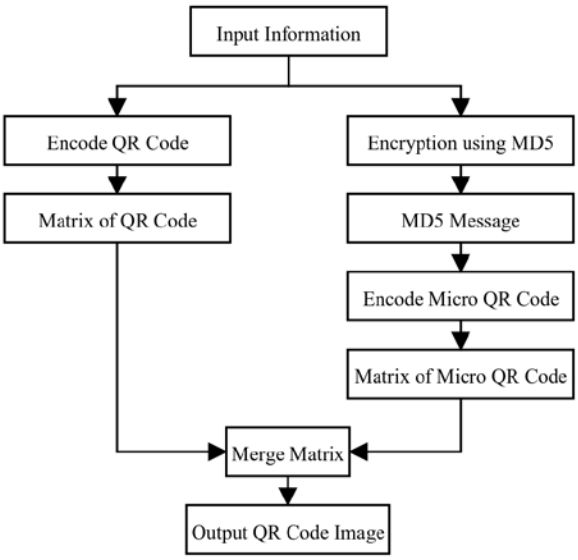
3.1.1.8.1 นำข้อมูลเมทริกซ์ของ Micro QR Code ที่ได้ซ้อนข้อมูลบริเวณ Finder Pattern บนซ้ายของ QR Code โดยให้ส่วนของ Finder Pattern ของ QR Code และ Micro QR Code ซ้อนทับกันพอดี

3.1.1.8.2 นำข้อมูลเมทริกซ์ของ Micro QR Code หมุนแบบ 90 องศา วางซ้อนข้อมูลบริเวณ Finder Pattern บนขวาของ QR Code โดยให้ส่วนของ Finder Pattern ของ QR Code และ Micro QR Code ซ้อนทับกันพอดี

3.1.1.8.3 นำข้อมูลเมทริกซ์ของ Micro QR Code หมุนแบบ 270 องศา วางซ้อนข้อมูลบริเวณ Finder Pattern บนซ้ายของ QR Code โดยให้ส่วนของ Finder Pattern ของ QR Code และ Micro QR Code ซ้อนทับกันพอดี

3.1.1.9 ผลลัพธ์ภาพ QR Code (Output QR Code Image)

นำผลลัพธ์ของเมทริกซ์ที่ได้จากการผสาน (ผลลัพธ์จาก 3.1.8) สร้างภาพ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดโดยใช้การพิจารณาค่าสีแบบระดับเทา (แสดงในหัวข้อที่ 3.3.3)



ภาพที่ 3-1 การเข้ารหัส QR Code โดยเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส

3.1.2 การถอดรหัสข้อมูล QR Code

3.1.2.1 การนำเข้าภาพ (Input Image)

ส่วนการถอดรหัส QR Code เริ่มด้วยการนำเข้าไฟล์ภาพ QR Code ที่มีการซ้อนทับส่วนตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส โดยไฟล์ภาพที่นำเข้าเป็นการใช้อุปกรณ์ประเภท Scanner และ Digital Camera

3.1.2.2 การแยกองค์ประกอบภาพ (Image Segmentation)

เป็นการแยกกระบวนการทำงาน โดยทำการแยกส่วนการประมวลผลภาพในส่วนของภาพ QR Code (QR Code Image) และภาพ Micro QR Code (Micro QR Code Image) ออกจากกัน

3.1.2.3 การทำภาพไบนารีส่วนของ QR Code (QR Code Image Binarization)

นำภาพ QR Code เข้ากระบวนการ Binarization โดยใช้วิธีแบบ Single Thresholding โดยพิจารณาค่าจาก Histrogram ของภาพ

3.1.2.4 ถอดรหัสข้อมูล (Decode Data Codeword)

ทำการถอดรหัสข้อมูลจากภาพที่ได้ (ผลลัพธ์จาก 3.1.2.3) โดยใช้ Zxing Libraly [6] ซึ่งเป็น Open Source ที่ใช้ในการถอดรหัสบาร์โค้ดแบบสองมิติ เพื่อให้ได้ข้อมูลหรือข้อความ (Information) จากภาพบาร์โค้ด

3.1.2.5 การเข้ารหัสแฮชฟังค์ชั่นโดยการใช้วิธีการแบบ MD5 (Encryption using MD5)

โดยการนำข้อมูลหรือข้อความที่ได้จากการถอดรหัส (ผลลัพธ์จาก 3.1.2.4) มาทำการเข้ารหัสแฮชฟังค์ชั่นโดยใช้วิธีการแบบ MD5 เพื่อให้ได้ข้อความย่อยจำนวน 32 ตัวอักษรและทำการตัดส่วนท้ายออกจำนวน 16 อักษร เพื่อให้เหลือข้อความเพียง 16 ตัวอักษรเพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบ

3.1.2.6 กำหนดบริเวณที่สนใจ (ROI of Micro QR Code)

ทำการกำหนดบริเวณที่มีการซ้อนของ Micro QR Code โดยใช้ขนาดโมดูลของ QR Code ในการกำหนดพื้นที่ของ Micro QR Code โดยมีขนาดเท่ากับ 17x17 โมดูลของ QR Code

3.1.2.7 การทำภาพไบนารีส่วนของ Micro QR Code (Micro QR Code Image Binarization)

นำภาพส่วนของ Micro QR Code ทั้งสามส่วนเข้ากระบวนการ Binarization โดยใช้วิธีแบบ Multilevel-Thresholding โดยพิจารณาค่าจาก Histrogram ของภาพ

3.1.2.8 กรองสัญญานรบกวน (Filtering)

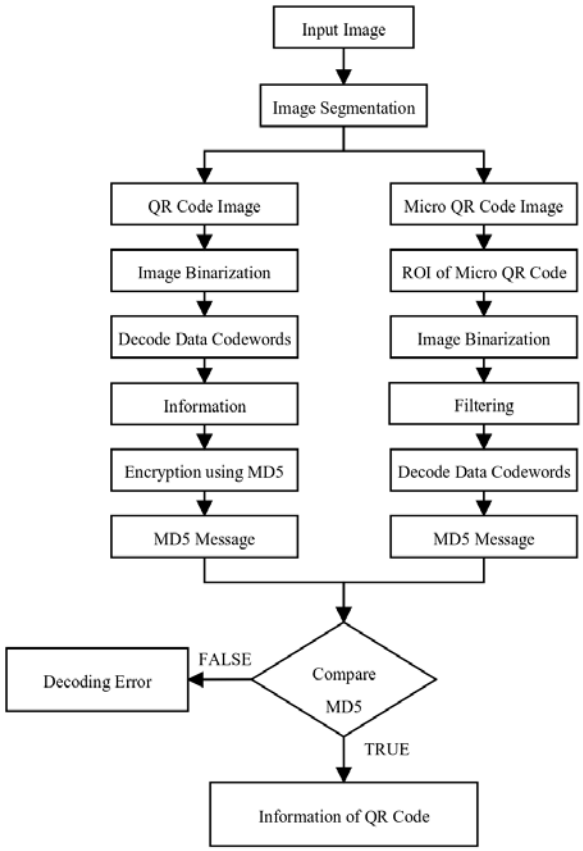
เนื่องจากภาพในส่วนของ Micro QR Code ที่ได้เมื่อทำ Binarization จะมีส่วนของขอบของโมดูล QR Code ทำให้ไม่สามารถถอดรหัส Micro QR Code ได้ จึงใช้เทคนิคทางมอร์โฟโลยี (Morphology) คือ วิธีการเปิดภาพ (Opening) เพื่อให้โมดูลของ Micro QR Code มีความชัดเจนมากขึ้น

3.1.2.9 ถอดรหัสข้อมูล (Decode Data Codeword)

ทำการถอดรหัสข้อมูลจากภาพที่ได้ (ผลลัพธ์จาก 3.1.2.8) โดยใช้ Zxing Libraly [6] ซึ่งเป็น Open Source ที่ถูกทำการแก้ไขเพื่อให้สามารถถอดรหัส Micro QR Code ได้ เพื่อให้ได้ข้อความจากภาพบาร์โค้ด

3.1.2.10 ตรวจหาความผิดพลาดการถอดรหัส

นำข้อความ MD5 ที่ได้จากส่วนของ QR Code (ผลลัพธ์จาก 3.1.2.5) และข้อความ MD5 ที่ได้จากส่วนของ Micro QR Code (ผลลัพธ์จาก 3.1.2.9) โดยพิจารณาความถูกต้องของส่วน QR Code เปรียบเทียบกับส่วนของ Micro QR Code ทั้งสามส่วน โดยความถูกต้องมากกว่าหรือเท่ากับสองส่วนจะถือว่าการถอดรหัสข้อมูล QR Code มีความถูกต้อง แต่ถ้าความถูกต้องน้อยกว่าสองส่วนจะถือว่าการถอดรหัสข้อมูล QR Code มีความผิดพลาด



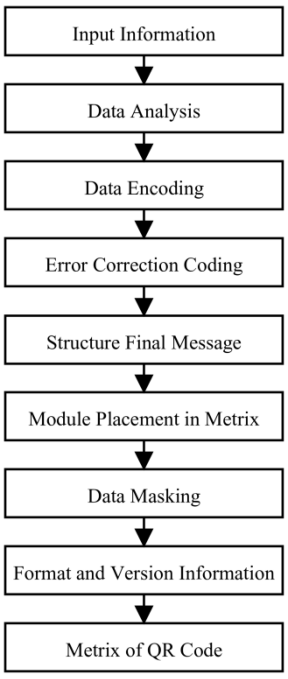
ภาพที่ 3-2 การถอดรหัส QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส

3.2 การเข้ารหัส QR Code และ Micro QR Code (Encode QR Code and Micro QR Code)

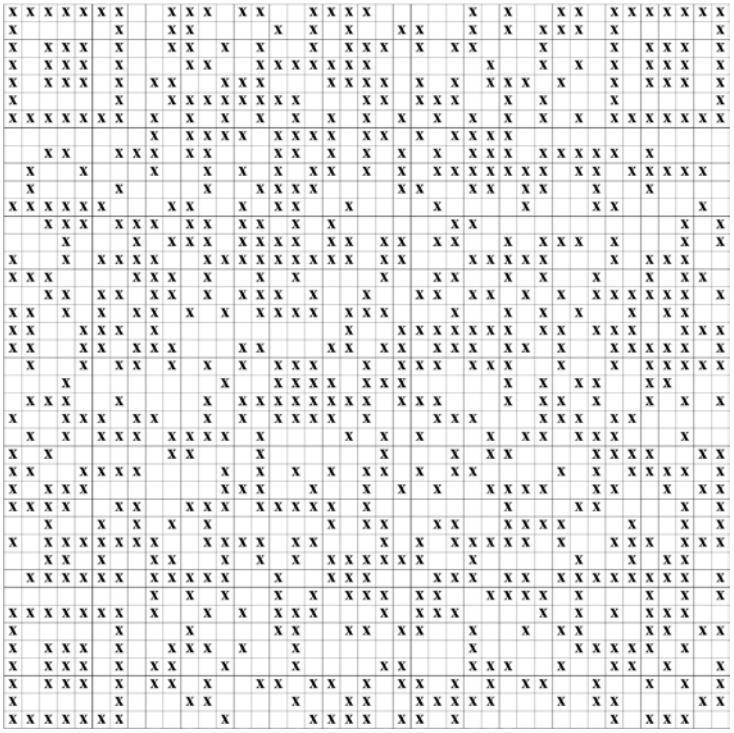
ในงานวิจัยนี้เริ่มด้วยการเข้ารหัส QR Code ซึ่งมีการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอด QR Code โดยใช้ Micro QR Code โดยการสร้างบาร์โค้ดที่อยู่ในรูปแบบของภาพระดับเทา ซึ่งมีการซ้อนทับภาพบาร์โค้ด Micro QR Code ลงบนบริเวณส่วนของ Finder Pattern ของ QR Code โดยการเข้ารหัสนั้นข้อมูลจะต้องมีจำนวนข้อมูลที่เพียงพอเพื่อให้การเข้ารหัส QR Code ที่ได้เป็นเวอร์ชั่น 5 ขึ้นไป (ข้อตกลงเบื้องต้น หัวข้อ 1.4)

3.2.1 กระบวนการเข้ารหัสข้อมูล QR Code (Encode QR Code Procedure)

ส่วนของกระบวนการเข้ารหัส QR Code เพื่อให้ได้ข้อมูลเมทริกซ์ในงานวิจัยนี้ใช้ Zxing Library [6] ซึ่งเป็นโอเพนซอร์สที่ใช้ในการเข้ารหัส QR Code ขั้นตอนในการเข้ารหัส QR Code ได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในหัวข้อที่ 2.5 ซึ่งขั้นตอนการเข้ารหัสแสดงดังภาพที่ 3-3 โดยตัวอย่างข้อมูลเมทริกซ์ที่ได้จากการเข้ารหัส QR Code แสดงดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-3 ขั้นตอนการเข้ารหัสของ QR Code



ภาพที่ 3-4 ตัวอย่างข้อมูลเมทริกซ์ที่ได้จากการเข้ารหัส QR Code

3.2.2 กระบวนการเข้ารหัสข้อมูล Micro QR Code (Encode Micro QR Code Procedure)

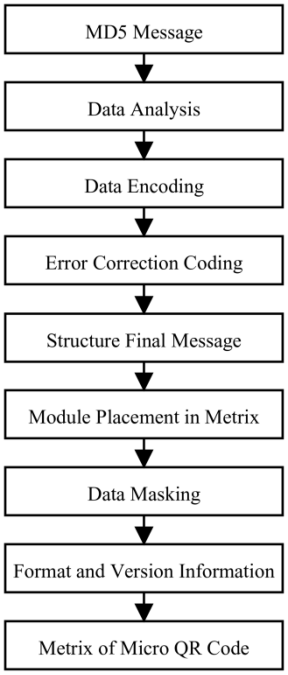
ส่วนการเข้ารหัส Micro QR Code นั้นจะทำการนำข้อมูลหรือข้อความที่ทำการเข้ารหัส QR Code มาทำการย่อยข้อความโดยการเข้ารหัสฟังก์ชั่นแบบแฮชโดยใช้ MD5 ซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.12.1

ตัวอย่างการเข้ารหัสฟังค์ชันแบบแฮชแบบ MD5

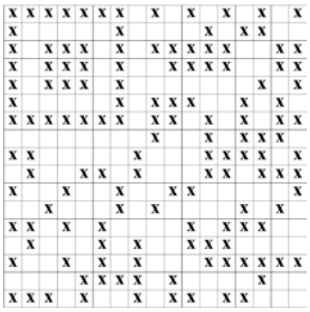
ตัวอย่างข้อความ	:	A TECHNIQUE TO ADD ERROR DETECTION OF QR CODE DECODING BY USING MICRO QR CODE
ผลลัพธ์ที่ถูกเข้ารหัส	:	722603A2E72AF5F86F04D3EFE3D50634

เนื่องจากข้อความย่อยที่ทำการเข้ารหัสในรูปแบบ MD5 นั้นได้จำนวนข้อมูล 128 บิทหรือ 32 ตัวอักษร ซึ่งเป็นจำนวนที่ไม่สามารถทำการเข้ารหัสข้อมูลแบบ Micro QR Code ได้ จึง

ทำการตัดข้อความให้เหลือเพียงจำนวน 64 บิทหรือ 16 ตัวอักษรโดยเลือก 16 ตัวอักษรแรกของข้อความมาทำการเข้ารหัสข้อมูล Micro QR Code ซึ่งขั้นตอนในการเข้ารหัส Micro QR Code ได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในหัวข้อที่ 2.5 ซึ่งขั้นตอนการเข้ารหัสแสดงดังภาพที่ 3-5 โดยตัวอย่างข้อมูลเมทริกซ์ที่ได้จากการเข้ารหัส Micro QR Code แสดงดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-5 ขั้นตอนการเข้ารหัส Micro QR Code



ภาพที่ 3-6 ตัวอย่างข้อมูลเมทริกซ์ที่ได้จากการเข้ารหัส Micro QR Code

3.3 การสร้างบาร์โค้ด QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดโดยใช้ไมโครคิวอาร์โค้ด

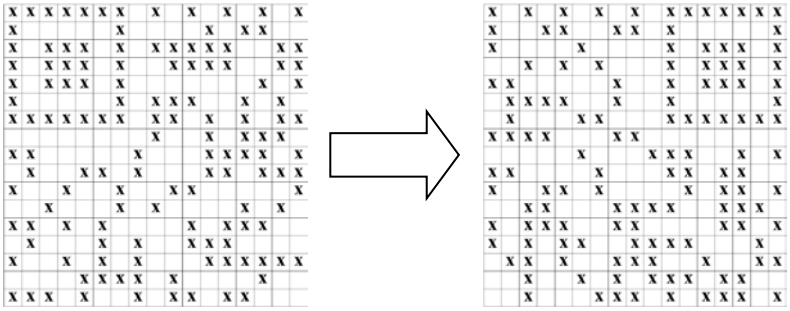
ในขั้นตอนการสร้างบาร์โค้ด QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัสนั้นจะทำการซ้อนทับข้อมูล Micro QR Code บนข้อมูล QR Code โดยกระบวนการซ้อนทับข้อมูลจะใช้ส่วนของ Finder Pattern ของ QR Code และ Micro QR Code เป็นแกนหลักในการซ้อนทับ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 การหมุนเมทริกซ์ Micro QR Code แบบ 90 องศา (Rotation Micro QR Code's Matrix 90 degree)

ในขั้นตอนการหมุนเมทริกซ์ของ Micro QR Code แบบ 90 องศาเป็นการนำเมทริกซ์ที่ได้จากการเข้ารหัส Micro QR Code (ผลลัพธ์จาก 3.2.2) มาทำการหมุนเพื่อให้ส่วนของ Finder Pattern ของ Micro QR Code เปลี่ยนตำแหน่งจากบริเวณซ้ายบนของข้อมูลมาอยู่บริเวณขวาบนของข้อมูลเพื่อให้ข้อมูลเมตริกซ์ของ Micro QR Code ส่วนนี้สามารถซ้อนทับบริเวณขวาบนของ QR Code ได้สนิท โดย pseudo code การหมุนเมตริกซ์แบบ 90 องศาแสดงดังต่อไปนี้

```
int maxX ,maxY
input :  MatrixA[][]
        for ( int x = 1 ; x <= maxX ; x++ ) {
                for ( int y = 1 ; y <= maxY ; y++ ) {
                        MatrixB[maxY-y][x] = MatrixA[x][y]
                }
        }
```

โดยที่ MatrixA = ข้อมูลต้นฉบับ
MatrixB = ข้อมูลที่ทำการแปลง
maxX = ปริมาณสูงสุดของข้อมูลแนวตั้ง
maxY = ปริมาณสูงสุดของข้อมูลแนวนอน



ภาพที่ 3-7 ผลลัพธ์จากการหมุนเมตริกซ์แบบ 90 องศา

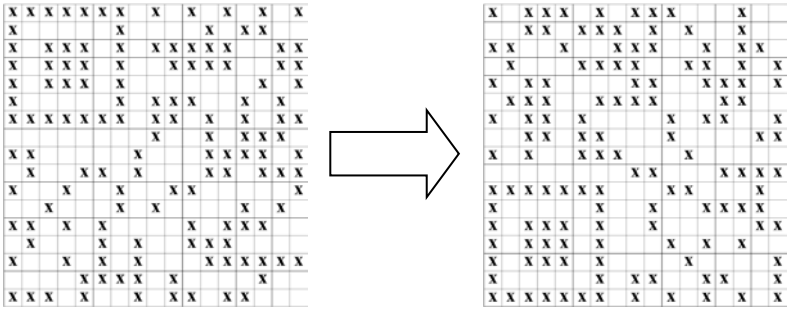
3.3.2 การหมุนเมทริกซ์ Micro QR Code แบบ 270 องศา (Rotation Micro QR Code's Matrix 270 degree)

ในขั้นตอนการหมุนเมทริกซ์ของ Micro QR Code แบบ 270 องศาเป็นการนำเมทริกซ์ที่ได้จากการเข้ารหัส Micro QR Code (ผลลัพธ์จาก 3.2.2) มาทำการหมุนเพื่อให้ส่วนของ Finder Pattern ของ Micro QR Code เปลี่ยนตำแหน่งจากบริเวณซ้ายบนของข้อมูลมาอยู่บริเวณซ้ายล่างของข้อมูลเพื่อให้ข้อมูลเมทริกซ์ของ Micro QR Code ส่วนนี้สามารถซ้อนทับบริเวณซ้ายล่างของ QR Code ได้สนิท โดย pseudo code การหมุนเมตริกซ์แบบ 270 องศาแสดงดังต่อไปนี้

```
int maxX ,maxY
input :  MatrixA[][]
        for (int x = 0; x <= maxX; x++) {
                for (int y = 0; y <= maxY; y++) {
                        MatrixB[y][maxX-x] = MatrixA[x][y]
                }
        }
```

โดยที่

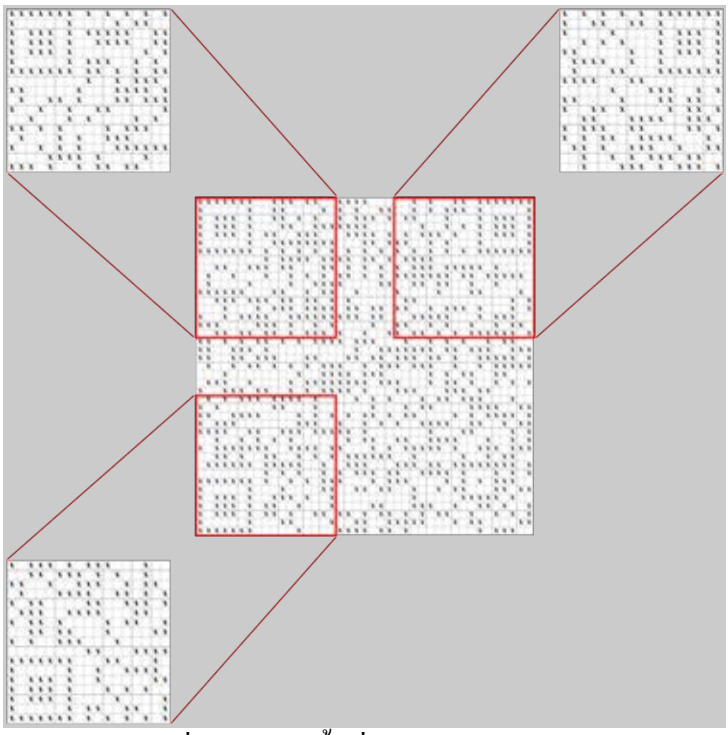
	MatrixA	=	ข้อมูลต้นฉบับ
	MatrixB	=	ข้อมูลที่ทำการแปลง
	maxX	=	ปริมาณสูงสุดของข้อมูลแนวตั้ง
	maxY	=	ปริมาณสูงสุดของข้อมูลแนวนอน



ภาพที่ 3-8 ผลลัพธ์จากการหมุนเมตริกซ์แบบ 270 องศา

3.3.3 การสร้าง QR Code โดยการซ้อนทับข้อมูล Micro QR Code

ขั้นตอนนี้จะเป็นการซ้อนทับข้อมูลเมทริกซ์ Micro QR Code บนข้อมูลเมทริกซ์ QR Code(ผลลัพธ์จาก3.2.1) โดยนำเมทริกซ์ของ Micro QR Code ที่มีส่วน Finder Pattern อยู่ซ้ายบน (ผลลัพธ์จาก 3.2.2) ซ้อนทับข้อมูลบริเวณซ้ายบนของข้อมูล QR Code เมทริกซ์ของ Micro QR Code ที่มีส่วน Finder Pattern อยู่ขวาบน (ผลลัพธ์จาก 3.3.1) ซ้อนทับข้อมูลบริเวณขวาบนของข้อมูล QR Code เมทริกซ์ของ Micro QR Code ที่มีส่วน Finder Pattern อยู่ซ้ายล่าง (ผลลัพธ์จาก 3.3.2) ซ้อนทับข้อมูลบริเวณซ้ายล่างของข้อมูล QR Code ดังแสดงในภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 แสดงพื้นที่ในการซ้อนทับข้อมูล

การสร้างภาพ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัสจะเป็นการสร้างบาร์โค้ดในรูปแบบภาพระดับเทา ซึ่งมีการใช้ค่าระดับเทาจากข้อมูลในตารางที่ 3-1 โดยช่วงค่าแต่ละช่วงจะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 85 ผลลัพธ์ของภาพบาร์โค้ดประเภท QR Code ที่มีส่วนเพิ่มการตรวจสอบการถอดรหัสแสดงดังภาพที่ 3-10

ตารางที่ 3-1 ตารางเปรียบเทียบยค่าระดับสีเทาของการซ้อนทับข้อมูล

QR Code	Micro QR Code	Grayscale Values
True	False	0
True	True	85
False	True	170
False	False	255

ภาพที่ 3-10 ผลลัพธ์ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนตรวจสอบความผิดพลาดของการถอดรหัส

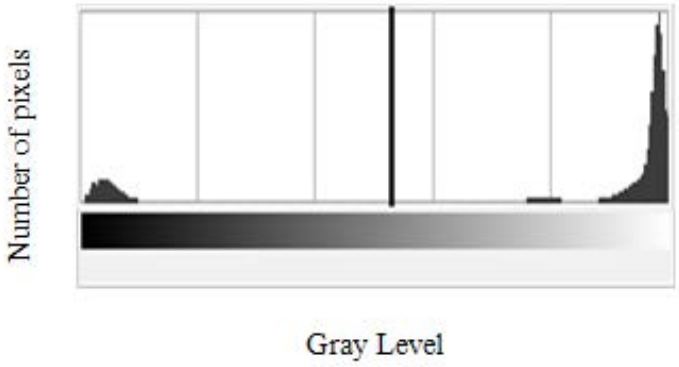
3.4 กระบวนการแบ่งส่วนองค์ประกอบภาพ

ในขั้นตอนการแบ่งองค์ประกอบของภาพเป็นการแยกส่วนการประมวลผลเพื่อทำการถอดรหัสบาร์โค้ดในส่วนของ QR Code และ Micro QR Code เพื่อให้สามารถนำส่วนของข้อมูลที่ได้จากการถอดรหัส Micro QR Code มาใช้ในการตรวจสอบการถอดรหัสของ QR Code ได้

ภาพที่ 3-11 ตัวอย่างภาพที่นำเข้า

3.4.1 กระบวนการทำภาพแบบไบนารี QR Code (Binarization QR Code)

ในกระบวนการทำภาพแบบไบนารี (Binary Image) ในส่วนของ QR Code นั้น เป็นการนำภาพนำเข้า เข้ากระบวนการทำการเทรสโชลด์แบบหนึ่งระดับเพื่อลบส่วนโมดูลข้อมูล ของ Micro QR Code ก่อนทำการถอดรหัสข้อมูล โดยค่าระดับเทรสโชลด์ที่ใช้ในการทำภาพไบนารี่ นี้ได้จากการพิจารณาข้อมูลจากแผนภูมิฮิสโทแกรม (Histogram) ของภาพดังภาพที่ 3-12 เมื่อ พิจารณาจากแผนภูมิฮิสโทแกรมจะเห็นว่าค่าของส่วนโมดูล QR Code นั้นจะอยู่ในช่วง 0 – 130 และค่า 131 – 255 เป็นส่วนพื้นหลัง (Background) ของ QR Code



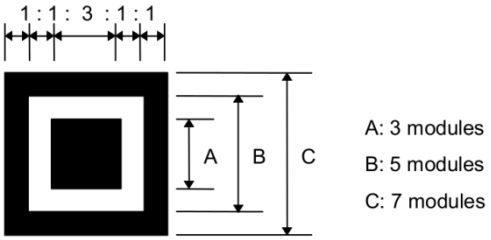
ภาพที่ 3-12 แผนภูมิฮิสโทแกรมของภาพ QR Code

เมื่อทำการเทรสโชลด์ด้วยค่าระดับเทาที่สนใจจะได้ภาพในส่วนของ QR Code ที่มี ลักษณะเป็นภาพแบบไบนารีดังภาพที่ 3-13 ซึ่งมีส่วนโมดูลของ QR Code ที่สามารถนำไปเข้า กระบวนการถอดรหัสได้

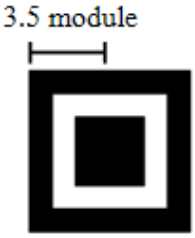
ภาพที่ 3-13 ภาพไบนารีของ QR Code

3.4.2 การกำหนดบริเวณสนใจ (Region of Interest) ส่วนของ Micro QR Code

ขั้นตอนนี้จะเป็นกระบวนการกำหนดบริเวณของภาพนำเข้าเพื่อพิจารณาส่วนของ Micro QR Code โดยใช้ขนาดของโมดูลในการกำหนดบริเวณที่มีส่วนของ Micro QR Code ของภาพ โดยการคำนวนจากขนาด Finder Pattern ซึ่งมีโครงสร้างดังทำการวัดจากภาพที่ 3-14 จุดกึ่งกลางของ Finder Pattern มาถึงขอบดังภาพที่ 3-15 จากนั้นนำขนาดที่ได้มาหารด้วย 3.5 จะได้ขนาดต่อ 1 โมดูลโดยประมาณ



ภาพที่ 3-14 โครงสร้างของ Finder Pattern



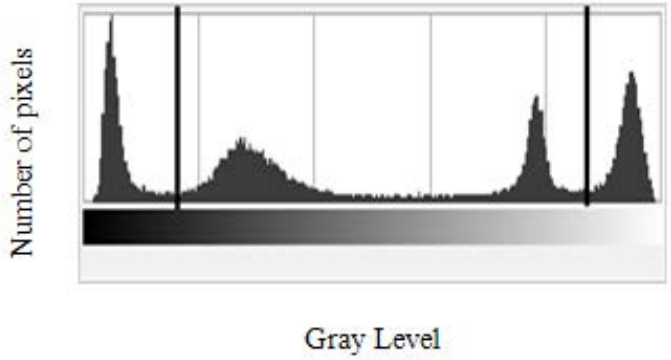
ภาพที่ 3-15 การหาขนาดของโมดูล

เมื่อได้ขนาดของโมดูลแล้วทำการกำหนดบริเวณโดยใช้ขนาดของ Micro QR Code เท่ากับ 17×17 โมดูลคูณกับขนาดของโมดูลที่ได้จากการคำนวนก็จะได้บริเวณพื้นที่ของ Micro QR Code ที่ต้องการดังภาพที่ 3-16

ภาพที่ 3-16 ผลลัพธ์จากการกำหนดบริเวณที่สนใจของส่วน Micro QR Code

3.4.3 กระบวนการทำภาพแบบไบนารี Micro QR Code (Binarization Micro QR Code)

ในกระบวนการทำภาพแบบไบนารี (Binary Image) ในส่วนของ Micro QR Code นั้น เป็นการนำภาพที่ได้จากการกำหนดบริเวณสนใจ (จากผลลัพธ์ 3.4.2) เข้ากระบวนการทำการเทรสโชลด์แบบสองระดับเพื่อลบส่วนโมดูลข้อมูลของ QR Code ก่อนทำการถอดรหัสข้อมูล โดยค่าระดับเทรสโชลด์ที่ใช้ในการทำภาพไบนารี่นี้ได้จากการพิจารณาข้อมูลจากแผนภูมิฮิสโทแกรม (Histogram) ของภาพดังภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-17 แผนภูมิฮิสโทแกรมของภาพ Micro QR Code ในส่วนของซ้ายบน

เมื่อพิจารณาจากแผนภูมิฮิสโทแกรมจะเห็นว่าค่าของส่วนโมดูล Micro QR Code นั้นจะอยู่ในช่วง 41 – 221 ซึ่งค่าในช่วงของ 0 – 40 และ 221 – 255 จะถือว่าเป็นส่วนพื้นหลัง (Background) ของ Micro QR Code เมื่อทำการเทรสโชลด์ด้วยค่าระดับเทาที่สนใจจะได้ภาพในส่วนของ Micro QR Code ที่มีลักษณะเป็นภาพแบบไบนารีดังภาพที่ 3-18

ภาพที่ 3-18 ภาพไบนารีของ Micro QR Code

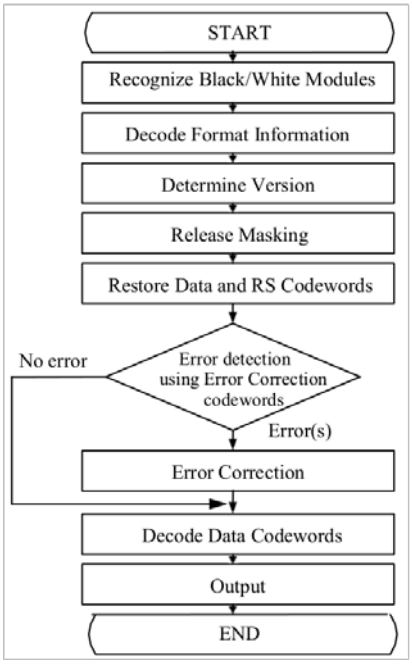
3.5 การกรองสัญญาณรบกวน (Filtering)

จากภาพที่ 3-18 เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ของภาพ Micro QR Code ที่ได้ยังคงมีส่วนขอบของโมดูล QR Code เหลืออยู่บางส่วน ซึ่งทำให้ส่วนของ Micro QR Code ยังไม่สามารถนำไปใช้ในการถอดรหัสได้ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำเสนอวิธีการกำจัดส่วนขอบของ QR Code ที่เหลือโดยการใช้เทคนิคทางมอร์โฟโลยี (Morphology) ด้วยวิธีการเปิดภาพ (Opening) โดยจะใช้หน่วยโครงสร้างที่มีขนาด 3x3 ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าส่วนขอบของ QR Code ที่เหลืออยู่เพื่อให้ได้ผลดีต่อการกำจัดส่วนขอบของโมดูล QR Code ออกจะได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 3-19

ภาพที่ 3-19 ผลลัพธ์จากการทำการเปิดภาพ Micro QR Code ทั้งสามส่วน

3.6 การถอดรหัส QR Code และ Micro QR Code (Decode QR Code and Micro QR Code)

ในการถอดรหัสข้อมูล QR Code ในงานวิจัยนี้ใช้ Zxing Libraly [6] ในการถอดรหัสภาพ QR Code (ผลลัพธ์จาก 3.4.1) และการถอดรหัสข้อมูล Micro QR Code ในงานวิจัยนี้ใช้การปรับปรุง Zxing Libraly เพื่อให้สามารถถอดรหัสภาพ Micro QR Code (ผลลัพธ์จาก 3.5) โดยได้กล่าวรายละเอียดขั้นตอนการถอดรหัส QR Code และ Micro QR Code ไว้ในหัวข้อ 2.6 โดยกระบวนการถอดรหัสแสดงดังภาพที่ 3-20



ภาพที่ 3-20 แสดงกระบวนการถอดรหัสภาพ QR Code

3.7 การยืนยันความถูกต้องการถอดรหัส QR Code (Verification Decoding QR Code)

ในขั้นตอนการยืนยันความถูกต้องการถอดรหัส QR Code จะทำการนำผลลัพธ์ของข้อมูลหรือข้อความที่ได้จากการถอดรหัส QR Code (ผลลัพธ์จาก 3.6) มาทำการย่อยข้อความโดยการเข้ารหัสฟังก์ชั่นแบบแฮชโดยใช้ MD5 ซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.12.1 จากนั้นทำการตัดข้อความให้เหลือเพียงจำนวน 64 บิทหรือ 16 ตัวอักษรโดยเลือก 16 ตัวอักษรแรกของข้อความมาทำการ

ตรวจสอบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการถอดรหัสส่วนของ Micro QR Code ทั้งสามส่วนและพิจารณาความถูกต้องของข้อความ โดยผลการเปรียบเทียบมีค่าความถูกต้องมากกว่าสองส่วนของ Micro QR Code ถือว่าการถอดรหัส QR Code มีความถูกต้อง แต่ถ้าผลการเปรียบเทียบมีค่าความถูกต้องน้อยกว่าสองส่วนของ Micro QR Code ถือว่าการถอดรหัส QR Code อาจมีความผิดพลาด

3.8 เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพ

3.8.1 การวัดค่าความเหมือนของภาพ (Similarity Measurement)

การวัดค่าความเหมือนของภาพระหว่างภาพ QR Code ต้นฉบับที่ไม่มีการเพิ่มส่วนตรวจหาความผิดพลาด กับภาพผลลัพธ์จากการทำ Binarization ของภาพ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนตรวจหาความผิดพลาดจะใช้ค่า NCC (Normalized Cross Correlation) ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยผลลัพธ์ที่มีค่าใกล้เคียง 1 จะหมายถึงภาพผลลัพธ์มีความใกล้เคียงกับภาพต้นฉบับ (สมการที่ใช้ในการคำนวณอธิบายอยู่ในหัวข้อที่ 2.13.1)

3.8.2 การวัดเวลาที่ใช้ในการประมวลผล

การคำนวณเวลาที่เครื่องคอมพิวเตอร์ใช้ในการประมวลผลในการถอดรหัส QR Code และการประมวลผลในการถอดรหัส Micro QR Code (สมการคำนวณเวลาที่ใช้ในการประมวลผลอธิบายในหัวข้อที่ 2.13.2)

3.8.3 การวัดเปอร์เซ็นประสิทธิภาพการถอดรหัส Micro QR Code

การวัดประสิทธิภาพในการถอดรหัส Micro QR Code โดยวัดอัตราส่วนที่สามารถถอดรหัส Micro QR Code ต่อจำนวนส่วนของ Micro QR Code ทั้งหมดโดยคิดเป็นจำนวนเปอร์เซ็น

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ผลการทดลองของกระบวนการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดโดยใช้ไมโครคิวอาร์โค้ด โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพโดยคำนวณค่า NCC , Time และเปอร์เซ็นประสิทธิภาพการถอดรหัส Micro QR Code เปรียบเทียบกัน

4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1 ซอร์ฟแวร์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ Netbeans Version 7.3.1 [7] เป็นเครื่องมือพัฒนาโปรแกรมที่มีความสามารถใช้งานได้หลากหลายภาษา ซึ่งถูกพัฒนาด้วยภาษา Java

4.1.2 ภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คือ Java

4.1.3 ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบ คือ ซีพียู Intel Core i7-740QM 1.73 GHz 6 MB L3 Cache. หน่วยความจำหลัก 4096 MB ฮาร์ดดิสก์ 500 GB ระบบปฏิบัติการ Ubuntu 12.04 (Precise) 64-bit

4.1.4 ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง คือ ภาพ QR Code ที่ทำการเข้ารหัสจากวิธีการในหัวข้อที่ 3.3 โดยทำการพิมพ์ด้วยขนาดกว้าง 72 มิลลิเมตร และสูง 72 มิลลิเมตร จำนวน 320 ภาพ โดยแบ่งเป็นภาพ QR Code เวอร์ชั่น 5 ถึงเวอร์ชั่น 20 จำนวนเวอร์ชั่นละ 20 ภาพ ซึ่งมีข้อมูลต่างกัน

4.1.5 ข้อมูลภาพต้นฉบับ คือ ภาพ QR Code ที่ทำการเข้ารหัสแบบปกติ ซึ่งมีข้อมูลที่ใช้ในการเข้ารหัสเหมือนภาพ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนตรวจหาความผิดพลาดในหัวข้อที่ 4.1.4 โดยมีขนาดเท่ากับ 640 x 640 พิกเซล

4.2 ผลการทดลอง

การทดลองนี้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของการทดลองโดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์และกล้องดิจิทัล ทำการวัดประสิทธิภาพด้วยการวัดค่า NCC เวลาที่ใช้ในการประมวลผลโดยวัดเวลาที่ใช้ในการถอดรหัส QR Code และ Micro QR Code และการวัดเปอร์เซ็นประสิทธิภาพการถอดรหัส Micro QR Code ภาพตัวอย่างผลลัพธ์บางส่วนของผลการทดลองจำแนกตามเวอร์ชั่นของ QR Code แสดงดังนี้

ตารางที่ 4-1 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 5 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>01</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>72.863 Ms</td><td>NCC</td><td>0.980</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>81.052 Ms.</td><td colspan="2">32.694 Ms.</td><td colspan="2">83.842 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-2 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 6 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>02</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="2">Decoding Process's Time</td><td>77.195 Ms</td><td>NCC</td><td>0.987</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="3">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>34.664 Ms.</td><td>25.714 Ms.</td><td colspan="3">71.642 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-3 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 7 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>03</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>70.475 Ms</td><td>NCC</td><td>0.988</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="3">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>29.455 Ms.</td><td>28.513 Ms.</td><td colspan="3">68.120 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-4 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 8 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>04</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>12.157 Ms.</td><td>NCC</td><td>0.988</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="3">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>15.684 Ms.</td><td>19.679 Ms.</td><td colspan="3">22.185 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-5 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 9 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>05</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>8.530 Ms</td><td>NCC</td><td>0.987</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="3">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>19.784 Ms.</td><td>14.784 Ms.</td><td colspan="3">19.634 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-6 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 10 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>06</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>14.595 Ms</td><td>NCC</td><td>0.991</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="3">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>19.500 Ms.</td><td>28.143 Ms.</td><td colspan="3">17.351 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-7 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 11 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>07</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>72.863 Ms</td><td>NCC</td><td>0.986</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="3">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>41.361 Ms.</td><td>27.571 Ms.</td><td colspan="3">50.683 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-8 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 12 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>08</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>15.786 Ms</td><td>NCC</td><td>0.969</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="3">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>12.822 Ms.</td><td>10.792 Ms.</td><td colspan="3">15.137 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-9 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 13 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>09</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>15.067 Ms</td><td>NCC</td><td>0.983</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>12.620 Ms.</td><td colspan="2">7.791 Ms.</td><td colspan="2">14.339 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-10 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 14 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>10</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>15.463 Ms</td><td>NCC</td><td>0.975</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="3">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>8.520 Ms.</td><td>13.011 Ms.</td><td colspan="3">12.914 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-11 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 15 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>11</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>24.318 Ms</td><td>NCC</td><td>0.986</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="3">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>29.734 Ms.</td><td>28.541 Ms.</td><td colspan="3">54.070 Ms.</td></tr>
</table>

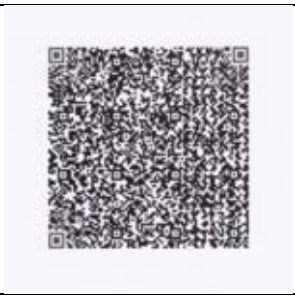
ตารางที่ 4-12 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 16 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>12</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>13.497 Ms</td><td>NCC</td><td>0.975</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="3">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>12.775 Ms.</td><td>7.959 Ms.</td><td colspan="3">14.009 Ms.</td></tr>
</table>

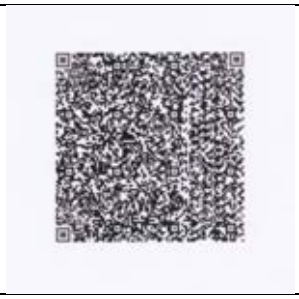
ตารางที่ 4-13 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 17 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>13</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>17.095 Ms</td><td>NCC</td><td>0.966</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>10.638 Ms.</td><td colspan="2">13.883 Ms.</td><td colspan="2">13.547 Ms.</td></tr>
</table>

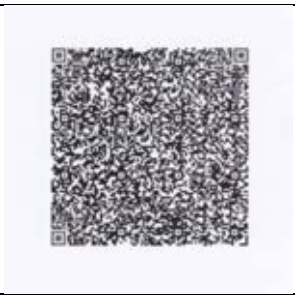
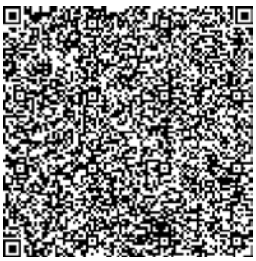
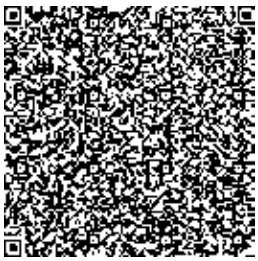
ตารางที่ 4-14 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 18 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>14</td><td colspan="2">  </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>16.909 Ms</td><td>NCC</td><td>0.986</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>8.853 Ms.</td><td colspan="2">6.946 Ms.</td><td colspan="2">11.901 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-15 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 19 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>15</td><td colspan="2">  </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>22.414 Ms</td><td>NCC</td><td>0.990</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="3">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="3"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>14.083 Ms.</td><td>12.096 Ms.</td><td colspan="3">10.859 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-16 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 20 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td>16</td><td colspan="2">  </td><td>  </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>18.362 Ms</td><td>NCC</td><td>0.959</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>6.289 Ms.</td><td colspan="2">6.453 Ms.</td><td colspan="2">9.141 Ms.</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-17 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 5 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>17</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.962</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-18 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 6 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>18</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.974</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-19 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 7 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>19</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.961</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

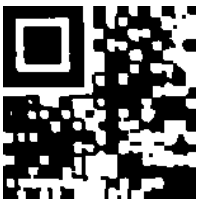
ตารางที่ 4-20 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 8 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>20</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.968</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-21 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 9 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>21</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.974</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-22 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 10 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>22</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC.</td><td colspan="2">0.963</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

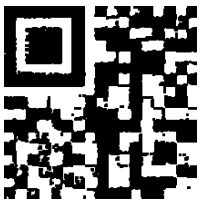
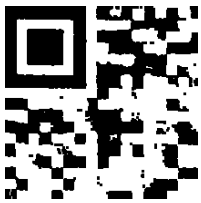
ตารางที่ 4-23 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 11 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>23</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.962</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">False</td></tr>
</table>

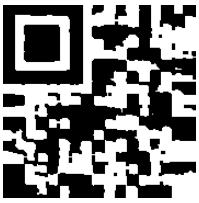
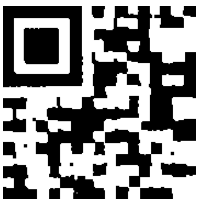
ตารางที่ 4-24 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 12 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>24</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.960</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>False</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

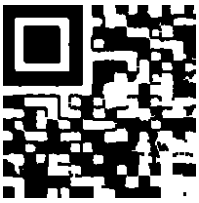
ตารางที่ 4-25 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 13 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>25</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.955</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td>  </td><td> </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>False</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

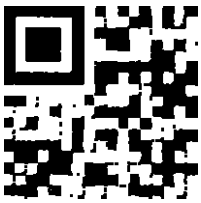
ตารางที่ 4-26 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 14 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>26</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.960</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td>  </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>False</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

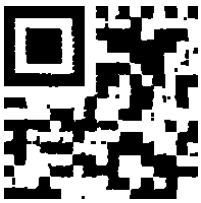
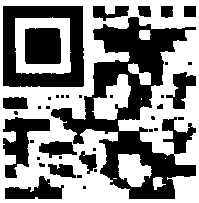
ตารางที่ 4-27 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 15 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>27</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.978</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td>  </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-28 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 16 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>28</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.970</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td>  </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">False</td></tr>
</table>

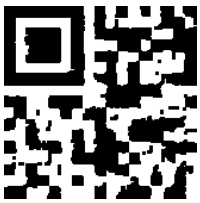
ตารางที่ 4-29 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 17 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>29</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.973</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td>  </td><td> </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>False</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

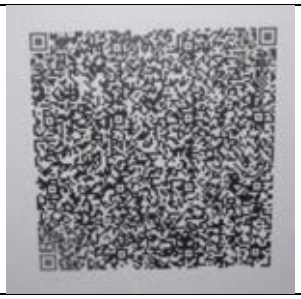
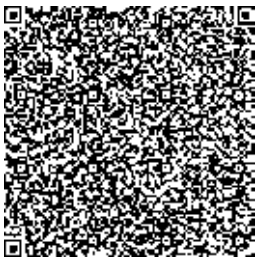
ตารางที่ 4-30 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 18 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>30</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.963</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">False</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-31 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 19 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>31</td><td colspan="2"> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.986</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td>  </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">False</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-32 แสดงผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 20 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

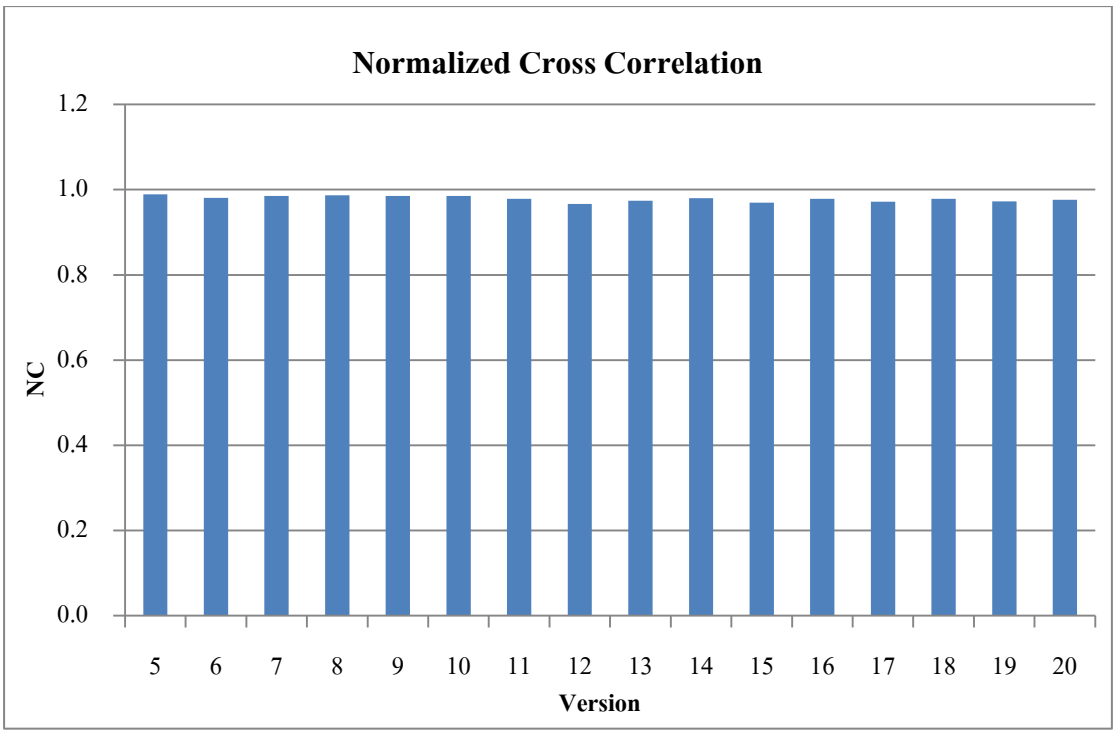
<table>
<tr><td>No.</td><td colspan="2">Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td>32</td><td colspan="2">  </td><td> </td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td colspan="2">0.959</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

สำหรับผลการทดลอง สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ก จากการทดลองสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

4.2.1 ผลการทดลองโดยการวัดค่าเฉลี่ยของค่า NCC และเวลาที่ใช้ในการประมวลผล (Time's process) การถอดรหัส QR Code โดยนำเข้าภาพด้วยเครื่องสแกนเนอร์ แสดงค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 4-33 และค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของการถอดรหัสส่วน Micro QR Code และเปอร์เซ็นผลการถอดรหัสสำเร็จ (Success Rate of Decoding) ของส่วน Micro QR Code โดยนำเข้าภาพด้วยเครื่องสแกนเนอร์ดังตารางที่ 4-34 เมื่อนำข้อมูลค่าความเหมือนของภาพมาสร้างกราฟแผนภูมิแสดงดังภาพที่ 4-1 และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลการถอดรหัสแสดงดังภาพที่ 4-2

ตารางที่ 4-33 ผลการทดลองเฉลี่ยในแต่ละเวอร์ชั่นของ QR Code โดยนำเข้าภาพด้วยเครื่องสแกนเนอร์

QR Code's Version	Time's Decode (Ms.)	NCC
5	18.501	0.989
6	15.106	0.981
7	14.577	0.985
8	12.327	0.986
9	12.557	0.985
10	12.118	0.985
11	17.301	0.979
12	9.667	0.966
13	7.606	0.974
14	13.311	0.980
15	13.772	0.970
16	17.590	0.978
17	13.458	0.971
18	13.658	0.979
19	14.337	0.973
20	12.228	0.976

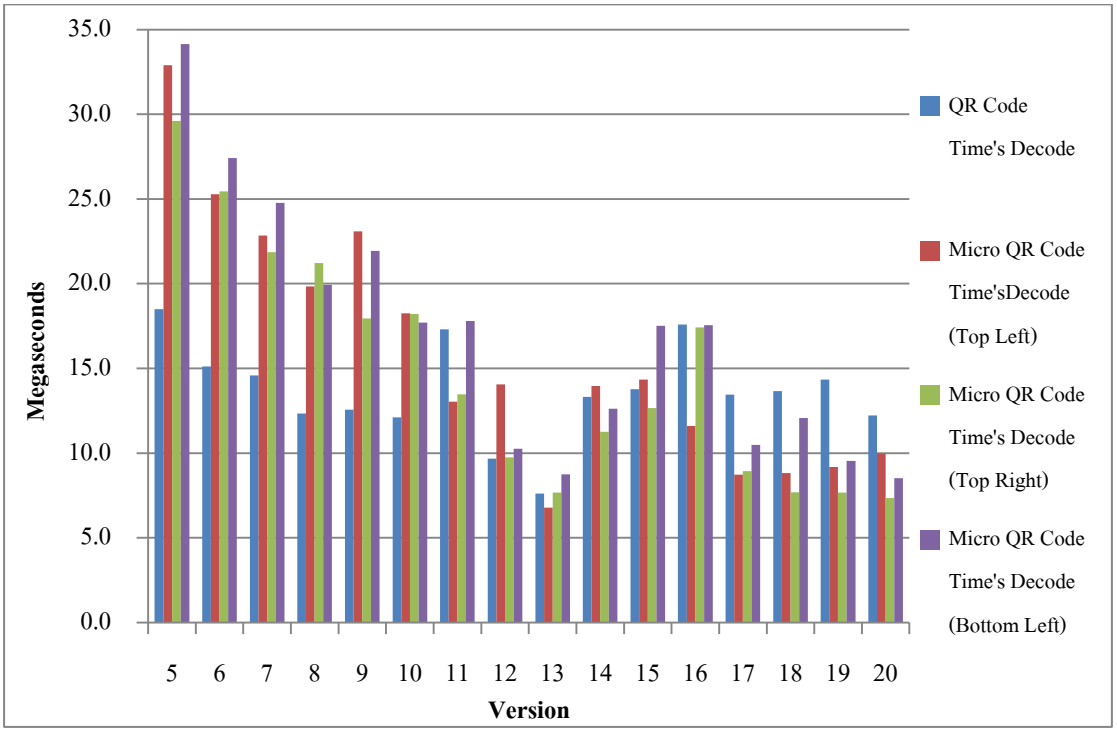


ภาพที่ 4-1 แผนภาพค่า NCC เฉลี่ยของการนำเข้าภาพด้วยเครื่องสแกนเนอร์

ตารางที่ 4-34 ผลการทดลองเฉลี่ยเวลาการประมวลผลในแต่ละเวอร์ชั่นของส่วน Micro QR Code โดยนำเข้าภาพด้วยเครื่องสแกนเนอร์

QR Code's Version	Micro QR Code Time's Decode (Ms.)			Success Rate of Docoding (%)
	Top Left	Top Right	Bottom Left	
5	32.907	29.604	34.148	100
6	25.281	25.460	27.416	100
7	22.835	21.858	24.780	100
8	19.833	21.221	19.937	100
9	23.082	17.946	21.938	100
10	18.259	18.208	17.706	100
11	13.030	13.462	17.801	100
12	14.050	9.755	10.260	100

13	6.782	7.675	8.746	100
14	13.970	11.266	12.617	100
15	14.343	12.655	17.517	100
16	11.602	17.428	17.547	100
17	8.730	8.936	10.487	100
18	8.818	7.678	12.072	100
19	9.180	7.670	9.543	100
20	9.973	7.340	8.516	100

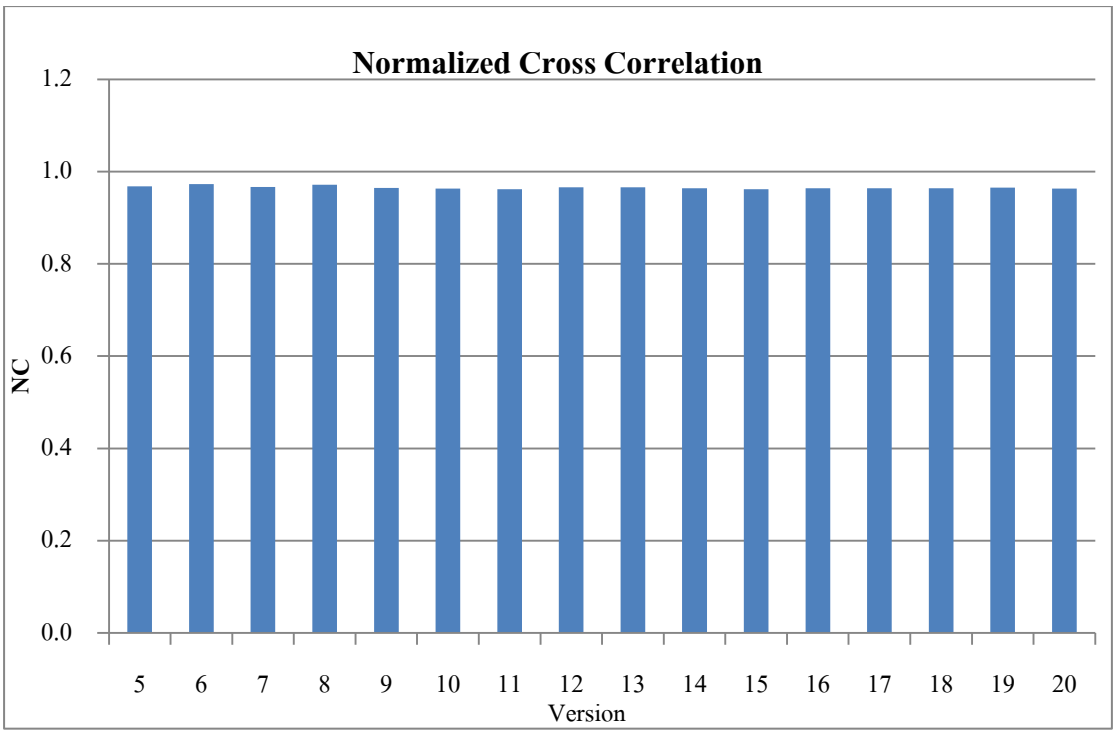


ภาพที่ 4-2 แผนภาพค่าเวลาที่ใช้ในการประมวลผลเฉลี่ยในแต่ละเวอร์ชั่น

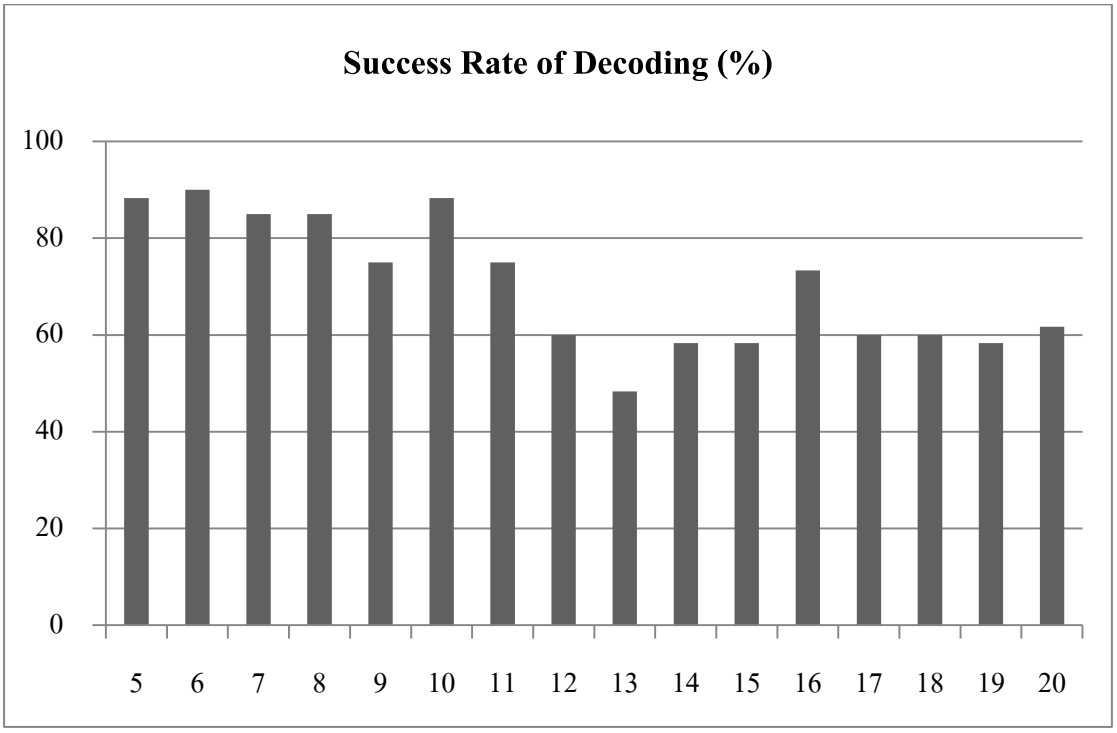
4.2.2 ผลการทดลองโดยการวัดค่าเฉลี่ยของค่า NCC และเปอร์เซ็นผลการถอดรหัสสำเร็จ (Success Rate of Decoding) ของส่วน Micro QR Code โดยนำเข้าภาพด้วยกล้องดิจิทัล ดังตารางที่ 4-35 เมื่อนำข้อมูลค่าความเหมือนของภาพมาสร้างกราฟแผนภูมิแสดงดังภาพที่ 4-3 และเปอร์เซ็นความสำเร็จในการถอดรหัส Micro QR Code ดังภาพที่ 4-4

ตารางที่ 4-35 ผลการทดลองการถอดรหัสโดยการนำเข้าภาพด้วยกล้องดิจิทัล

QR Code Version	NC	Micro QR Code			Success Rate of Decoding (%)
		Top Left	Top Right	Bottom Left	
5	0.968	17/20	16/20	20/20	88
6	0.973	17/20	17/20	20/20	90
7	0.967	19/20	14/20	18/20	85
8	0.972	17/20	15	19/20	85
9	0.965	18/20	11/20	16/20	75
10	0.963	20/20	14/20	19/20	88
11	0.961	17/20	13/20	15/20	75
12	0.966	18/20	6/20	12/20	60
13	0.966	15/20	3/20	11/20	48
14	0.964	18/20	5/20	12/20	58
15	0.962	16/20	10/20	9/20	58
16	0.964	19/20	14/20	11/20	73
17	0.964	13/20	12/20	11/20	60
18	0.964	16/20	15/20	5/20	60
19	0.965	16/20	9/20	10/20	58
20	0.963	19/20	13/20	5/20	62



ภาพที่ 4-3 แผนภาพค่า NCC เฉลี่ยของการนำเข้าภาพด้วยกล้องดิจิทัล



ภาพที่ 4-4 แผนภาพค่าเปอร์เซ็นผลการถอดรหัสสำเร็จส่วนของ Micro QR Code

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปงานวิจัย ปัญหาที่พบในงานวิจัย และข้อเสนอแนะอันจะเป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนา QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัสเพื่อให้สามารถใช้งานในเวอร์ชั่นที่สูงขึ้นได้

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการที่เหมาะสมในการเพิ่มส่วนตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส QR Code โดยการเพิ่มส่วน Micro QR Code ลงในบาร์โค้ด และใช้วิธีการประมวลผลภาพในการแยกส่วนการถอดรหัส Micro QR Code เพื่อใช้เป็นส่วนตรวจสอบความถูกต้องผลของการถอดรหัส QR Code โดยการทดลองใช้ข้อมูลจากการนำเข้าภาพด้วยเครื่องสแกนเนอร์และกล้องดิจิทัล

จากผลการทดลองใน 4.2.1 โดยการนำเข้าภาพด้วยเครื่องสแกนเนอร์พบว่า ภาพ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส เมื่อนำเข้ากระบวนการ Binarization แล้ว ได้ภาพที่มีค่าความเหมือนกับต้นฉบับมากกว่า 0.966 ซึ่งเป็นภาพที่มีความใกล้เคียงกับต้นฉบับและสามารถใช้ในการถอดรหัสได้ ภาพ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัสที่มีความสม่ำเสมอของแสงเท่ากัน จะสามารถแยกส่วนของ Micro QR Code ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำส่วนของ Micro QR Code ไปทำการถอดรหัสได้ 100 เปอร์เซ็น และสามารถนำผลของการถอดรหัสไปใช้ตรวจหาความผิดพลาดการถอดรหัสส่วนของ QR Code ได้ โดยเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของ Micro QR Code เพื่อทำการถอดรหัสนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดโมดูลของ QR Code โดยขนาดโมดูลที่เล็กกว่าจะใช้เวลาในการประมวลผลเพื่อถอดรหัส Micro QR Code น้อยกว่า

จากผลการทดลองใน 4.2.2 โดยการนำภาพเข้าด้วยกล้องดิจิทัลพบว่า ภาพ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัส เมื่อนำเข้ากระบวนการ Binarization แล้ว ได้ภาพที่มีค่าความเหมือนกับต้นฉบับมากกว่า 0.961 ซึ่งเป็นภาพที่มีความใกล้เคียงกับต้นฉบับและสามารถใช้ในการถอดรหัสได้ภาพ QR Code ที่มีการเพิ่มส่วนการตรวจหาความผิดพลาดของการถอดรหัสที่มีความสม่ำเสมอของแสงไม่เท่ากันทั้งภาพ ในการแยกส่วนของ Micro QR Code ออกจากส่วน QR Code ได้ประสิทธิภาพที่ไม่ดีมากนัก เนื่องจากภาพระดับเทามีค่าความเข้มที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อแสงมีความเปลี่ยนแปลง และโมดูลที่มีระดับความเข้มใกล้เคียงกัน

เมื่อนำเข้าโดยใช้กล้องดิจิทัลทำให้ส่วนของโมดูลนั้นมีความเพี้ยนของระดับความเข้ม และทำให้การแยกโมดูลที่ต้องการไม่ได้ ทำให้การถอดรหัส Micro QR Code ขึ้นอยู่กับคุณภาพของแสงและขนาดของโมดูล ภาพ QR Code ที่มีขนาดโมดูลที่ใหญ่กว่าจะสามารถจำแนกส่วนของ Micro QR Code ออกได้ดีกว่าภาพที่มีขนาดโมดูลเล็ก

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลอง พบว่าวิธีการที่ได้พัฒนายังมีข้อจำกัดกับการนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ เนื่องจากปัญหาด้านความสว่างของภาพ QR Code ที่นำเข้า ควรปรับปรุงโดยให้มีการทำวิจัยและศึกษาเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เทคนิคการเพิ่มส่วนตรวจสอบการถอดรหัสนี้สามารถถอดรหัสได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อแสงของภาพและขนาดของโมดูล QR Code มีขนาดที่พอเหมาะ แต่ในกรณีที่แสงมีความสว่างไม่สม่ำเสมอและขนาดโมดูลของ QR Code เล็กเกินไปทำให้ประสิทธิภาพในการถอดรหัสลดลง จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาวิธีแก้ไขต่อไป

รายการอ้างอิง

[1] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ . แนะนำเทคโนโลยีบาร์โค้ด [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: http://www.nstda.or.th/nstda-knowledge/2866-2d-barcode. [12 กันยายน 2556]

[2] ISO/IEC . Information technology-Automatic identification and data capture QR Code 2005 bar code symbology specification. First Edition.18004. Switzerland: ISO copyright office, 2005.

[3] Enrique, C., Francisco J., G., David, C., QR-Maps: An efficient tool for indoor user location based on QR-Codes and Google maps, Consumer Communications and Networking Conference. pp.928-932, January 2011.

[4] Vasileios, Y., Panagiotis, K., Chrysanthi, K., Panagiotis, K., Quick response codes in E-learning, International Conference on Education and e-Learning Innovations. pp.1-5, July 2012.

[5] กมล หอมขจร. กระบวนการขจัดรอยขีดข่วนบนภาพคิวอาร์โค้ด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

[6] ZXing. ZXing Multi-format 1D/2D barcode image processing library with clients for Android, Java - Google Project Hosting [Online]. Available from : https://code.google.com/p/zxing [2013, Augest 23]

[7] Netbeans. Welcome to NetBeans [Online]. Available from : https://netbeans.org/ [2013, Augest 23]

[8] สุพพัต รุ่งเรืองศิลป์. การพัฒนาคิวอาร์โค้ดร่วมกับลายน้ำดิจิทัลเพื่อซ่อนข้อมูล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

[9] ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์. การประมวลผลรูปดิจิตอลด้วย Matlab (Digital image processing using Matlab). ตุลาคม 2550.

[10] สมเกียรติ อุดมหรรษากุล. การประมวลผลภาพเบื้องต้น (Fundamental of Digital Image Processing). มิถุนายน 2550

[11] พีรพงษ์ วงษ์กรวรเวช. การแบ่งย่อยส่วนประกอบของภาพจากระบบสร้างภาพตัดขวางจากรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติของกะโหลกศีรษะมนุษย์, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิตภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือปีการศึกษา, 2549.

[12] ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์. การประมวลผลรูปดิจิตอลขั้นสูงด้วย Matlab (Advanced Digital image processing using Matlab). กรกฎาคม 2551.

[13] Hu, C., Jiang, L., Bo, J., Wavelet Transform and Morphology Image Segmentation Algorism for Blood Cell, IEEE Conference on Industrial Electronics and Aplication.pp.542-545, May 2009.

[14] Saibal K., P., Diwakar, B., Rajat, K. Varun, B., A New Cryptographic Hash Function based on Latin Squares and Non-linear Transformations, Advance Computing Conference.pp.862-867, March 2009.

[15] Dan, C., Jun, H., Xio-yang, Z., A Reconfigurable and Ultra Low-cost VLSI Implementation of SHA-1 and MD5 function, International Conference on ASIC.pp.862-865, October 2007.

[16] RFC1321. RFC 1321 – The MD5 Message-Digest Algorithm [Online]. Available from : http://tools.ietf.org/html/rfc1321 [2013, September 5]

[17] Secure Hash Standard (SHS). FIPS Publication 180-4, Secure Hash Standard (SHS) [Online]. Available from : http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips180-4/fips-180-4.pdf [2013, September 5]

[18] Denso Wave. QRcode.com [Online]. Available from: http://www.qrcode.com/en/ [2013, September 5]

[19] Yue, L., Ju Y. and Mingjun, L., Recognition of QR Code with Mobile Phone, Chinese Control and Decision Conference. pp.203-206, July 2008.

[20] Jiejing, Z. Yunfei, L., Peng, L., Research on Binarization of QR Code Image, International Conference on Multimedia Technology . pp. 1-4, Octorber 2010.

[21] Gang, X., Renzhe, L., Lu, Y., Xiaochen, L. , Identification and Recovery of the Blurred QR Code Image, International Conference on Computer Science and Service System. pp.2257-2260, August 2012.

[22] Kris Antoni, H., Nurwono, Raymondus, K., Color Quick Response Code for Mobile Content Distribution, The 7th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia. pp.267-271, December 2009

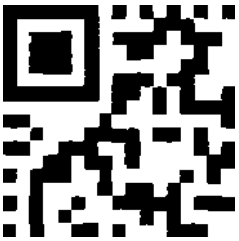
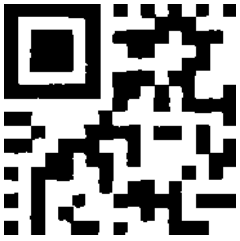
[23] Max E. Vizcarra, M., Alexandre, Z., Bruno, M., Anderson C. A., N., CQR CODES: COLORED QUICK-RESPONSE CODES, IEEE Second International Conference on Consumer Electronics - Berlin. pp.321-325, September 2012.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แสดงผลการทดลองเพิ่มเติม

ตาราง ก.1 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 5 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>12.817 Ms</td><td>NCC</td><td>0.985</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td colspan="2">Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td colspan="2">  </td><td>  </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td colspan="2">23.695 Ms.</td><td>32.842 Ms.</td><td colspan="2">29.162 Ms.</td></tr>
</table>

ตาราง ก.2 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 6 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>14.874 Ms</td><td>NCC</td><td>0.983</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>26.187 Ms.</td><td colspan="2">24.517 Ms.</td><td colspan="2">21.133 Ms.</td></tr>
</table>

ตาราง ก.3 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 7 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>15.802 Ms</td><td>NCC</td><td>0.989</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>26.459 Ms.</td><td colspan="2">23.419 Ms.</td><td colspan="2">28.898 Ms.</td></tr>
</table>

ตาราง ก.4 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 8 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>13.797 Ms</td><td>NCC</td><td>0.983</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>23.808 Ms.</td><td colspan="2">20.243 Ms.</td><td colspan="2">22.244 Ms.</td></tr>
</table>

ตาราง ก.5 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 9 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>13.764 Ms</td><td>NCC</td><td>0.987</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>19.707 Ms.</td><td colspan="2">16.966 Ms.</td><td colspan="2">77.775 Ms.</td></tr>
</table>

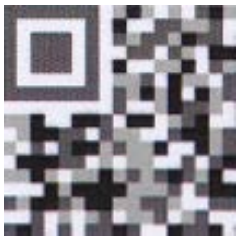
ตาราง ก.6 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 10 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>12.411 Ms</td><td>NCC</td><td>0.985</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>33.105 Ms.</td><td colspan="2">16.948 Ms.</td><td colspan="2">16.750 Ms.</td></tr>
</table>

ตาราง ก.7 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 11 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>9.018 Ms</td><td>NCC</td><td>0.989</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>12.376 Ms.</td><td colspan="2">17.161 Ms.</td><td colspan="2">15.124 Ms.</td></tr>
</table>

ตาราง ก.8 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 12 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>83.653 Ms</td><td>NCC</td><td>0.986</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>13.466 Ms.</td><td colspan="2">13.552 Ms.</td><td colspan="2">11.636 Ms.</td></tr>
</table>

ตาราง ก.9 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 13 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>11.603 Ms</td><td>NCC</td><td>0.986</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>9.158 Ms.</td><td colspan="2">13.182 Ms.</td><td colspan="2">11.108 Ms.</td></tr>
</table>

ตาราง ก.10 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 14 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>14.329 Ms</td><td>NCC</td><td>0.969</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>20.589 Ms.</td><td colspan="2">9.569 Ms.</td><td colspan="2">13.051 Ms.</td></tr>
</table>

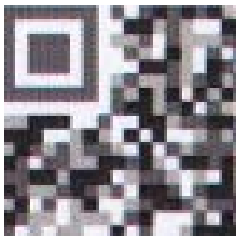
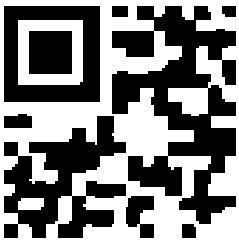
ตาราง ก.11 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 15 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>15.201 Ms</td><td>NCC</td><td>0.962</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>13.547 Ms.</td><td colspan="2">14.850 Ms.</td><td colspan="2">18.240 Ms.</td></tr>
</table>

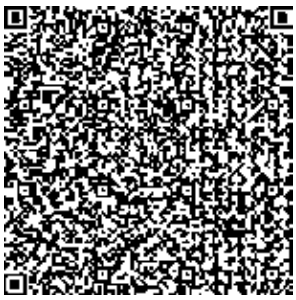
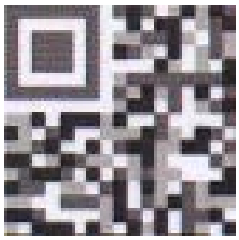
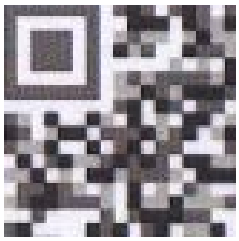
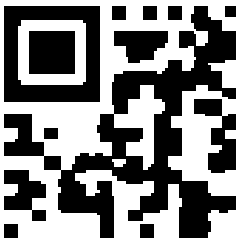
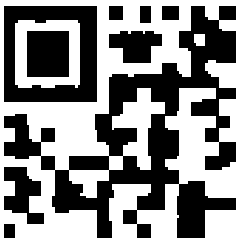
ตาราง ก.12 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 16 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>10.414 Ms</td><td>NCC</td><td>0.983</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>14.103 Ms.</td><td colspan="2">12.255 Ms.</td><td colspan="2">71.623 Ms.</td></tr>
</table>

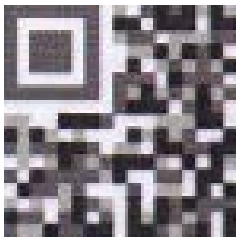
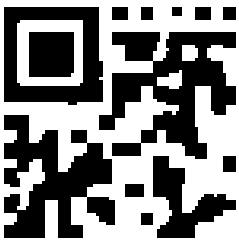
ตาราง ก.13 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 17 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>12.251 Ms</td><td>NCC</td><td>0.980</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td>  </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>11.275 Ms.</td><td colspan="2">9.954 Ms.</td><td colspan="2">15.161 Ms.</td></tr>
</table>

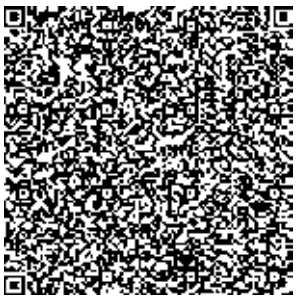
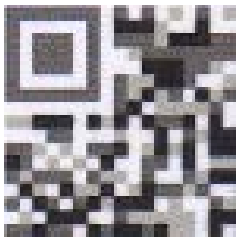
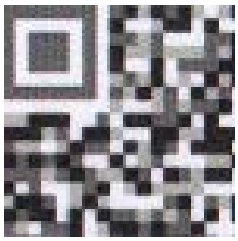
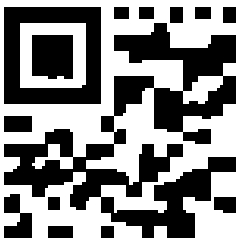
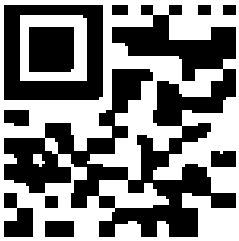
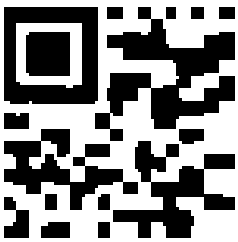
ตาราง ก.14 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 18 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>15.025 Ms</td><td>NCC</td><td>0.973</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td>  </td><td colspan="2">  </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td>  </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>8.880 Ms.</td><td colspan="2">8.846 Ms.</td><td colspan="2">9.515 Ms.</td></tr>
</table>

ตาราง ก.15 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 19 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>17/042 Ms</td><td>NCC</td><td>0.988</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td>  </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td>  </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>12.564 Ms.</td><td colspan="2">9.907 Ms.</td><td colspan="2">11.828 Ms.</td></tr>
</table>

ตาราง ก.16 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 20 โดยการใช้เครื่องสแกนเนอร์

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td colspan="2">Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td colspan="3">Decoding Process's Time</td><td>15.037 Ms</td><td>NCC</td><td>0.989</td></tr>
<tr><td colspan="6">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td colspan="2">Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td>  </td><td colspan="2"> </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td>  </td><td colspan="2">  </td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>Decoding Process's Time</td><td>10.618 Ms.</td><td colspan="2">4.811 Ms.</td><td colspan="2">8.891 Ms.</td></tr>
</table>

ตาราง ก.17 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 5 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="4">NCC</td><td>0.969</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

ตาราง ก.18 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 6 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="4">NCC</td><td>0.974</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

ตาราง ก.19 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 7 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="4">NCC</td><td>0.960</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

ตาราง ก.20 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 8 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

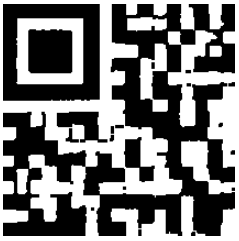
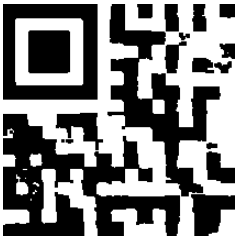
<table>
<tr><td>Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td>0.966</td></tr>
<tr><td colspan="4">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td>Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td>True</td></tr>
</table>

ตาราง ก.21 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 9 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

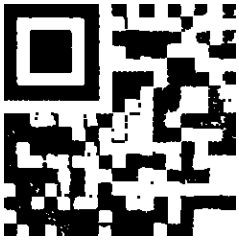
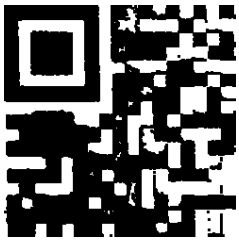
Input Image	Original Image	Binary Image
NCC		0.963
Micro QR Code		

	Top Left	Top Right	Bottom Left
Region of Interest			
Binary Image			
Decoding Success	True	False	True

ตาราง ก.22 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 10 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

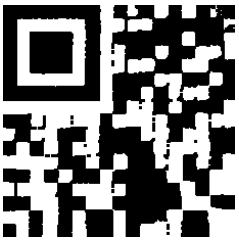
<table>
<tr><td>Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td>0.962</td></tr>
<tr><td colspan="4">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td>Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td>  </td><td>  </td><td> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td>True</td></tr>
</table>

ตาราง ก.23 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 11 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td>0.967</td></tr>
<tr><td colspan="4">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td>Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td>False</td></tr>
</table>

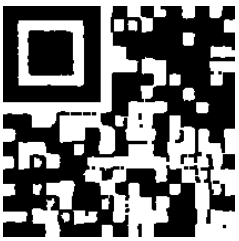
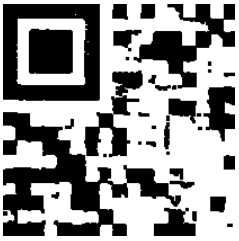
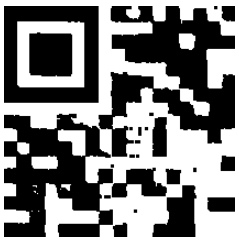
ตาราง ก.24 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 12 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

Input Image	Original Image	Binary Image
NCC		0.962
Micro QR Code		

	Top Left	Top Right	Bottom Left
Region of Interest			
Binary Image			
Decoding Success	True	False	True

ตาราง ก.25 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 13 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

Input Image	Original Image	Binary Image
NCC		0.985
Micro QR Code		

	Top Left	Top Right	Bottom Left
Region of Interest			
Binary Image			
Decoding Success	True	False	True

ตาราง ก.26 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 14 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

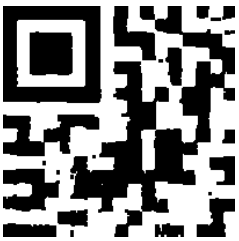
Input Image	Original Image	Binary Image
NCC		0.955
Micro QR Code		

	Top Left	Top Right	Bottom Left
Region of Interest			
Binary Image			
Decoding Success	True	False	True

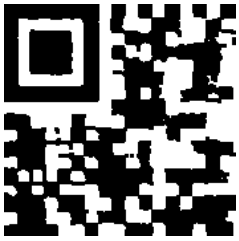
ตาราง ก.27 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 15 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="4">NCC</td><td>0.961</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

ตาราง ก.28 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 16 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td colspan="2">Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td colspan="2"> </td><td colspan="2"> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="4">NCC</td><td>0.955</td></tr>
<tr><td colspan="5">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td colspan="2">Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td>  </td><td> </td><td colspan="2"> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>False</td><td colspan="2">True</td></tr>
</table>

ตาราง ก.29 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 17 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td>0.954</td></tr>
<tr><td colspan="4">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td>Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td>  </td><td> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td>False</td></tr>
</table>

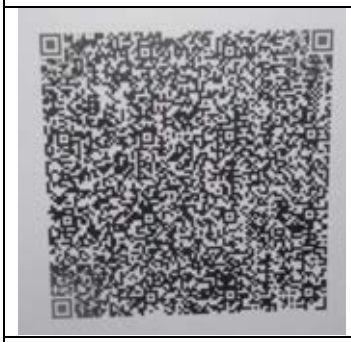
ตาราง ก.30 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 18 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>Input Image</td><td>Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="2">NCC</td><td>0.980</td></tr>
<tr><td colspan="3">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td>Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>False</td><td>True</td></tr>
</table>

ตาราง ก.31 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 19 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

<table>
<tr><td>Input Image</td><td colspan="2">Original Image</td><td>Binary Image</td></tr>
<tr><td> </td><td colspan="2"> </td><td> </td></tr>
<tr><td colspan="3">NCC</td><td>0.966</td></tr>
<tr><td colspan="4">Micro QR Code</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Region of Interest</td><td>Top Left</td><td>Top Right</td><td>Bottom Left</td></tr>
<tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>Binary Image</td><td> </td><td> </td><td> </td></tr>
<tr><td>Decoding Success</td><td>True</td><td>True</td><td>False</td></tr>
</table>

ตาราง ก.32 ตัวอย่างผลลัพธ์ภาพ QR Code เวอร์ชั่น 20 โดยการใช้กล้องดิจิทัล

Input Image	Original Image	Binary Image
		
NCC		0.982
Micro QR Code		

	Top Left	Top Right	Bottom Left
Region of Interest			
Binary Image			
Decoding Success	True	True	True

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ร้อยโทธานี วิพุทธิกุล เกิดเมื่อวันที่ 28 สิงหาคม พ.ศ. 2528 เกิดที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ในปีการศึกษา 2551 เมื่อจบการศึกษาได้เข้ารับราชการในตำแหน่ง ประจำแผนกจัดการและพัฒนาระบบ ศูนย์ข้อมูลทางแผนที่ กรมแผนที่ทหาร จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาปลายปีการศึกษา 2554