การพัฒนาคิวอาร์โค้ดสีเพื่อเพิ่มความจุข้อมูล

นางสาวนุชนารถ ทวีรัตน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF COLOR QR CODE FOR INCREASING CAPACITY

Miss Nutchanad Taveerad

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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาคิวอาร์โค้ดสีเพื่อเพิ่มความจุข้อมูล
โดย	นางสาวนุชนารถ ทวีรัตน์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สาธิต วงศ์ประทีป

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ มัณฑนา ปราการสมุทร)

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

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

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. มหศักดิ์ เกตุฉ่ำ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นุชนารถ ทวีรัตน์ : การพัฒนาคิวอาร์โค้ดสีเพื่อเพิ่มความจุข้อมูล (DEVELOPMENT OF COLOR QR CODE FOR INCREASING CAPACITY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สาธิต วงศ์ประทีป, 114 หน้า.

บาร์โค้ดได้รับความนิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย นักพัฒนาจึงพัฒนากระบวนการเข้ารหัสบาร์โค้ดออกมาหลากหลายรูปแบบ แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือบาร์โค้ด 1 มิติ (เก็บข้อมูลในแนวนอน) และบาร์โค้ด 2 มิติ (เก็บข้อมูลได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน) แต่ปัจจุบันข้อมูลที่นำมาเข้ารหัสบาร์โค้ดแบบต่างๆ นั้น ยังมีปริมาณจำกัด

งานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้ QR Code (บาร์โค้ด 2 มิติ) เนื่องจากเก็บข้อมูลได้หลายชนิด การถอดรหัสทำได้ง่ายและโครงสร้างถูกกำหนดมาตรฐานจากผู้พัฒนาอย่างชัดเจน เพื่อพัฒนากระบวนการเข้ารหัสให้เก็บข้อมูลได้มากขึ้น โดยนำเสนอแนวคิดการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดแบบสีเพื่อเพิ่มความจุข้อมูลให้มากขึ้นเมื่อเทียบกับคิวอาร์โค้ดแบบขาวดำในขนาดเท่ากัน โดยคิวอาร์โค้ดที่เข้ารหัสมีจำนวนสีที่แตกต่างกัน 16 สี สามารถเก็บข้อมูลได้ 4 บิทต่อโมดูล ซึ่งมากกว่าคิวอาร์โค้ดแบบขาวดำ ที่เก็บข้อมูลได้เพียง 1 บิทต่อโมดูล ถึง 4 เท่าและอุปกรณ์ที่ใช้ถอดรหัสคิวอาร์โค้ดแบบสี มีค่าความละเอียดกล้อง ไม่น้อยกว่า 8 ล้านพิกเซล ถอดรหัสโดยแอพพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

5571018921 : MAJOR COMPUTER SCIENCE
KEYWORDS: TWO-DIMENSIONAL BARCODE, QR CODE, COLOR QR CODE, QUICK RESPONSE CODE, HSV COLOR MODEL.

NUTCHANAD TAVEERAD: DEVELOPMENT OF COLOR QR CODE FOR INCREASING CAPACITY. ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. SARTID VONGPRADHIP, 114 pp.

Barcodes have been widely popular. Their has encouraged an ongoing invention of decoding methods. Barcodes can be categorized into 2 main groups, namely one-dimension (1D) barcodes at which information is stored horizontally and two-dimension (2D) barcodes which contain information in both vertical and horizontal direction, promising a higher storage capacity compared to 1D barcodes. Despite high data density, an amount of information obtained in 2D barcodes still limited to some extent.

This study selected QR Code (Quick Response Code) is a type of 2D barcode because firstly, it can handle a variety of information. Secondly, decoding is reasonably straightforward. Finally, the structure of QR code is specified clearly by its developer. This research aimed to increase QR Code capacity by proposing a color Quick Response Code (color QR code) encoding concept which can hold a larger amount of information than that of the traditional black and white QR Code regarding their physical size. A two-color (black and white) QR Code can store 1 bit in each module only, whereas a module of a color QR code with sixteen different colors can contain 4-bit data. In order to decode a color QR code, this study used a code reader equipped with at least an 8-megapixel camera and a decoding application was developed on Android (Android application on mobile phone) and Java (Java application on PC) platform.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department:	Computer Engineering	Student's Signature	.....
Field of Study:	Computer Science	Advisor's Signature	.....
Academic Year:	2015		

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต วงศ์ประทีป ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาดูแลการวิจัย ให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนให้การสนับสนุนเป็นอย่างดี จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านเป็นอย่างสูง ได้แก่ รองศาสตราจารย์ มัณฑนา ปราการสมุทร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ทองทักษ์ และ ดร.มหศักดิ์ เกตุฉ่ำ ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบ วิจารย์ผลงาน ให้คำแนะนำปรับปรุงงาน รวมถึงคำแนะนำในการส่งผลงานเข้านำเสนอในงานประชุมวิชาการ ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านเป็นอย่างสูงที่ให้ข้อคิดและแนวทางการวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่านที่ให้การช่วยเหลือ อำนวยความสะดวก ตลอดจนเพื่อน ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย ท้ายที่สุด ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ-คุณแม่ และญาติ ๆ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา และขอบคุณท่านอื่น ๆ ที่มิได้กล่าวชื่อไว้ ณ ที่นี้ที่มีส่วนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

บทที่ 1 บทนำ.....6

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....6

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....6

1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....6

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....7

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....7

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....7

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....8

2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับบาร์โค้ด.....8

2.1.1 บาร์โค้ด 1 มิติ (1 Dimension Barcode).....8

2.1.2 บาร์โค้ด 2 มิติ (2 Dimension Barcode).....9

2.1.2.1 บาร์โค้ดแบบสแต็ก (Stacked Barcode).....9

2.1.2.2 บาร์โค้ดประเภทเมตริกซ์ (Matrix Barcode).....10

2.1.2.3 ประโยชน์ของบาร์โค้ด 2 มิติ.....11

2.2 คิวอาร์โค้ด (QR Code).....11

2.3 กระบวนการเข้ารหัส QR Code.....16

2.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูล Input.....16

2.3.2 การเข้ารหัสข้อมูล (Data encoding).....18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.3.3 Error Correction Coding 19
2.3.4 การเตรียม Structure final message 19
2.3.5 ขั้นตอน Module placement in matrix 20
2.3.6 ขั้นตอนการวาง Data masking 21
2.3.7 ขั้นตอนการวาง Format information และ Version information 23
2.4 ขั้นตอนในการถอดรหัส QR Code 26
2.4.1 ทำการแปลงภาพที่นำเข้าโดยการแปลงเป็นภาพขาวดำ 27
2.4.2 ทำการค้นหา Finder Pattern 27
2.4.3 ทำการพิจารณาตำแหน่งการหมุน 27
2.4.4 พิจารณาระยะทางของ D 27
2.4.5 ทำการคำนวณหาค่า Nominal X Dimension 28
2.4.6 สมการที่ใช้ในการคำนวณ Version (V) 28
2.4.7 เงื่อนไขการคำนวณ Version 28
2.4.8 การคำนวณสำหรับ Version 1 29
2.4.9 Global Threshold พื้นที่ตัวอย่าง 32
2.4.10 ทำการถอดรหัส Format information 32
2.4.11 ในกรณีที่ Format information 32
2.4.12 ทำการ XOR ส่วนของ Data Mask Pattern 32
2.4.13 ทำการพิจารณาสัญลักษณ์ของ Codewords 32
2.4.14 ทำการจัดลำดับของ Codeword 32
2.4.15 ทำการตรวจหาข้อผิดพลาด 33
2.4.16 ทำการ Restore ข้อมูลต้นฉบับ 33
2.4.17 ทำการแบ่ง Data bit stream 33

หน้า

2.4.18 ทำการถอดรหัส....33
2.5 พื้นฐานการประมวลผลภาพดิจิตอล....33
2.5.1 รูปแบบของภาพดิจิตอล....33
2.5.2 กระบวนการในการสร้างภาพดิจิตอล....34
2.5.3 คุณสมบัติของสี....37
2.5.4 แบบจำลองสี (Color Models)....37
2.5.5 การแปลงค่าสีจากแบบจำลองสี RGB ไปแบบจำลองสี HSV....41
2.5.6 การแปลงค่าสีจากแบบจำลองสี HSV ไปแบบจำลองสี RGB....43
2.6 ประเภทของการประมวลผลภาพ (Image processing)....44
2.6.1 การกระทำกับจุดของภาพ (Point Processing)....44
2.6.2 การกระทำกับภาพเฉพาะส่วน (Local Processing)....44
2.6.3 การกระทำกับภาพทั้งหมด (Global Processing)....46
2.6.3.1 การหาค่าเทรสโชลด์หนึ่งระดับ (Single Thresholding)....47
2.6.3.2 การหาค่าเทรสโชลด์หลายระดับ (Multilevel Thresholding)....48
2.7 การแปลงข้อมูลภาพสองมิติ (Two Dimension Geomatric Transformation)....48
2.7.1 การเลื่อนจุดพิกัดภาพ (Translation)....49
2.7.2 การหมุนภาพ (Rotation)....49
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....50
2.8.1 High Capacity Colored Two Dimensional Codes....50
2.8.2 CQR CODES: COLORED QUICK-RESPONSE CODES....50
2.8.3 PERFORMANCE OF A COLOR 2D BARCODE AS A PERVASIVE COMPUTING TOOL....52
2.8.4 The Use of Alignment Cells in MMCC Barcode....53

2.8.5 A PROCESS TO REMOVE SCRATCHES FROM QR CODE IMAGES 53

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 54

3.1 ภาพรวมของงานวิจัย 54

3.1.1 การเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 54

3.1.2 การถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 57

3.2 แนวทางการออกแบบคิวอาร์โค้ดสี 58

3.2.1 การเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 58

3.2.2 การถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี 64

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง 67

4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 67

4.1.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware) ที่ใช้ในงานวิจัย 67

4.1.2 ซอฟต์แวร์ (Software) ที่ใช้ในงานวิจัย 67

4.1.3 คิวอาร์โค้ดสีที่พัฒนาขึ้น 68

4.2 ผลการทดลอง 69

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 105

5.1 สรุปผลการวิจัย 105

5.1.1 การเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 105

5.1.2 การถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี 105

5.2 ข้อเสนอแนะ 106

รายการอ้างอิง 108

ภาคผนวก 111

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 114

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 แสดงความจุของ QR Code แบ่งตามประเภทข้อมูล 13

ตารางที่ 2-2 Mode Indicators ของ QR Code 16

ตารางที่ 2-3 แสดงเวอร์ชันและความจุของ QR Code ในแต่ละเวอร์ชัน 17

ตารางที่ 2-4 จำนวนบิต Character Count Indicator ของ QR Code 19

ตารางที่ 2-5 แสดงระดับ Error correcting ใน QR Code 19

ตารางที่ 2-6 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการเลือก Data Masking 22

ตารางที่ 2-7 Binary indicator ของ Error Correction Level ใน QR Code 23

ตารางที่ 2-8 แสดงค่าระดับสีใน HSV color model 41

ตารางที่ 2-9 แสดงผลการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี 52

ตารางที่ 3-1 ค่าความจุข้อมูลสูงสุดของข้อมูลแต่ละประเภทที่นำมาเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 55

ตารางที่ 3-2 แสดงรหัสประเภทข้อมูล 55

ตารางที่ 3-3 การกำหนดค่าข้อมูลกับค่าสี 8 สี โดยใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 6 สี 60

ตารางที่ 3-4 การกำหนดค่าข้อมูลกับค่าสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 14 สี 61

ตารางที่ 3-5 การกำหนดค่าข้อมูลกับค่าสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทาจำนวน 2 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 12 สี 62

ตารางที่ 3-6 การกำหนดค่าข้อมูลกับค่าสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทาจำนวน 4 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 10 สี 63

ตารางที่ 3-7 การแปลงค่าสีเป็นข้อมูลเลขฐาน 8 และแปลงข้อมูลเลขฐาน 8 เป็นข้อมูลไบนารี 66

ตารางที่ 4-1 แสดงคิวอาร์โค้ดสีที่พัฒนาขึ้น 68

ตารางที่ 4-2 แสดงภาพคิวอาร์โค้ด 8 สีและค่ารหัสสีที่ถูกต้อง 69

ตารางที่ 4-3 แสดงผลการถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 8 สี 70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-4 แสดงภาพคิวอาร์โค้ด 16 สีและค่ารหัสสีที่ถูกต้อง.....77

ตารางที่ 4-5 แสดงผลการถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี 78

ตารางที่ 4-6 ค่าข้อมูลเลขฐาน 16 กับค่าสี 16 สี.....86

ตารางที่ 4-7 แสดงภาพคิวอาร์โค้ด 16 สี (ใช้สีเทา 2 สี) และค่ารหัสสีที่ถูกต้อง.....86

ตารางที่ 4-8 แสดงผลการถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี (ใช้สีเทา 2 สี).....87

ตารางที่ 4-9 ค่าข้อมูลเลขฐาน 16 กับค่าสี 16 สี.....95

ตารางที่ 4-10 แสดงภาพคิวอาร์โค้ด 16 สี (ใช้สีเทา 4 สี) และค่ารหัสสีที่ถูกต้อง.....95

ตารางที่ 4-11 แสดงผลการถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี (ใช้สีเทา 4 สี) 96

ตารางที่ 4-12 ค่าข้อมูลเลขฐาน 16 กับค่าสี 16 สี..... 104

ตารางที่ 5-1 แสดงค่าความจุข้อมูลของคิวอาร์โค้ดสีที่เข้ารหัสด้วยจำนวนสีต่างกัน..... 105

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1 บาร์โค้ดแบบ 1 มิติ....8
ภาพที่ 2-2 ตัวอย่างบาร์โค้ด 2 มิติ....9
ภาพที่ 2-3 ตัวอย่างบาร์โค้ดแบบสแต็ก PDF417....9
ภาพที่ 2-4 ตัวอย่างบาร์โค้ด 2 มิติ และตำแหน่งของ Finder Pattern....10
ภาพที่ 2-5 การถอดรหัส QR Code โดยใช้โทรศัพท์มือถือ....12
ภาพที่ 2-6 ตัวอย่างการใช้ QR Code ในบริการ Favorite Place....12
ภาพที่ 2-7 จำนวนของโมดูลใน QR Code Version 1 และ Version 2....13
ภาพที่ 2-8 แสดงคุณสมบัติ Reversed reflectances ของ QR Code ที่สามารถถอดรหัสได้....14
ภาพที่ 2-9 โครงสร้างของ QR Code ตามมาตรฐานสัญลักษณ์ QR Code 2005....14
ภาพที่ 2-10 โครงสร้างของ Finder Pattern ใน QR Code....15
ภาพที่ 2-11 แสดงรูปแบบการวาง Data Codeword และ Error correction codewords....20
ภาพที่ 2-12 ก) ทิศทางการวางข้อมูลในทิศทางขึ้นและ ข) ทิศทางลง....20
ภาพที่ 2-13 ตัวอย่างทิศทางการวางในรูปแบบปกติและรูปแบบไม่ปกติ....21
ภาพที่ 2-14 ตัวอย่างการวางบิตในจุดที่ใกล้เคียงกับ Alignment pattern....21
ภาพที่ 2-15 แผนภาพขั้นตอนการทำ Data masking [3]....21
ภาพที่ 2-16 รูปแบบ Data mask pattern ทั้งหมด [3]....23
ภาพที่ 2-17 ตำแหน่งการวาง Format information....24
ภาพที่ 2-18 ตำแหน่งของ Version information....25
ภาพที่ 2-19 ทิศทางการวาง Version information....26
ภาพที่ 2-20 แสดงแผนผังการถอดรหัส QR Code....26
ภาพที่ 2-21 การสแกนไลน์ ใน Finder Pattern....27
ภาพที่ 2-22 แสดง Finder Pattern ที่อยู่ด้านบนของ QR Code....28

ภาพที่ 2-23 ตำแหน่งของ Finder pattern และ Version information 29

ภาพที่ 2-24 ตำแหน่งของ Finder patterns และAlignment pattern ในการ Sampling grids 30

ภาพที่ 2-25 จุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern 30

ภาพที่ 2-26 สัญลักษณ์ด้านบนซ้ายของ QR Code 31

ภาพที่ 2-27 สัญลักษณ์ในบริเวณขวาล่างของ QR Code 32

ภาพที่ 2-28 ตัวอย่างรูปภาพในรูปแบบ Bitmap และVector 34

ภาพที่ 2-29 ตัวอย่างการทำ Image Sampling 35

ภาพที่ 2-30 ภาพที่ได้จากอัตราการสุ่มที่แตกต่างกัน 35

ภาพที่ 2-31 ภาพในระดับเทาที่มีค่าตั้งแต่ 0 -255 36

ภาพที่ 2-32 ภาพที่มีระดับเทา 8 bits 4 bits 2 bits และ 1 bit 36

ภาพที่ 2-33 ค่าความยาวของคลื่นสีที่ตามนุษย์สามารถมองเห็น 37

ภาพที่ 2-34 มุมสีดำในแบบจำลองสี RGB 38

ภาพที่ 2-35 มุมสีขาวในแบบจำลองสี RGB 38

ภาพที่ 2-36 แบบจำลองสี HSV 39

ภาพที่ 2-37 แสดงภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับค่า HSV 40

ภาพที่ 2-38 HSV Curve 40

ภาพที่ 2-39 ตัวอย่างภาพในแบบจำลองสี RGB และ แบบจำลองสี HSV 42

ภาพที่ 2-40 การกระทำต่อจุดภาพ (Point Processing) 44

ภาพที่ 2-41 การกระทำกับภาพเฉพาะส่วน (Local Processing) 45

ภาพที่ 2-42 แสดงการทำ Zero Padding 46

ภาพที่ 2-43 การเลือกค่าเทรสโชลด์จากภาพฮิสโตรแกรม 47

ภาพที่ 2-44 ภาพผลลัพธ์จาก Single Thresholding และ Multilevel Thresholding 48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 2-45 การหมุนภาพจากจุดกำเนิด 49

ภาพที่ 2-46 คิวอาร์โค้ดสีขนาด 1.3 cm × 1.3 cm 51

ภาพที่ 2-47 แสดงการคำนวนค่า Threshold 52

ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 54

ภาพที่ 3-2 ทิศทางการเรียงข้อมูลลงในโมดูลคิวอาร์โค้ด 56

ภาพที่ 3-3 ขั้นตอนการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี 57

ภาพที่ 3-4 แสดงตำแหน่ง Function patterns ของคิวอาร์โค้ด 57

ภาพที่ 3-5 คิวอาร์โค้ดสี 8 สี โดยใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 6 สี 60

ภาพที่ 3-6 คิวอาร์โค้ดสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 14 สี 61

ภาพที่ 3-7 คิวอาร์โค้ดสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทาจำนวน 2 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 12 สี 62

ภาพที่ 3-8 คิวอาร์โค้ดสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทาจำนวน 4 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 10 สี 63

ภาพที่ 4-1 คิวอาร์โค้ดสี 8 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 6 สี 77

ภาพที่ 4-2 คิวอาร์โค้ดสี 16 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 14 สี 85

ภาพที่ 4-3 ผลการทดลองลำดับที่ 6 (ก) ภาพคิวอาร์โค้ดสี (ข) ผลการถอดรหัส 85

ภาพที่ 4-4 คิวอาร์โค้ดสี 16 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ โทนสีเทา 2 สีและโทนสีอื่นๆ จำนวน 12 สี 94

ภาพที่ 4-5 ผลการทดลองลำดับที่ 13 (ก) ภาพคิวอาร์โค้ดสี (ข) ผลการถอดรหัส 94

ภาพที่ 4-6 คิวอาร์โค้ดสี 16 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ โทนสีเทา 4 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 10 สี 103

ภาพที่ 4-7 ผลการทดลองลำดับที่ 1 (ก) ภาพคิวอาร์โค้ดสี (ข) ผลการถอดรหัส 103

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คิวอาร์โค้ดเป็นบาร์โค้ดประเภท 2 มิติ ถูกคิดค้นขึ้นในปี 1994 โดยบริษัท DENSO WAVE INCORPORATED คิวอาร์โค้ดเป็นบาร์โค้ด ในระบบ data matrix เก็บข้อมูลได้ทั้งตัวอักษรและตัวเลข ประกอบด้วยข้อมูลทั้งแนวตั้งและแนวนอน เป็นผลให้ คิวอาร์โค้ดเก็บข้อมูลได้มากกว่า บาร์โค้ด 1 มิติ ซึ่งเก็บข้อมูลได้ในแนวนอนเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ คิวอาร์โค้ดจึงสามารถเก็บข้อมูลชนิดตัวอักษรได้กว่า 100 เท่าของบาร์โค้ด 1 มิติ ทั้งยังสามารถอ่านได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว และสามารถพิมพ์ คิวอาร์โค้ดเพื่อใช้ในพื้นที่ขนาดเล็กมากๆได้ คิวอาร์โค้ดจึงได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับในระดับสากล คิวอาร์โค้ดถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย โดยนำเสนอข้อมูลจากการอ่านคิวอาร์โค้ดผ่านอุปกรณ์เครื่องมือสื่อสาร หรือกระทั่งผู้ใช้สามารถสร้างคิวอาร์โค้ดได้เองผ่านเว็บไซต์ ผู้ให้บริการ คิวอาร์โค้ดสามารถบรรจุข้อมูลได้หลายรูปแบบ เช่น Kanji Characters, Kana Characters, Hiragana Characters, Symbols และ Control Code แม้ว่าคิวอาร์โค้ดจะเก็บข้อมูลได้มากกว่าบาร์โค้ดแบบอื่นๆ ที่มีขนาดเท่ากัน แต่ปัจจุบันจำนวนข้อมูลที่สามารถเก็บลงคิวอาร์โค้ด ได้นั้นยังมีจำนวนจำกัด ความจุข้อมูลของคิวอาร์โค้ดขึ้นอยู่กับเวอร์ชัน ปัจจุบันเวอร์ชันของคิวอาร์โค้ดเริ่มต้นที่เวอร์ชัน 1 (21 x 21 โมดูล) และสูงสุดที่เวอร์ชัน 40 (177 x 177 โมดูล) แต่ละเวอร์ชันมีจำนวนโมดูลที่แตกต่างกัน ในคิวอาร์โค้ดเวอร์ชันสูงขึ้นสามารถจุข้อมูลได้มากขึ้น ปริมาณโมดูล ที่ประกอบกันเป็นคิวอาร์โค้ดมีจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้คิวอาร์โค้ดมีขนาดใหญ่มากยิ่งขึ้นตามลำดับ งานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอแนวคิดการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดแบบสีเพื่อเพิ่มความจุข้อมูลให้มากขึ้น เมื่อเทียบกับคิวอาร์โค้ด ขาวดำในขนาดเท่ากัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสร้างและอ่านคิวอาร์โค้ดสีเพื่อเพิ่มความจุข้อมูล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. สามารถสร้างคิวอาร์โค้ดสี แสดงบนจอภาพความละเอียดไม่ต่ำกว่า 1366 x 768 พิกเซล และพิมพ์บนกระดาษความละเอียดไม่ต่ำกว่า 4,800 x 1,200 จุดต่อตารางนิ้ว
2. เลือกสีที่เหมาะสมในการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ด โดยมีจำนวนสีแตกต่างกัน ไม่ต่ำกว่า 8 สี และสูงสุดไม่เกิน 16 สี
3. สามารถถอดรหัสได้ในที่มีแสงเพียงพอ
4. การถอดรหัส ความละเอียดกล้องต้องไม่ต่ำกว่า 8 ล้านพิกเซล
5. ทดสอบประสิทธิภาพของระบบเฉพาะเรื่องความจุข้อมูล
6. พัฒนาโปรแกรมถอดรหัส บนระบบแอนดรอยด์

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ภาพคิวอาร์โค้ดสีเป็นไฟล์นามสกุล PNG
2. ภาพคิวอาร์โค้ดสีเป็นคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 1
3. การถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสีทดลองขณะมีแสงสว่างเพียงพอเท่านั้น
4. การทดลองถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี ทำขณะภาพคิวอาร์โค้ดมีสภาพสมบูรณ์ ไม่ชำรุด ไม่มีรอยขีดข่วน
5. เวลาในการประมวลผล (Process Time) หมายถึง ระยะเวลาระหว่างการนำเข้าภาพ ถึงขั้นตอนสุดท้ายที่ได้ผลลัพธ์ที่พร้อมสำหรับการถอดรหัส
6. เวลาในการถอดรหัส (Decoding Time) หมายถึง เวลาที่ถอดรหัส QR Code โดยใช้ Zxing Library

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับคิวอาร์โค้ด
2. ได้แนวทางในการพัฒนาคิวอาร์โค้ดสี ด้านการเลือกใช้สีที่เหมาะสม
3. ได้คิวอาร์โค้ดสี ที่มีความจุเพิ่มขึ้น

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎี หลักการพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาการเข้ารหัสและการถอดรหัสบาร์โค้ด 2 มิติ การประมวลผลภาพ และการอ่านค่าสีจากระบบสีต่างๆ
3. ออกแบบและนำเสนอการออกแบบ เข้ารหัส และถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี
4. รวบรวมข้อมูลจากการทดลองและออกแบบ
5. ทดสอบและปรับปรุงวิธีการที่นำเสนอ
6. วิเคราะห์ผลการทดลองสรุปผลและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้ประกอบด้วย ทฤษฎีที่เกี่ยวกับบาร์โค้ด และการประมวลผลภาพดิจิตอล โดยนำเสนอข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับบาร์โค้ด โครงสร้างส่วนประกอบของคิวอาร์โค้ด ขั้นตอนการเข้ารหัสและถอดรหัสคิวอาร์โค้ด พื้นฐานการประมวลผลภาพดิจิตอล แบบจำลองสี RGB และแบบจำลองสี HSV การแปลงแบบจำลองสี RGB ไปยัง HSV และการประมวลผลภาพเบื้องต้น ตามลำดับ

2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับบาร์โค้ด

ปัจจุบันบาร์โค้ดถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในหลากหลายรูปแบบ ทั้งในด้านการขนส่งเอกสารหรือพัสดุ คลังสินค้า ตั๋วโดยสาร ป้ายโฆษณา แอพพลิเคชันต่างๆ และที่พบเห็นได้บ่อยที่สุดคือบนบรรจุภัณฑ์ของสินค้า โดยบาร์โค้ดที่อยู่บนบรรจุภัณฑ์สินค้า จะเก็บเพียงรหัสสินค้านั้นๆ และเมื่อต้องการนำข้อมูลในบาร์โค้ดไปใช้ เช่น ต้องการทราบข้อมูลรหัสสินค้า ขณะลูกค้าต้องการทราบราคาสินค้าหรือต้องการชำระเงิน จะต้องทำการสแกนบาร์โค้ดโดยใช้เครื่องอ่านบาร์โค้ด จากนั้นเครื่องอ่านบาร์โค้ดจะส่งข้อมูลที่สแกนและถอดรหัสได้ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย เพื่อประมวลผลร่วมกับฐานข้อมูลคลังสินค้า เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ต้องการและนำไปใช้ในลำดับถัดไป จะเห็นได้ว่าการค้นหาข้อมูลสินค้านั้นไม่จำเป็นต้องพิมพ์รหัสสินค้าเพื่อสืบค้นราคาเพียงแต่สแกนบาร์โค้ด ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวช่วยประหยัดเวลาในการทำงานอย่างมาก ซึ่งบาร์โค้ดที่พบเห็นทั่วไปบนบรรจุภัณฑ์สินค้าส่วนใหญ่เป็นบาร์โค้ด 1 มิติ (One Dimension Barcode)

2.1.1 บาร์โค้ด 1 มิติ (1 Dimension Barcode)

บาร์โค้ด 1 มิติมีลักษณะเป็นแถบประกอบด้วยเส้นสีดำสลับกับเส้นสีขาว ใช้แทนรหัสตัวเลขหรือตัวอักษรโดยสามารถบรรจุข้อมูลได้ประมาณ 20 ตัวอักษร บาร์โค้ด 1 มิติ มีหลายชนิด เช่น UPC (Universal Product Code), EAN (European Article Number) และ ISBN (International Standard Book Number) ดังภาพที่ 2-1

ภาพที่ 2-1 บาร์โค้ดแบบ 1 มิติ

บาร์โค้ด ISBN จะพบอย่างแพร่หลายบนปกหนังสือที่มีอยู่ในท้องตลาด โดยการใช้งานบาร์โค้ดมักใช้ร่วมกับฐานข้อมูลคือเมื่ออ่านบาร์โค้ดและถอดรหัสแล้วจึงนำรหัสที่ได้ไปเรียกข้อมูลจากฐานข้อมูลอีกต่อหนึ่ง ในกรณีที่ต้องการข้อมูลที่นอกเหนือจากที่มีอยู่ในบาร์โค้ด เพื่อ

แก้ปัญหาที่พบในบาร์โค้ด 1 มิติ จึงทำการพัฒนาบาร์โค้ด 2 มิติ (Two Dimension Barcode) ขึ้น

2.1.2 บาร์โค้ด 2 มิติ (2 Dimension Barcode)

บาร์โค้ด 2 มิติเป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาเพิ่มเติมจากบาร์โค้ด 1 มิติ โดยออกแบบให้บรรจุข้อมูลได้ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน ทำให้สามารถบรรจุข้อมูลได้ประมาณ 4,000 ตัวอักษรหรือประมาณ 200 เท่าของบาร์โค้ด 1 มิติในพื้นที่เท่ากัน ข้อมูลที่บรรจุสามารถใช้ภาษาอื่นนอกจากภาษาอังกฤษได้ เช่น ภาษาญี่ปุ่น จีน หรือเกาหลี เป็นต้น และบาร์โค้ด 2 มิติสามารถถอดรหัสได้แม้ภาพบาร์โค้ดบางส่วนเกิดการเสียหาย อุปกรณ์ที่ใช้อ่านและถอดรหัสบาร์โค้ด 2 มิติ มีตั้งแต่เครื่องอ่านแบบซีซีดีหรือเครื่องอ่านแบบเลเซอร์เหมือนกับของบาร์โค้ด 1 มิติจนถึงโทรศัพท์มือถือแบบมีกล้องถ่ายรูปในตัวซึ่งติดตั้งโปรแกรมถอดรหัสไว้ โดยลักษณะของบาร์โค้ด 2 มิติ มีอยู่หลากหลายแบบตามชนิดของบาร์โค้ด เช่น วงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตัวอย่างบาร์โค้ด 2 มิติ ได้แก่ Data Matrix, QR Code, MaxiCode, PD417 เป็นต้น ดังภาพที่ 2-2

ภาพที่ 2-2 ตัวอย่างบาร์โค้ด 2 มิติ

บาร์โค้ด 2 มิติ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

2.1.2.1 บาร์โค้ดแบบสแต็ก (Stacked Barcode)

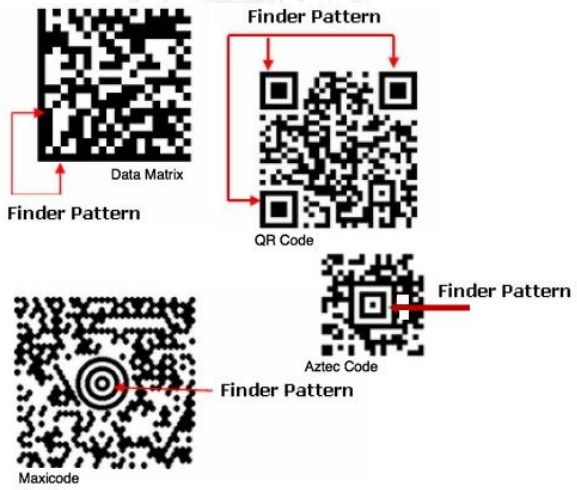
บาร์โค้ดประเภทสแต็ก (Stacked Barcode) จะมีลักษณะเป็นการนำบาร์โค้ด 1 มิติหลายๆ แถวมาวางซ้อนต่อกัน ในกระบวนการถอดรหัสนั้นเมื่อมีการสแกนบาร์โค้ดจะมีการขยาย ปรับความกว้างของบาร์โค้ดก่อนการถอดรหัส ทิศทางการอ่านบาร์โค้ดแบบสแต็กนี้จะทำได้เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น ทิศทางในการอ่านจะต้องเป็นไปตามทิศทางดังต่อไปนี้ จากทางขวาไปทางซ้าย ทางซ้ายไปทางขวา จากล่างขึ้นบน และจากบนลงล่าง ตัวอย่างบาร์โค้ดแบบสแต็กได้แก่ PDF417 (Portable Data File 417) ดังภาพที่ 2-3

ภาพที่ 2-3 ตัวอย่างบาร์โค้ดแบบสแต็ก PDF417

PDF417 เป็นบาร์โค้ด 2 มิติแบบสแต็ก ซึ่งพัฒนาขึ้นในปี 2535 โดยบริษัท Symbol Technologies ประเทศสหรัฐอเมริกา บาร์โค้ดแบบ PDF417 สอดคล้องกับมาตรฐาน ISO/IEC 15438 และ AIM USS-PDF417 ลักษณะบาร์โค้ดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีส่วนแทนรหัสข้อมูลหรือที่เรียกว่าโมดูลข้อมูล (Data Module) เป็นแถบสีดำและสีขาวเรียงตัวกันหลายๆ แถว แถวแนวนอน ประกอบด้วย 3 ถึง 90 แถว และแถวแนวตั้ง ประกอบด้วย 1 ถึง 30 คอลัมน์ สามารถบรรจุข้อมูลได้มากที่สุด 2,710 ตัวเลข 1,850 ตัวอักษร 1,018 ไบนารี หรือคันจิ 554 ตัวอักษร PDF417 ประกอบไปด้วย 4 แถบ และ 4 ช่องว่างใน 17 โมดูล จึงทำให้ได้หมายเลข 417 เครื่องอ่านบาร์โค้ดจะสามารถอ่านได้ในทิศทางเดียว เช่น อ่านจากทางซ้ายไปขวาหรือทางขวาไปซ้าย และอ่านจากด้านบนลงล่างหรือจากด้านล่างขึ้นบน โดยส่วนใหญ่บาร์โค้ดแบบ PDF417 จะนำไปใช้กับงานที่ต้องการความละเอียด และถูกต้องมากเป็นพิเศษ

2.1.2.2 บาร์โค้ดประเภทเมตริกซ์ (Matrix Barcode)

บาร์โค้ดแบบเมตริกซ์มีลักษณะหลากหลายและมีความเป็นสองมิติมากกว่าบาร์โค้ดแบบสแต็ก บาร์โค้ดประเภทนี้จะมีลักษณะเด่นคือจะมีองค์ประกอบที่ช่วยในการค้นหาบาร์โค้ดเรียกว่า Finder Pattern ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 ตัวอย่างบาร์โค้ด 2 มิติ และตำแหน่งของ Finder Pattern

หน้าที่สำคัญของ Finder Pattern คือช่วยทำให้การอ่านบาร์โค้ดทำได้อย่างรวดเร็วและช่วยเพิ่มโอกาสในการอ่านสำเร็จแม้บาร์โค้ดจะตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ กลับด้าน เอียง หรือหมุนไปในทิศทางต่างๆ นอกจากนี้ ในบาร์โค้ดประเภทเมตริกซ์นี้จะใช้พื้นที่น้อยกว่าบาร์โค้ดแบบสแต็กจึงได้ถูกนำไปใช้ในพื้นที่จำกัด

2.1.2.3 ประโยชน์ของบาร์โค้ด 2 มิติ

เนื่องจากความจุข้อมูลมีมากขึ้น และสามารถสแกนได้รวดเร็ว จึงได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างการใช้งานบาร์โค้ดสองมิติ มีดังต่อไปนี้

1. ใช้งานในด้านการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกซ์ โดยมีการนำบาร์โค้ดมาติดบนชิป (Chip) บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเก็บรายละเอียดขององค์ประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในแผงวงจรนั้นๆ
2. ใช้งานในด้านการขนส่งสินค้า บาร์โค้ด 2 มิติถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในกล่องพัสดุ และบนใบรับส่งสินค้าโดยที่บาร์โค้ดจะมีการบรรจุข้อมูลผู้รับ ผู้ส่ง วันเวลาที่ส่ง จำนวน ของสินค้า เจ้าหน้าที่สามารถดูข้อมูลได้ง่ายโดยการสแกนที่บาร์โค้ด
3. ใช้ในด้านการแพทย์ ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการนำบาร์โค้ดมาทำแท็กติดข้อมือผู้ป่วย เพื่อบ่งบอกถึงชื่อผู้ป่วย ที่อยู่ ประวัติของผู้ป่วย อาการของผู้ป่วย ยาที่ผู้ป่วยแพ้ นอกจากนี้ในประเทศออสเตรเลียได้มีการนำบาร์โค้ดมาใช้ในหลอดทดลอง ที่ใช้ในการทดสอบเลือดและสารต่างๆในห้องทดลองอีกด้วย
4. ใช้ในด้านการปศุสัตว์ มีการนำบาร์โค้ดไปติดที่ป้ายติดหูสัตว์ (Ear Tag) หรือสายรัดที่หางของสัตว์เลี้ยง (Tail Tag) เพื่อใช้ในการตรวจสอบเลขทะเบียนประจำตัว อายุ และสายพันธุ์ ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในประเทศออสเตรเลีย
5. ใช้ในระบบการจองตั๋วต่างๆ เมื่อมีการทำรายการจองตั๋ว ผู้จองทำรายการผ่านทางแอพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ จากนั้นเมื่อเสร็จสิ้นการทำรายการผู้จองจะได้รับบาร์โค้ดที่สามารถนำไปใช้ในการเข้าร่วมงานได้ บริการที่เห็นได้ในปัจจุบันได้แก่ บัตรการแสดงคอนเสิร์ต บัตรโดยสารรถไฟ เป็นต้น
6. ใช้บนนามบัตร เนื่องด้วยบาร์โค้ด 2 มิติ มีความจุที่มากเพียงพอที่จะเก็บข้อมูลของรายชื่อโทรศัพท์ได้ เมื่อนำบาร์โค้ดไปติดลงบนนามบัตรทำให้ผู้รับสามารถถอดรหัสบาร์โค้ดผ่านโทรศัพท์มือถือ และเมื่อถอดรหัสเรียบร้อยข้อมูลการติดต่อจะถูกจัดเก็บลงในสมุดรายชื่อในโทรศัพท์ทันที ช่วยลดข้อผิดพลาดในการป้อนหมายเลขโทรศัพท์และข้อมูลการติดต่อของคนสำคัญได้
7. ใช้ในการประชาสัมพันธ์ โฆษณาต่างๆ เช่น ในประเทศเกาหลี ไต้หวัน ญี่ปุ่น และในประเทศไทย ได้มีการนำบาร์โค้ด 2 มิติมาใช้ในการประชาสัมพันธ์ ทั้งในหนังสือพิมพ์ โปสเตอร์ หรือป้ายโฆษณาขนาดใหญ่ โดยส่วนใหญ่แล้วข้อมูลที่เก็บในบาร์โค้ดจะเป็นข้อมูล URL ของผลิตภัณฑ์นั้นๆ
8. ด้านสินค้าในชีวิตประจำวัน พบเห็นได้ตามสินค้าที่มีอยู่ในซุปเปอร์มาเก็ตต่างๆ โดยบาร์โค้ด 2 มิติ ได้ถูกนำมาใช้ในการเก็บข้อมูลโภชนาการที่มีในอาหารนั้นๆ

2.2 คิวอาร์โค้ด (QR Code)

QR Code ย่อมาจากคำว่า Quick Response Code เป็นหนึ่งในบาร์โค้ด 2 มิติ ได้ถูกคิดค้นโดยบริษัท Denso Wave ในปี 1994 แต่เดิมได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต

ยานยนต์ (Automotive industry) ในประเทศญี่ปุ่น ใช้ในการติดแทนหมายเลขชิ้นส่วนต่างๆ ของอะไหล่ยานยนต์ ต่อมา QR Code เริ่มนิยมใช้ในงานอื่นๆ เนื่องจากความสามารถที่โดดเด่นของ QR Code คือ อ่านได้รวดเร็ว และความจุที่สูงกว่าบาร์โค้ดชนิดอื่นๆที่มีขนาดเท่ากัน หรือความจุที่มากกว่า บาร์โค้ด 1 มิติหลายเท่าตัว QR Code ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานประชาสัมพันธ์ผลิตภัณฑ์ต่างๆ และโทรศัพท์มือถือในปัจจุบันมักจะมาพร้อมกับซอฟแวร์ที่สามารถถอดรหัส QR Code แม้ไม่มีมาให้ก็สามารถติดตั้งซอฟแวร์เพื่อทำการสแกน QR Code ได้โดยง่าย การอ่าน QR Code สามารถใช้กล้องถ่ายภาพบนโทรศัพท์มือถือถ่ายภาพ QR Code จากนั้นซอฟแวร์จะทำการถอดรหัสและแสดงให้ผู้ใช้ทราบผลลัพธ์ทางหน้าจอโทรศัพท์ทันที ดังภาพที่ 2-5

ภาพที่ 2-5 การถอดรหัส QR Code โดยใช้โทรศัพท์มือถือ

QR Code ไม่เพียงแต่ได้รับความนิยมในแถบเอเชียเท่านั้น หลายประเทศในทวีปยุโรป [7] ได้มีการใช้ QR Code อย่างแพร่หลายเช่นกัน ข้อมูลที่บันทึกอยู่ใน QR Code ส่วนมากจะเป็น URL (Uniform Resource Locator) ซึ่งเป็นที่อยู่ของเว็บเพจ ในบางกรณีอาจจะเล่นเพลงหรือวิดีโอ และข้อมูลสินค้า เป็นต้น

Google ได้มีการนำ QR Code มาใช้ในบริการที่มีชื่อว่า Favorite Place [1] ซึ่งบริการนี้ร้านค้าที่ร่วมรายการจะนำสติกเกอร์ QR Code ดังภาพที่ 2-6

ภาพที่ 2-6 ตัวอย่างการใช้ QR Code ในบริการ Favorite Place

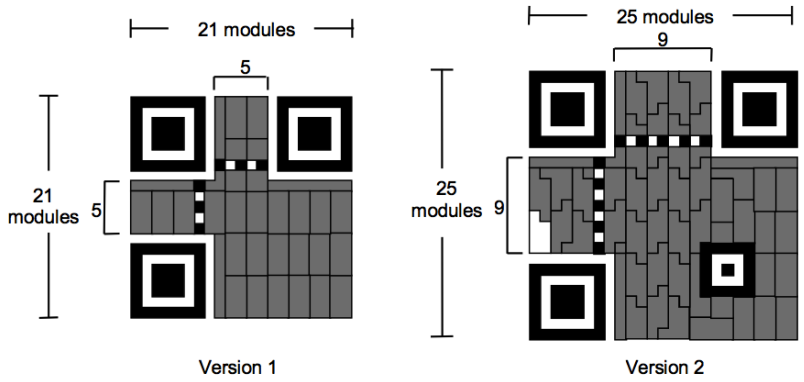
โดยภายใน QR Code จะบรรจุ URL ที่เชื่อมต่อไปยังข้อมูลต่างๆ เช่น คำวิจารณ์คำติชม คำแนะนำจากลูกค้าคนอื่นๆ ที่เคยใช้บริการจากร้านแห่งนี้ ทำให้ผู้ที่ใช้บริการได้รับข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจต่อไป สำหรับ QR Code กับระบบปฏิบัติการบนโทรศัพท์มือถือ [7] ที่กล่าวข้างต้นว่า QR Code สามารถถอดรหัสผ่านกล้องถ่ายภาพที่ติดตั้งบนโทรศัพท์มือถือได้ ซึ่งในปัจจุบันโทรศัพท์มือถือมีหลากหลายระบบปฏิบัติการ อาทิ ระบบปฏิบัติการ Android ระบบปฏิบัติการ iOS และระบบปฏิบัติการ Window จึงจำเป็นต้องมีการติดตั้งซอฟแวร์ที่เหมาะสมกับแต่ละระบบปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการถอดรหัส

QR Code เป็นที่นิยมในกลุ่มผู้ใช้โทรศัพท์มือถือแบบสมาร์ทโฟน จากภาพที่ 2-5 และ 2-6 จะเห็น ได้ว่า QR Code ซึ่งเป็นบาร์โค้ด 2 มิติสามารถอ่านข้อมูลผ่านโทรศัพท์มือถือได้อย่างรวดเร็ว QR Code ยังมีความสามารถในการเก็บข้อมูลได้หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ ข้อมูลตัวเลข (Numeric), ตัวอักขระ (Alphanumeric), ตัวอักษร Kana, Kanji, สัญลักษณ์ (Symbols) และข้อมูลประเภทไบนารี (Binary) และ Control Code จากมาตรฐาน QR Code [3] ได้ระบุความจุของ QR Code ไว้ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงความจุของ QR Code แบ่งตามประเภทข้อมูล

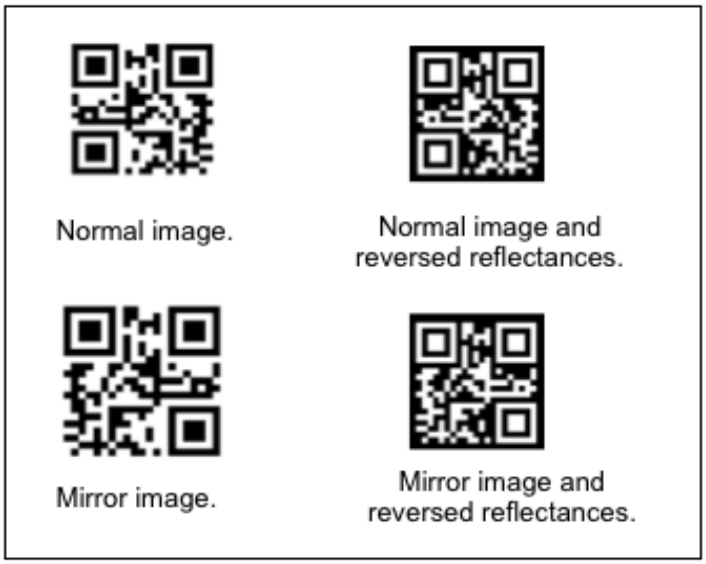
ประเภทข้อมูล	ความจุข้อมูลสูงสุด
Numeric (0-9)	7,089 characters
Alphanumeric (0-9, A-Z,$%*+-/:)	4,296 characters
8Bit byte (Binary)	2,953 bytes
Kanji, Kana	1,817 characters

QR Code จะมีการแทนความหมายของสัญลักษณ์ไบนารี โดยที่โมดูลสีดำจะแทนที่ด้วย 1 และขาวจะถูกแทนที่ด้วย 0 สำหรับจำนวนของสัญลักษณ์ของ QR Code นั้นจะขึ้นอยู่กับเวอร์ชัน โดยที่จะเริ่มที่ 21 x 21 โมดูล ถึง 177 x 177 โมดูล ในเวอร์ชัน 1 ถึง 40 ซึ่งจะมีการเพิ่มทีละ 4 โมดูล เมื่อมีเวอร์ชันที่สูงขึ้น ดังนั้นใน QR Code ในเวอร์ชัน 2 จะมีทั้งหมด 25 x 25 โมดูล ซึ่งเกิดจาก {(1*4)+21}*{(1*4)+21} [8] ดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 จำนวนของโมดูลใน QR Code Version 1 และ Version 2

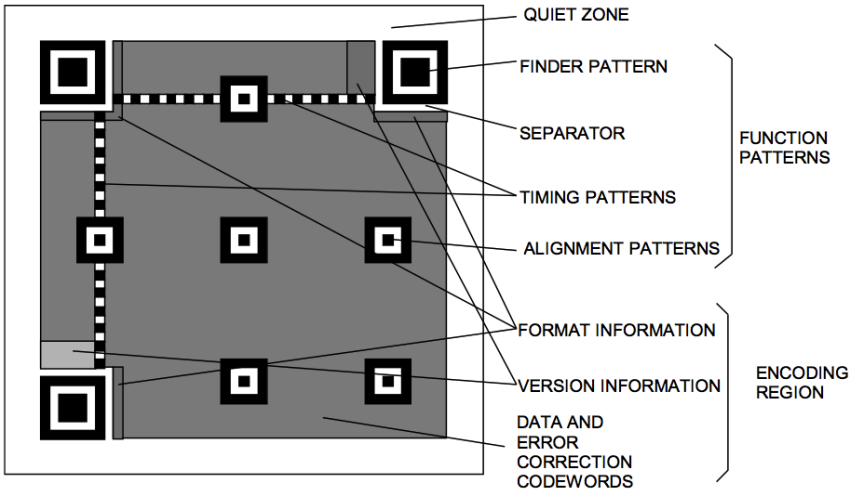
ใน QR Code ยังมีคุณสมบัติการสะท้อนกลับ (Reversed reflectances) โดยโมดูลสีดำจะแทนด้วย 0 และโมดูลขาว จะแทนด้วย 1 นอกจากนี้ QR Code ยังมีคุณสมบัติ Mirror Imaging ดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 แสดงคุณสมบัติ Reversed reflectances ของ QR Code ที่สามารถถอดรหัสได้

ซึ่งใน International Standard [3] ได้ระบุโครงสร้างของสัญลักษณ์ QR Code ได้อย่างชัดเจน อาทิ ตำแหน่งของ Finder Pattern และ Alignment Pattern เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมองในมุมกลับกันทุกๆ โมดูลของ QR Code จะสลับจากซ้ายไปขวาซึ่งมุมมองดังกล่าวซอฟแวร์ที่ใช้ในการถอดรหัสจะสามารถทำการถอดรหัสได้

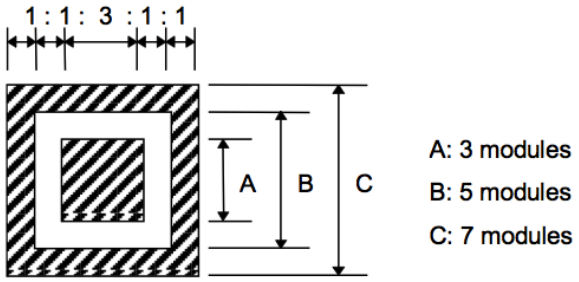
โครงสร้างของ QR Code ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ Function Pattern ซึ่งประกอบด้วย Quiet Zone, Finder Pattern, Separator, Timing Patterns, Alignment Patterns และ Encoding Region ซึ่งประกอบด้วย Format Information, Version Information, Data and Error Correction Codewords ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 โครงสร้างของ QR Code ตามมาตรฐานสัญลักษณ์ QR Code 2005

จากภาพที่ 2-9 แสดง QR Code ตามมาตรฐาน [3] ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งในแต่ละโมดูลย่อยก็มีลักษณะที่เป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส โดยที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนดังนี้

1. Function Pattern จะเป็นองค์ประกอบที่ไม่ได้มีส่วนในการจัดเก็บข้อมูลของ QR Code แต่ Function Pattern จะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ใช้ในกระบวนการอ่านเพื่อถอดรหัสภาพ QR Code ซึ่งประกอบด้วย
    a. Quiet Zone เป็นบริเวณที่เป็นพื้นที่ว่างสีขาวรอบๆ QR Code ซึ่งมีขนาดความกว้าง 4 โมดูล โดยที่ลักษณะสีพื้นของ Quiet Zone จะมีสีเดียวกับโมดูลสีขาว หรือสีสว่างของ QR Code ช่วยทำให้ซอฟแวร์ที่ใช้ในการถอดรหัสสามารถค้นหา QR Codeได้อย่างรวดเร็วขึ้น ซึ่งขนาดของ Quiet Zone ใน QR Code จะมีขนาดเป็น 4 เท่าของโมดูลย่อย
    b. Finder Pattern มีไว้เพื่อใช้ในการตรวจจับตำแหน่งของ QR Code ซึ่งจะแสดงอยู่ที่ มุมบนซ้าย , มุมบนขวา และมุมล่างซ้าย ดังภาพที่ 2-9 และแต่ละ Finder Pattern จะประกอบไปด้วยโมดูลสีดำ 7x 7 โมดูล ซ้อนทับด้วยโมดูลสีขาว 5x5 และซ้อนทับด้วยโมดูลดำ 3x3 ซึ่งหากพิจารณาตามความกว้างของโมดูลจะได้ 1:1:3:1:1 ซึ่งได้แสดงดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 โครงสร้างของ Finder Pattern ใน QR Code

Finder Pattern มีความสำคัญอย่างมากในการกระบวนการถอดรหัส หากมี Noise รบกวนในส่วนนี้จะทำให้การถอดรหัสล้มเหลว

    c. Separator เป็นโมดูลที่มีความกว้าง 1 โมดูลซึ่งมีสีขาว จะอยู่บริเวณระหว่าง Finder Pattern และส่วนของ Encoding Region
    d. Timing Patterns ประกอบด้วยโมดูลสีดำสลับกับโมดูลสีขาว ซึ่งจะมีการเริ่มและสิ้นสุดที่โมดูลสีดำ โดยเริ่มต้นจากพื้นที่ของ Sepaprator และสิ้นสุดที่ Separator อีกฝั่งซึ่งจากลักษณะของ Timing Pattern ทำให้ทราบถึงขนาดและเวอร์ชัน ของ QR Code ได้ หน้าที่ของ Timing Pattern นั้นช่วยในการตรวจจับพิกัดของสัญลักษณ์เพื่อใช้สำหรับการถอดรหัส
    e. Alignment Patterns จะมีใน QR Code เวอร์ชันตั้งแต่ 2 เป็นต้นไป ซึ่งแต่ละ Alignment Pattern นั้นจะประกอบไปด้วย โมดูลสีดำขนาด 5x5 ซ้อนทับด้วยโมดูลขาวขนาด 3x3 และซ้อนทับด้วยโมดูลดำขนาด 1x1 ซึ่งจำนวนของ Alignment Pattern จะขึ้นอยู่กับเวอร์ชันของ QR Code หน้าที่ของ Alignment Pattern นั้นจะมีประโยชน์ในภาพที่มีลักษณะเอียงหรือโค้งงอ ซึ่งช่วยให้สามารถอ่านเพื่อถอดรหัสได้ถูกต้องด้วย Decoder Application

2. Encoding Region จะเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญกับการเข้ารหัสข้อมูลซึ่งจะแบ่งย่อยได้ดังต่อไปนี้
    a. Format Information มีไว้เพื่อจัดเก็บข้อมูล Data Type , Binary Indicator ของ Error Correction Level และ Data Mask ที่ใช้ใน QR Code นั้นๆ เพื่อใช้ในขั้นตอนการถอดรหัส
    b. Version Information จะปรากฏในเวอร์ชัน 7 ขึ้นไป ซึ่งเป็นส่วนที่เก็บข้อมูลเวอร์ชันของ QR Code
    c. Data and Error Correction Codewords ส่วนที่ใช้ในการเก็บข้อมูลของ QR Code ร่วมกับข้อมูลที่ใช้ใน Error Correction ซึ่งเป็นส่วนที่มีพื้นที่มากที่สุดใน QR Code

2.3 กระบวนการเข้ารหัส QR Code

2.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูล Input

ระบุความแตกต่างของแต่ละตัวอักษรที่จะทำการเข้ารหัส โดยใน QR Code จะมีความสามารถที่ชื่อว่า Extended Channel Interpretation feature ในมาตรฐานของ QR Code 2005 [3] ได้ระบุโหมดที่ใช้ใน QR Code ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 Mode Indicators ของ QR Code

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

ทั้งนี้เพื่อให้ผลในการเข้ารหัสเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะกับประเภทข้อมูลในขั้นตอนการแปลงจากกระแสข้อมูลเป็นข้อมูลไบนารีจะมีการสลับโหมดหากมีความจำเป็น จากนั้นระบุ Error Detection และ Correction Level ซึ่งหากตอนที่สร้างไม่ได้ระบุเวอร์ชัน ในขั้นตอนนี้จะเลือกเวอร์ชันที่ต่ำที่สุดที่สอดคล้องกับข้อมูลซึ่งเวอร์ชันและความจุของ QR Code แต่ละเวอร์ชันแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 แสดงเวอร์ชันและความจุของ QR Code ในแต่ละเวอร์ชัน

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2-3 แสดงเวอร์ชันและความจุของ QR Code ในแต่ละเวอร์ชัน (ต่อ)

Version	Number of modules side	Function pattern modules	Format information / version information modules	Data modules except	Data Capacity
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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.2 การเข้ารหัสข้อมูล (Data encoding)

ในการเข้ารหัสข้อมูลให้ทำการแปลงข้อมูลที่เป็นตัวอักขระไปเป็น Bit Stream ซึ่งเป็นไปตามข้อบังคับของการแปลงข้อมูล [3] ทำการแทรก Mode indicators ด้านหน้าในทุกๆ Segment จากนั้นทำการจบ Bit stream ด้วย Terminator แล้วทำการแบ่ง Bit stream เป็น Codewords โดยแต่ละชุดของ Codewords จะมีความยาว 8 บิต จากนั้นทำการเพิ่ม Codewords ให้ครบตามเวอร์ชันที่กำหนด ตัวอย่าง เช่น หากต้องการเข้ารหัสข้อมูลที่เป็น Alphanumeric จำเป็นต้องเลือกโหมด Alphanumeric ในตารางที่ 2-2 คือ 0010 ซึ่งจะต้องมาดูจำนวนบิตในการนับ [8] ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 จำนวนบิต Character Count Indicator ของ QR Code

Version	Numeric Mode	Alphanumeric Mode
1 ถึง 9	10	9
10 ถึง 26	12	11
27 ถึง 40	14	13

2.3.3 Error Correction Coding

เมื่อทำการแบ่ง Codeword ที่ได้ตามจำนวนบล็อกที่ต้องการแล้ว ใน QR Code จะใช้อัลกอริทึมของ Reed-Solomon Error Correcting [3] ซึ่งในทุกๆ บล็อกของ Codeword จะมีการคำนวณ Error Correction Codewords [8] จากนั้นจะนำ Error Correction Codewords ที่ได้มาต่อท้ายข้อมูลเป็นลำดับต่อไป ซึ่งใน QR Code จะแบ่งระดับของ Error Correcting ดังแสดงในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 แสดงระดับ Error correcting ใน QR Code

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.4 การเตรียม Structure final message

ในการเตรียม Structure final message ทำได้โดยการแทรกส่วนของ Data Codewords และ Error Correction Codeword ในแต่ละบล็อกซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.3.4.1 ทำการแบ่ง Data Codewords ตามลำดับโดยแบ่งเป็น n บล็อกตามที่ระบุไว้ใน [6] ซึ่งจะถูกกำหนดตามเวอร์ชัน และระดับของ Error Correcting

2.3.4.2 ในทุกๆ Data Codewords จะต้องมีการคำนวณ Corresponding block ของ Error Correction Codeword [3]

2.3.4.3 ทำการเริ่มการเรียงข้อมูลตามลำดับ โดยเริ่มจาก Data block 1, Codeword 1 ตามด้วย Data block 2, Codeword 2 ทำไปเรื่อยๆ จนถึง Data block และ Codeword ตัวสุดท้าย จากนั้นจะทำการต่อข้อมูลด้วย Error Correction Codeword ตามลำดับดังภาพที่ 2–11

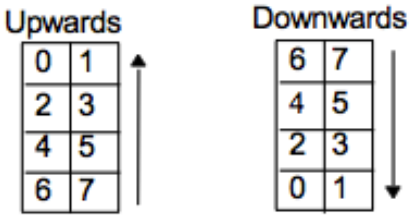
	Data codewords					Error correction codewords			
Block 1	D_1	D_2	.....	D_{11}		E_1	E_2	.....	E_{22}
Block 2	D_{12}	D_{13}	.....	D_{22}		E_{23}	E_{24}	.....	E_{44}
Block 3	D_{23}	D_{24}	.....	D_{33}	D_{34}	E_{45}	E_{46}	.....	E_{66}
Block 4	D_{35}	D_{36}	.....	D_{45}	D_{46}	E_{67}	E_{68}	.....	E_{88}

ภาพที่ 2-11 แสดงรูปแบบการวาง Data Codeword และ Error correction codewords

จากการวาง Data Codeword และ Error correction codewords จะได้ Final Message Codeword ดังนี้ 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.

2.3.5 ขั้นตอน Module placement in matrix

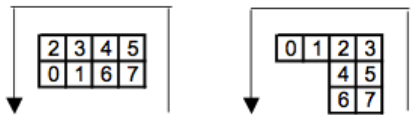
เป็นการนำโมดูลที่ได้จาก Final message มาวางลงในเมตริกซ์ ซึ่งในการวางโมดูลจะต้องทำร่วมกับส่วนประกอบที่เป็น Function Patterns ของ QR Code ซึ่งประกอบด้วย Finder pattern, Separators, Timing pattern และในบางเวอร์ชันจำเป็นที่ต้องคำนึงถึง Alignment patterns สัญลักษณ์ของ QR Code ที่จะทำการวางนั้นแยกได้ 2 ประเภท คือ การวางสัญลักษณ์แบบปกติ และการวางแบบไม่ปกติซึ่งใน QR Code 2005 [3] ได้ระบุไว้ คือ การวางสัญลักษณ์ทั้งสองชนิด จะถูกวางในตำแหน่งที่ขึ้นกับลักษณะเฉพาะตัวของสัญลักษณ์นั้น และต้องขึ้นกับตำแหน่งของ Function Pattern ด้วย ใน Codewords ส่วนมากจะอยู่ในรูปแบบ 2 x 4 ซึ่งจะมีตำแหน่งที่สามารถวางได้ในสองทิศทาง คือในทิศแนวตั้ง จะถูกวางในแนวความกว้าง 2 โมดูล และ 4 โมดูลในแนวความสูง ดังภาพที่ 2-12



(ก) (ข)

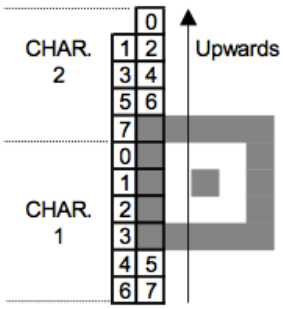
ภาพที่ 2-12 ก) ทิศทางการวางข้อมูลในทิศทางขึ้นและ ข) ทิศทางลง

และถ้าจำเป็นต้องเปลี่ยนทิศทางเป็นแนวนอน Codeword จะถูกวางในแนวความกว้าง 4 โมดูล และในแนวความสูง 2 โมดูล สำหรับการวางสัญลักษณ์ที่ไม่ปกติเราจะใช้เมื่อต้องการเปลี่ยนทิศทางในการวางโมดูล ดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 ตัวอย่างทิศทางการวางในรูปแบบปกติและรูปแบบไม่ปกติ

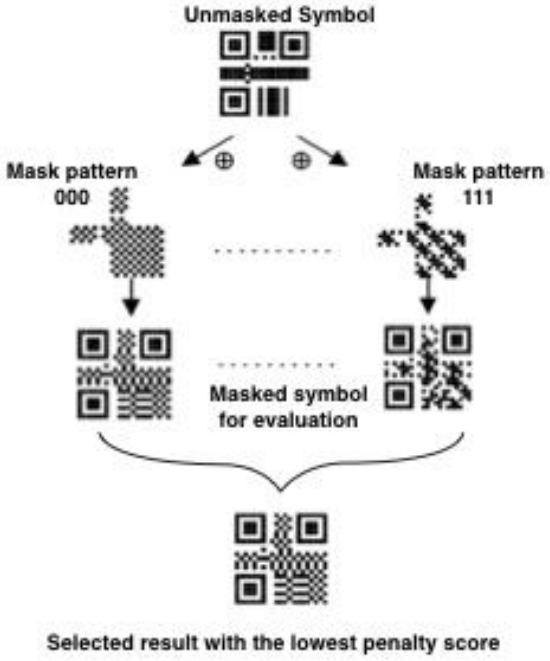
ซึ่งจะถูกใช้เมื่อเข้าใกล้ Alignment Pattern หรือ Function Pattern ต่างๆ ดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 ตัวอย่างการวางบิตในจุดที่ใกล้เคียงกับ Alignment pattern

2.3.6 ขั้นตอนการวาง Data masking

ภาพรวมขั้นตอนการวาง Data Mask ดังภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 แผนภาพขั้นตอนการทำ Data masking [3]

ในการทำ Data masking จำเป็นต้องมีการประเมินการเลือกรูปแบบ Masking ที่เหมาะสมกับอัตราส่วนที่สม่ำเสมอระหว่างโมดูลที่เป็นสีขาวและโมดูลที่เป็นสีดำ ตามข้อมูลใน QR Code [3] เนื่องจากอัตราส่วน Bit pattern ของ Finder Pattern ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1011101 ดังนั้น Data masking ที่ได้จะไม่สามารถมี Bit pattern เหมือนกับ Finder Pattern เพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.3.6.1 Data masking จะไม่ถูกนำไปวางในพื้นที่ที่เป็น Function patterns ซึ่งประกอบด้วย Quiet Zone, Finder Pattern, Separator, Timing patterns และ Alignment Patterns ซึ่งการทำ Data masking จะทำในส่วนของ Data และ Error correction Codewords ที่อยู่ใน Encoding Region เท่านั้น

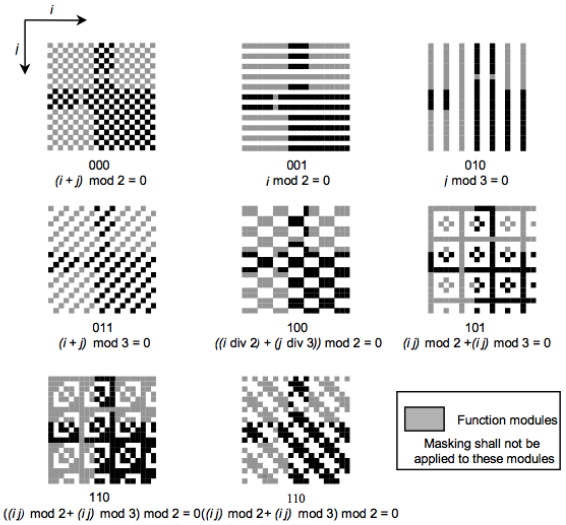
2.3.6.2 ทำการแปลงโมดูลที่อยู่บริเวณ Encoding Region โดยที่มองข้ามส่วนของ Format Information และ Version Information โดยทำการสลับค่าตามผลที่ได้จากการใช้ XOR ซึ่งผลที่ได้จากการทำ XOR ทำให้เกิดการสลับกันของโมดูลสีขาวและดำได้ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของ Data Mask Pattern ที่เลือกใช้ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการเลือก Data Masking แสดงดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการเลือก Data Masking

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

จากตารางที่ 2-6 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการเลือกรูปแบบ Data Masking โดยอ้างอิงถึงบิตที่จะใช้ใน Format Information และใช้เป็นเงื่อนไขในการสร้าง Mark Pattern สำหรับ Mark pattern ที่สร้างขึ้นจะถูกกำหนดเป็นโมดูลสีดำซึ่งอยู่ในพื้นที่ของ Encoding region (โดยไม่นับรวมพื้นที่ที่จะใช้สำหรับ Format Information และ Version Information) ซึ่งจะดูจากเงื่อนไขที่เป็นจริง i ในที่นี้แทนแถวของโมดูลที่สนใจ และ j แทนตำแหน่งของคอลัมน์ของโมดูลที่สนใจ ซึ่ง (i,j) =(0,0) คือตำแหน่งซ้ายสุด เช่นใน Mask Pattern ลำดับที่ 000 ในตำแหน่ง (10,10) จะได้ (10+10) mod 2=0

ให้ความหมายว่า เป็นจุดที่ต้องสลับสีบิตจากสีเดิม ที่ตำแหน่ง (9,10) จะได้ (9+10) mod 2 = 1 แปลว่า บิตสีเดิมทำจนครบทุก Pattern รูปแบบ Data mask pattern ที่มีทั้งหมด ดังภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-16 รูปแบบ Data mask pattern ทั้งหมด [3]

2.3.6.3 ทำการประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลง Pattern โดยการให้คะแนน Penalty กับรูปแบบที่ไม่ต้องการ [3] ซึ่งจะทำการให้คะแนนในทุกๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลง

2.3.6.4 ทำการเลือก Mask pattern ที่จะใช้โดยดูที่ Mask Pattern ใดที่มีคะแนน Penalty น้อยที่สุด

2.3.7 ขั้นตอนการวาง Format information และ Version information

ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการสร้าง QR Code โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนดังต่อไปนี้

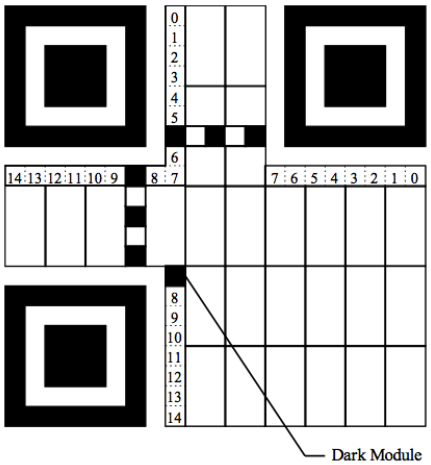
2.3.7.1 Format information เป็นส่วนที่มีความยาวทั้งสิ้น 15 บิต ที่ประกอบด้วย 5 บิต คือ Data bits และ อีก 10 คือ Error correction bits ซึ่งคำนวณได้จาก BCH (15,5) [3] โดย 2 บิตแรกในส่วนของ Data bits จะมีการบอกถึง Indicator ของระดับ Error Correction ซึ่งเป็นไปตามตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 Binary indicator ของ Error Correction Level ใน QR Code

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

ตั้งแต่ตำแหน่งที่ 3 ถึงตำแหน่งที่ 5 ของชุดข้อมูลของ Format information จะมีใส่หมายเลข Binary indicator ของ data mask pattern ดังตารางที่ 2-7 เมื่อมีการทำ Error correction จะได้ข้อมูลของ Error correction bits ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 10 บิต จากนั้นนำ Data bits จำนวน 5 บิตมาต่อท้ายแล้วทำการ XOR 15 bit Error Corrected Format Information กับ Mask Pattern 101010000010010 ในการรวม Error Correction และ Data Mask Pattern จำเป็นต้องแน่ใจว่าข้อความบิตที่ได้ ไม่เป็นหมายเลข 0 ทั้งชุด

ผลลัพธ์จากการคำนวณเพื่อสร้าง Format information จะถูกวางตามพื้นที่ที่เหมาะสมดังภาพที่ 2-17



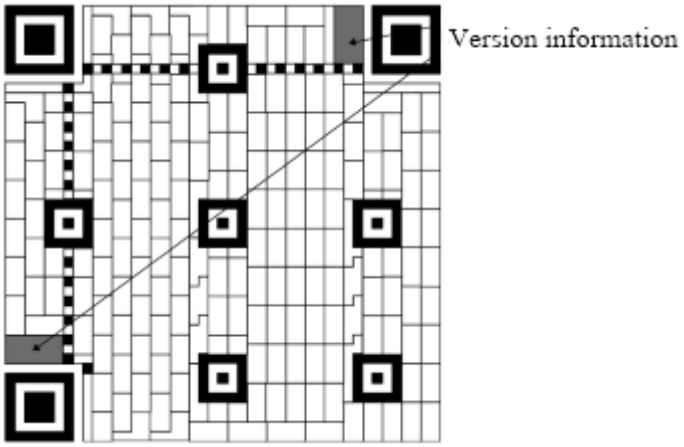
ภาพที่ 2-17 ตำแหน่งการวาง Format information

ซึ่งในการวาง Format information จะมีการวางทั้งหมด 2 ที่ เพื่อให้ในกระบวนการถอดรหัส ใน Format information จะมี Significant bit ซึ่งมีความจำเป็นต้องวางไว้ที่โมดูลที่ตำแหน่ง 0 และในโมดูลตำแหน่งที่ 14 และในโมดูลตำแหน่ง (4V + 9, 8) ซึ่ง V แทนหมายเลข Version ซึ่งในตำแหน่งนี้จะต้องเป็นสีดำเสมอ ซึ่งจะไม่ถูกมองว่าเป็นส่วนหนึ่งของ Format information

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

2.3.7.2 Version information สำหรับ Version information จะมีใน QR Code เวอร์ชันตั้งแต่ 7 เป็นต้นไปซึ่งใน Version information จะประกอบด้วยหมายเลขทั้งหมด 18 bits ซึ่งประกอบด้วย Data bits 5 บิต และอีก 12 บิต จะเป็น Error correction bit โดยคำนวณได้จาก [3](18,6) สำหรับใน QR Code ในเวอร์ชันที่ต่ำกว่า 7 นั้นในส่วนของ Version information จะเป็น 0 ทั้งหมด เมื่อได้ผลจากการคำนวณ Version information แล้วจะนำไปวางที่ตำแหน่งที่จองไว้สำหรับ Version information ดังภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 ตำแหน่งของ Version information

พื้นที่เก็บ Version information จะมีทั้งหมด 2 ที่ เช่นเดียวกับ Format information เพื่อประโยชน์ในเรื่องของ Redundancy ซึ่ง Version information จะอยู่ที่ตำแหน่งของโมดูลที่ 0 และ Significant bit จะอยู่ที่ตำแหน่งโมดูล 17

ตัวอย่างของข้อมูล Version information

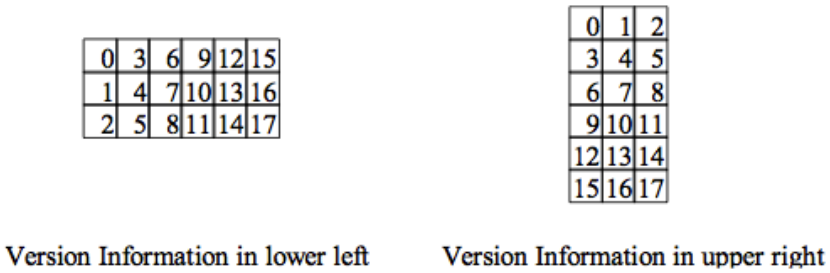
สมมุติหมายเลข Version : 7

ตัวอย่างข้อมูล : 000111

BCH bits : 110010010100

Version information module pattern : 000111110010010100

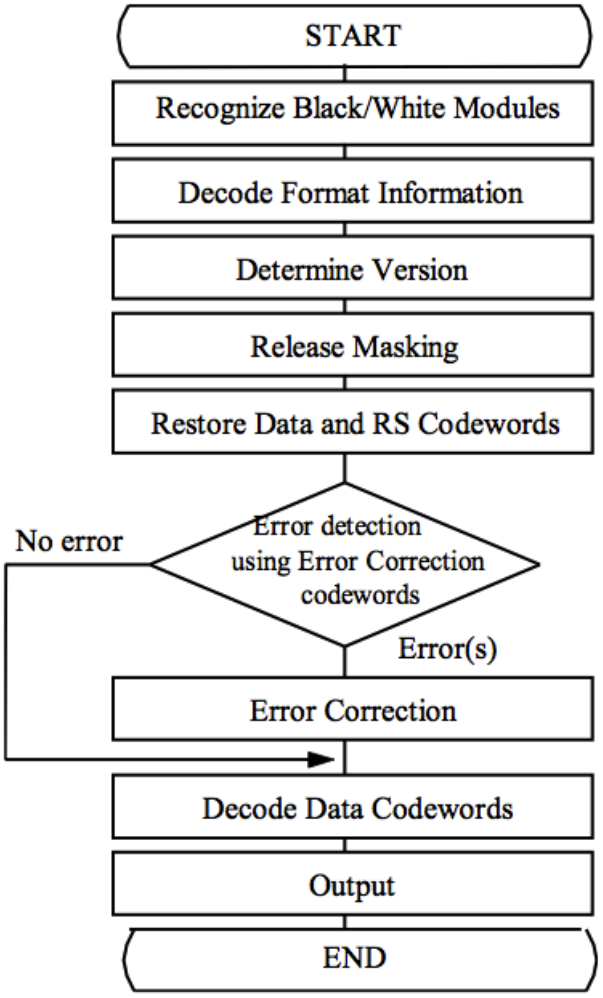
ใน Version information ตัวที่ 1 จะมีพื้นที่ทั้งหมด 6 x 3 module block ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งซ้ายของ Finder pattern ที่อยู่ฝั่งขวาบนโดยที่จะอยู่ติดกับ Separator และ Version information ตำแหน่งที่ 2 จะมีขนาด 3 x 6 module block ซึ่งจะอยู่เหนือ Finder Pattern ที่อยู่ในตำแหน่งล่างซ้ายและอยู่เหนือส่วนของ Separator ดังภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-19 ทิศทางการวาง Version information

2.4 ขั้นตอนในการถอดรหัส QR Code

ขั้นตอนในการถอดรหัส QR Code แสดงได้ดังภาพที่ 2-20



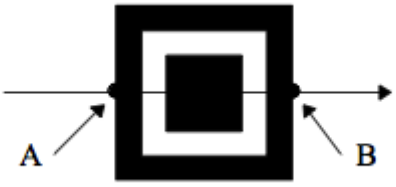
ภาพที่ 2-20 แสดงแผนผังการถอดรหัส QR Code

รายละเอียดของขั้นตอนการถอดรหัส QR Code มีดังต่อไปนี้

2.4.1 ทำการแปลงภาพที่นำเข้าโดยการแปลงเป็นภาพขาวดำ โดยใช้ Global Threshold

2.4.2 ทำการค้นหา Finder Pattern ใน QR Code [6] จะมีใน 3 แห่งที่ลักษณะโมดูลของทั้ง 3 จะประกอบไปด้วย dark-light-dark-light-dark โดยมีอัตราส่วนตามความกว้างของโมดูลย่อย คือ 1:1:3:1:1

2.4.2.1 ในการค้นหาจะต้องแน่ใจว่าได้ จุด A ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้น และจุด B โดยที่จุดทั้งสองจะเป็นจุดที่อยู่บนขอบนอกของ Finder Pattern ที่สนใจ จากนั้นทำการหาจุดศูนย์กลางของทั้งสองจุดซึ่งผลที่ได้จะได้จุดศูนย์กลางของ Finder Pattern เราจะได้แกน x ที่ต้องการ ดังภาพที่ 2-21



ภาพที่ 2-21 การสแกนไลน์ ใน Finder Pattern

2.4.2.2 ทำขั้นตอน 2.4.2.1 ซ้ำอีก 2 ครั้งโดยเลือกคอลัมน์ที่ผ่านจุดกึ่งกลางโดยที่สนใจในแกน y

2.4.2.3 ในการเลือกจุดศูนย์กลางของ Finder pattern นั้นทำได้ด้วยการวาดเส้นจากตำแหน่ง A ไป B โดยเริ่มที่ขอบนอกสุดของ Finder pattern ทำการหาจุดศูนย์กลางซึ่งจะได้แกน x ที่สนใจ จากนั้นทำการลากเส้นในแกน y จากนั้นจุดศูนย์กลางของ Finder pattern คือ จุดที่เส้นตัดกัน

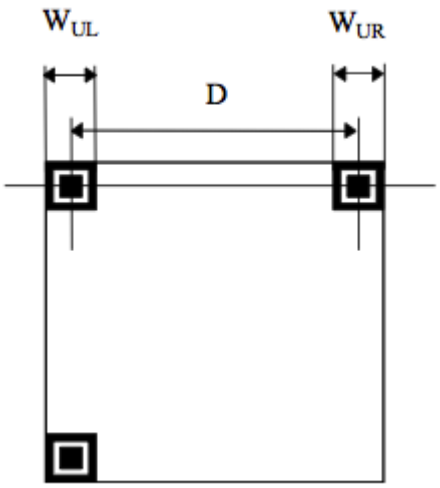
2.4.2.4 ทำซ้ำในขั้นตอน 2.4.2.1 และ 2.4.2.3 เพื่อหาFinder pattern ที่เหลืออีก 2 ที่

2.4.2.5 ถ้าไม่สามารถหาพื้นที่ที่สนใจได้ ให้ทำการ Reverse module ก่อนที่จะทำกระบวนการที่ 2.4.2.1 และในการถอดรหัสก็จะยึดตามนั้น

2.4.2.6 ในกรณีที่พบ Finder Pattern เพียง 1 ตัว กระบวนการถอดรหัสนั้นจะมอง QR Code นั้นเป็น Micro QR Code

2.4.3 ทำการพิจารณาตำแหน่งการหมุน โดยการวิเคราะห์จุดศูนย์กลางของคู่ของ Finder pattern เพื่อให้ทราบว่า Finder pattern ที่อยู่ในตำแหน่งด้านซ้ายบน และเพื่อให้ทราบมุมการหมุนของสัญลักษณ์ด้วย

2.4.4 พิจารณาระยะทางของ D ในขั้นตอน 2.4.1 ที่หาได้จากจุดศูนย์กลางของ Finder pattern มุมซ้ายบนถึงจุดศูนย์กลางของ Finder pattern ขวาบน โดยที่ความกว้างของ Finder pattern ทั้งสองตัวแทนด้วย W_{UL} ในฝั่งบนซ้าย และ W_{UR} ในฝั่งบนขวา ดังภาพที่ 2-22



ภาพที่ 2-22 แสดง Finder Pattern ที่อยู่ด้านบนของ QR Code

2.4.5 ทำการคำนวณหาค่า Nominal X Dimension ของสัญลักษณ์ QR Code โดยใช้สมการที่ (2-1)

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

2.4.6 สมการที่ใช้ในการคำนวณ Version (V) ของ QR Code สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (2-2)

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

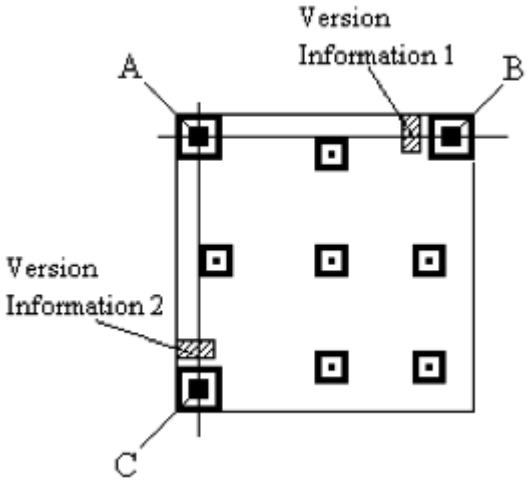
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4.7 เงื่อนไขการคำนวณ Version ถ้าผลลัพธ์จากการคำนวณได้ 6 หรือน้อยกว่านั้นแสดงว่าผลลัพธ์ที่ได้นั้นเป็นหมายเลข Version แต่ในกรณีที่ได้หมายเลข Version คือ 7 หรือมากกว่านั้นให้ทำการใช้กระบวนการดังต่อไปนี้ในการหา Version ของ ภาพ QR Code นั้นๆ

2.4.7.1 ทำการหารความกว้าง W_{UR} ด้วย 7 เพื่อคำนวณหาขนาดของโมดูล CP_{UR} โดยใช้สมการที่ (2-3)

$$CP_{UR} = \frac{W_{UR}}{7} \qquad (2\text{-}3)$$

2.4.7.2 ทำการ Sampling Guide Line AB และ AC จากจุด A จุด B และจุด C โดยการลากเส้นผ่านทั้งสามจุดของ Finder Pattern ดังภาพที่ 2-23



ภาพที่ 2-23 ตำแหน่งของ Finder pattern และ Version information

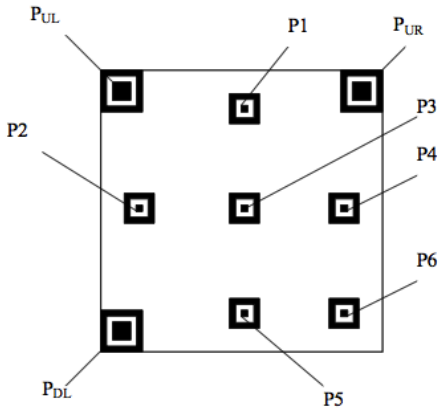
ผลที่ได้จากการหาเส้น Guide ที่ผ่านกึ่งกลางโมดูล โดยพื้นที่ของ Version Information 1 สามารถทำการคำนวณได้จากจุดที่ขนานกับเส้น Guid ซึ่งมีขนาดเท่ากับขนาดของโมดูล CP_{UR} และค่าไบนารีจะถูกพิจารณาจากโมดูลสีขาว (Light Pattern) หรือโมดูลสีดำ (Dark Pattern) จากกระบวนการทำ Sampling Grid

2.4.7.3 ทำการหา Version โดยการตรวจหา Error Correction ตามในตาราง Anex D.2 [3]

2.4.7.4 ถ้าหาก Error ที่พบมากกว่า Error correction ที่ได้มีการตรวจพบให้ทำการคำนวณความกว้างที่ Finder pattern ที่อยู่ในตำแหน่งด้านล่างซ้าย โดยที่มีขั้นตอนเหมือนกับในขั้นตอน 2.4.2.1, 2.4.2.2 และ 2.4.2.3 โดยจะทำการถอดรหัสข้อมูล Version จาก Version information ในตำแหน่งที่ 2 ซึ่งคือตำแหน่งที่แสดงในภาพที่ 2-23

2.4.8 การคำนวณสำหรับ Version 1 ให้ทำการประมาณระยะห่างระหว่างโมดูลสีขาวและสีดำในบริเวณ Timing patterns ซึ่งในทำนองเดียวกันก็ประมาณช่องว่างของจุดกึ่งกลางของโมดูลสีดำและโมดูลสีขาวในส่วนของ Timing pattern ในฝั่งซ้าย ทำการ Sampling grid โดยการลากเส้นแนวนอนผ่าน Timing pattern ด้านบนด้วยเส้นที่ขนานกันในตำแหน่งช่องว่างแนวตั้งของค่าประมาณช่องว่างของจุดกึ่งกลางของโมดูลสีดำและโมดูลสีขาวในส่วนของ Timing pattern ซึ่งจะประกอบด้วยเส้นถึง 6 เส้นเหนือ Timing pattern และทุกเส้นใต้ Timing pattern จะเป็น Version ของ QR Code ในขั้นตอนต่อไป ให้ทำการลากเส้นตามแนวตั้งผ่าน Timing pattern ทางฝั่งซ้ายโดยที่เส้นจะขนานกันในตำแหน่งที่เป็นช่องว่างแนวนอนของค่าประมาณระยะห่างระหว่างโมดูลสีขาวและสีดำในบริเวณ Timing patterns ซึ่งจะประกอบไปด้วยเส้นอ้างอิงในแนวตั้งทั้ง 6 เส้นและในทุกๆ เส้นทางขวาของ Timing pattern ถูกกำหนดให้เป็นไปตาม Version ของ QR Code สำหรับ QR Code ใน Version ที่มากกว่าให้พิจารณา คู่อันดับกึ่งกลางของแต่ละ Alignment

pattern ซึ่งดูได้ที่ Annex E [3] ในการทำ Sampling grid ระหว่างจุดดังในภาพที่ 2-24



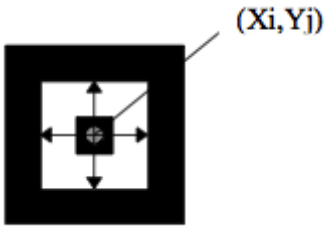
ภาพที่ 2-24 ตำแหน่งของ Finder patterns และAlignment pattern ในการ Sampling grids

2.4.8.1 ทำการหาความกว้างของ W_{UL} โดยการแบ่ง Finder Pattern ด้านบนซ้าย P_{UL} ด้วย 7 ในการหา CP_{UL} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-4)

$$CP_{UL} = \frac{W_{UL}}{7} \qquad (2\text{-}4)$$

2.4.8.2 ทำการพิจารณาคู่อันดับระหว่าง Alignment Pattern P1 กับ Alignment Pattern P2 จากภาพที่ 2-24 โดยการดูที่จุดศูนย์กลาง A ใน Finder Pattern ฝั่งซ้ายบน P_{UL} โดยที่เส้นขนานกับเส้น AB และเส้น AC รวมถึงขนาดของ CP_{UL} ด้วย

2.4.8.3 ทำการหาพื้นที่สีขาวภายใน Alignment Pattern ที่จุด P1 และ P2 โดยเริ่มจากจุดกึ่งกลางของ Alignment Pattern เพื่อทำการหาคู่ Xi,Yj ดังแสดงในภาพที่ 2-25

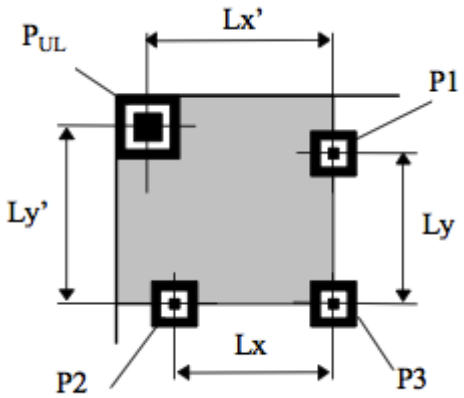


ภาพที่ 2-25 จุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern

2.4.8.4 ทำการประมาณการจุดศูนย์กลางของ Alignment pattern ที่ P3 โดยขึ้นอยู่กับจุดศูนย์กลางของ Finder Pattern บนซ้าย P_{UL} และจุดศูนย์กลางของ Alignment pattern P1 และ P2 หาได้จาก 2.4.8.3

2.4.8.5 ทำการหาจุดศูนย์กลางของ Alignment pattern P3 โดยใช้วิธีเดียวกันในขั้นตอนที่ 2.4.8.3

2.4.8.6 ทำการหา Lx ซึ่งคือระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern P2 ไปยัง P3 และ Ly คือระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern P1 ไปยัง P3 จากนั้นทำการแบ่ง Lx และ Ly ด้วยการกำหนดพื้นที่ว่างของ Alignment pattern โดยใช้สมการที่กำหนดให้ AP คือพื้นที่ว่างใน Module ของ Alignment pattern ซึ่งดูได้จากใน (Table E.1) [3] และในแนวเดียวกันในการหา Lx' ซึ่งเป็นระยะทางในแนวนอนของจุดกึ่งกลางของ Finder Pattern P_{UL} กับจุดศูนย์กลางของ Alignment pattern P1 และ Ly' ซึ่งเป็นระยะทางแนวตั้งฉากจากจุดศูนย์กลางของ Finder Pattern ด้านบนซ้าย P_{UL} กับ จุดศูนย์กลางของ Alignment pattern P2 ดังแสดงในภาพที่ 2-26



ภาพที่ 2-26 สัญลักษณ์ด้านบนซ้ายของ QR Code

จากนั้นทำการ แบ่ง Lx' และ Ly' เพื่อให้ได้ค่า CPy' ของตำแหน่งด้านบนและ CPy' ในฝั่งซ้ายบนของภาพสัญลักษณ์ QR Code โดยใช้สมการดังนี้

CPx' = Lx' / (คอลัมน์ของคู่อันดับจุดศุนย์กลางของ Alignment pattern P1 - คอลัมน์ของคู่อันดับของจุดศูนย์กลางของ Finder pattern P_{UL}) ซึ่งเป็น Finder pattern ที่อยู่ทางด้านซ้ายบน

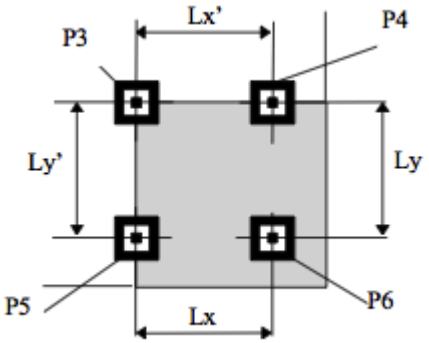
CPy'=Ly' / (แถวของคู่อันดับของจุดศูนย์กลางใน Alignment pattern P2 - แถวของคู่อันดับของจุดศูนย์กลางของ Finder Pattern P_{UL})

2.4.8.7 ในการพิจารณาพื้นที่ Sampling grid ที่คลุมที่บริเวณด้านบนซ้าย โดยจะขึ้นอยู่กับ CPx, CPx', CPy และ CPy' ซึ่งแสดงพื้นที่ของสัญลักษณ์ QR Code ในตำแหน่งด้านบนซ้าย ดังภาพที่ 2-26

2.4.8.8 ในการทำ Sampling grids ในพื้นที่ฝั่งบนขวา ก็มีวิธีการในการดำเนินการในทำนองเดียวกัน (โดยที่ตีเส้นปกคลุม ด้านบนขวา ของ Finder pattern P_{UR} ในส่วนของ Alignment pattern P1, P3 และ P4) และในทางพื้นที่

ด้านล่างซ้าย มีการปกคลุมในส่วนของ Finder pattern PUR, ในส่วน Alignment pattern P2, P3 และP5 ของสัญลักษณ์คิวอาร์โค้ด

2.4.8.9 สำหรับใน Alignment pattern ที่จุด P6 ดังแสดงในภาพที่ 2-27



ภาพที่ 2-27 สัญลักษณ์ในบริเวณขวาล่างของ QR Code

การประมาณคู่ของจุดศูนย์กลางในระดับของ CPx' และ CPy' ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากพื้นที่ว่างของ Alignment pattern โดยที่จุด P3, P4, P5 และ P6 คือจุดศูนย์กลางของ Alignment pattern เหล่านั้น

2.4.8.10 ทำขั้นตอน 2.4.8.5 จนถึง 2.4.8.8 เพื่อใช้ในการทำ sampling grid ในส่วนพื้นที่ด้านล่างขวา ของ QR Code ดังแสดงในภาพที่ 2-27

2.4.8.11 ตรวจสอบการทำ sampling grid ว่ามีพื้นที่ใดที่ยังไม่ครอบคลุมบ้างโดยใช้วิธีเดียวกันนี้

2.4.9 Global Threshold พื้นที่ตัวอย่างขนาด 3x3 พิกเซลจากนั้นทำการแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีสีเข้มแทนด้วยเลข 1 และแทนโมดูลที่มีสีขาวเป็น 0

2.4.10 ทำการถอดรหัส Format information ที่อยู่ใกล้กับ Finder pattern ด้านซ้ายบน โดยการดูที่ Error Correction Level และข้อมูลของ Data Mask Pattern ที่ใช้บนสัญลักษณ์บริเวณนั้น ถ้า Error ที่พบมากกว่าระดับของ Error Correction Level การถอดรหัส Format information จะทำการย้ายไปสนใจในส่วนของ Format information ที่อยู่บริเวณใกล้กับ Finder pattern ขวาบน และล่างซ้ายตามลำดับ

2.4.11 ในกรณีที่ Format information ไม่สามารถทำการถอดรหัสได้ให้ทำการอ่านในทิศทางตรงกันข้าม และทำการถอดรหัสในแบบภาพ Miror ของตำแหน่ง Row และ Column ที่เป็นคู่อันดับ Transposed

2.4.12 ทำการ XOR ส่วนของ Data Mask Pattern กับบริเวณพื้นที่ของ Data ที่ถูกเข้ารหัสของ QR Code เพื่อทำการถอด Data Mask และการเรียกคืนบริเวณส่วนของ Data Codewords และ Error Correction Codewords ในกระบวนการนี้จะเป็นขั้นตอนที่ตรงกันข้ามกับกระบวนการในการเข้ารหัส QR Code

2.4.13 ทำการพิจารณาสัญลักษณ์ของ Codewords ตามกฎการวาง [3] (6.7.3)

2.4.14 ทำการจัดลำดับของ Codeword ให้อยู่ในรูปแบบ Block โดยทำให้เป็นไปตามรูปแบบของ Symbol Version และ Error Correction Level

2.4.15 ทำการตรวจหาข้อผิดพลาด และใช้กระบวนการในการกู้คืนข้อมูลซึ่งแสดงใน Annex B [3] เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นไปตาม Error Correction Level

2.4.16 ทำการ Restore ข้อมูลต้นฉบับที่มี Bit stream เป็นลำดับของ Data Block

2.4.17 ทำการแบ่ง Data bit stream เป็นส่วนๆ โดยทำการเริ่มต้นแต่ละส่วนด้วย Mode indicator และความยาวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ Indicator นั้นๆ

2.4.18 ทำการถอดรหัสในแต่ละส่วนที่ได้จากการแบ่ง Data bit stream

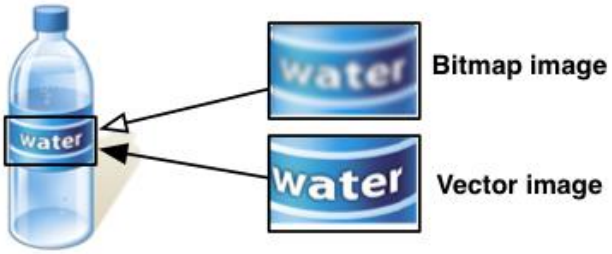
2.5 พื้นฐานการประมวลผลภาพดิจิตอล

ภาพถูกนำมาใช้ในกระบวนการสื่อสารมาตั้งแต่ในยุคเริ่มต้นของมนุษย์จนกระทั่งในปัจจุบัน เทคโนโลยีการถ่ายภาพ ได้มีการพัฒนามาเป็นในรูปแบบดิจิตอลทั้งการจัดเก็บและการแสดงผลทางหน้าจออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกซ์ต่างๆ เทคโนโลยีการประมวลผลภาพดิจิตอลจึงจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อการนำข้อมูลภาพไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ

2.5.1 รูปแบบของภาพดิจิตอล

2.5.1.1 รูปแบบ Bitmap คือภาพที่เกิดจากการประกอบกันของจุดเล็กๆ ที่เรียกว่า พิกเซล (Pixel) โดยที่มีการเรียงต่อกันเป็นตารางเล็กๆ โดยตารางเหล่านั้นจะมีการจัดเก็บค่าสีที่เรียงกันเมื่อมองในภาพรวมแล้วผลของการรวมจุดหลายๆจุดจะกลายเป็นภาพที่สื่อความหมาย เนื่องด้วยตารางเหล่านั้นมีขนาดเล็ก จนดวงตาของมนุษย์ไม่สามารถที่จะแยกแยะรายละเอียดย่อยนั้นได้ ในภาพ Bitmap นี้เมื่อทำการขยายภาพ ตารางที่บรรจุค่าสีจะมีการขยายด้วยจึงทำให้ภาพมีลักษณะที่ไม่คมชัดโดยทั่วไปแล้วภาพ Bitmap จะได้แก่ ภาพถ่าย ภาพที่ได้จากเครื่องแสกนเนอร์ ซึ่งประโยชน์ที่ชัดเจนของภาพ Bitmap คือความสามารถในการไล่โทนสีรวมถึงระดับแสงเงาให้มีความใกล้เคียงกับวัตถุจริงมากที่สุดได้

2.5.1.2 รูปแบบ Vector คือภาพที่ประกอบด้วย เส้นต่างๆ ทางเรขาคณิต ได้แก่ เส้นตรง เส้นโค้ง รูปทรงทางเรขาคณิตต่างๆ ภาพต่างๆที่ถูกสร้างขึ้นโดยสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นในโปรแกรมที่ทำการแสดงผลและแก้ไขภาพ เช่น การขยายภาพ การลดขนาดภาพ จำเป็นต้องนำสมการเหล่านั้นมาคำนวณค่าเพื่อสร้างรูปภาพขึ้นมาใหม่ในทิศทางที่สอดคล้องกับภาพต้นฉบับ ดังนั้นในภาพประเภทนี้จึงตรงข้ามกับภาพ Bitmap โดยที่ภาพ Vector จะสามารถทำการเปลี่ยนแปลงรูปทรงได้โดยที่ไม่ส่งผลต่อคุณภาพของรูปภาพ ในภาพผลลัพธ์ที่ได้จะมีลักษณะคมชัดมากโดยทั่วไปแล้วภาพแบบ Vector จะถูกนำไปใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น ในการสร้างภาพ 3 มิติ ภาพ Logo ของผลิตภัณฑ์ ภาพในแผนผังต่างๆ เป็นต้น ตัวอย่างของภาพ Bitmap และภาพ Vector แสดงในภาพที่ 2-28



ภาพที่ 2-28 ตัวอย่างรูปภาพในรูปแบบ Bitmap และVector

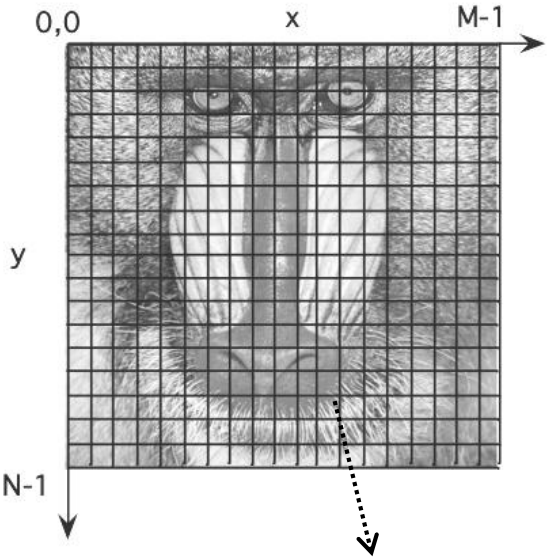
2.5.2 กระบวนการในการสร้างภาพดิจิตอล

กระบวนการในการสร้างภาพดิจิตอลนั้นเราสามารถทำการแบ่งออกได้ 3 ขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การได้มาของภาพ (Image Acquisition) เป็นการบันทึกภาพโดยใช้อุปกรณ์นำเข้าภาพซึ่งโดยทั่วไปภาพเหล่านั้นที่อยู่ในรูปแบบดิจิตอลนั้นจะเป็นสัญญาณที่มีลักษณะต่อเนื่อง (Continuous) ดังนั้นในอุปกรณ์กล้องถ่ายภาพดิจิตอล หรือกล้องวิดีโอดิจิตอลจะทำหน้าที่ในการแปลงภาพที่เป็นลักษณะ 3 มิติเป็นภาพ 2 มิติ เพื่อใช้ในการแสดงผลบนหน้าจอภาพของคอมพิวเตอร์

2. การสุ่มเลือกเพื่อกำหนดตำแหน่ง (Image Sampling) เป็นการแปลงสัญญาณภาพที่ได้เป็นภาพ 2 มิติ ให้เป็นภาพเชิงดิจิตอลโดยที่ทำการสุ่มข้อมูลจากตำแหน่งของภาพที่จุด f(x, y) โดยใช้การกำหนดช่วงที่เหมาะสมกับข้อมูลภาพนั้นๆ ผลที่ได้จะได้เป็นเมตริกซ์ของปริมาณเต็มบวกขนาด M x N ดังภาพที่ 2-29 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทำ Image Sampling

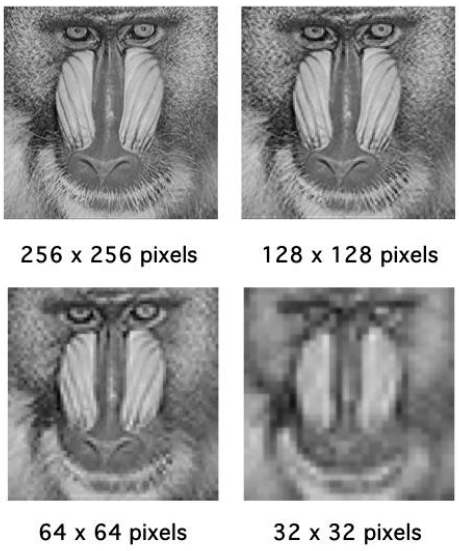
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



$$F = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & f(0,2) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & f(1,2) & \cdots & f(1,N-1) \\ f(2,0) & f(2,1) & f(2,2) & \cdots & f(2,N-1) \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & f(M-1,2) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix}$$

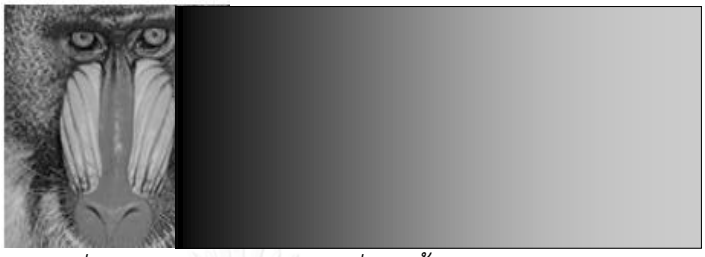
ภาพที่ 2-29 ตัวอย่างการทำ Image Sampling

ภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการสุ่มเลือกตำแหน่งภาพที่ดีนั้นจะทำให้ได้ภาพที่มีรายละเอียดใกล้เคียงกับต้นฉบับ โดยในทางกลับกันถ้าทำการสุ่มโดยใช้ตัวอย่างที่น้อยเกินไปก็จะทำให้ภาพผลลัพธ์ที่ได้มีความผิดเพี้ยนไปจากภาพต้นฉบับ ดังแสดงในภาพที่ 2-30



ภาพที่ 2-30 ภาพที่ได้จากอัตราการสุ่มที่แตกต่างกัน

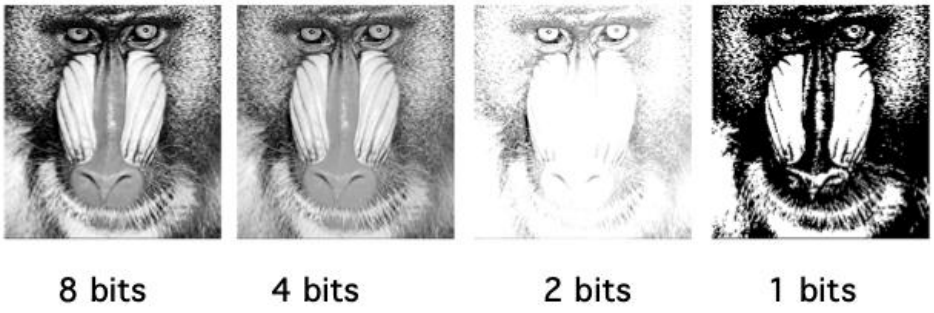
3. การกำหนดระดับของความเข้มของแสง (Image Quantization) เป็นขั้นตอนของการนำภาพที่ได้จากการทำ Image Sampling มาทำการกำหนดระดับความเข้มของสีในระดับเทา ซึ่งในแต่ละจุดของภาพจะประกอบไปด้วยเฉดสีจากสีดำจนไปถึงสีขาวโดยที่สีดำจะถูกแทนค่าด้วย 0 และสีขาวจะถูกแทนค่าด้วย 255 ในกรณีที่เป็นภาพ 8 บิต ซึ่งจะมีทั้งสิ้น 256 หรือ 2^8 เฉดสี (0-255) ดังภาพที่ 2-31



ภาพที่ 2-31 ภาพในระดับเทาที่มีค่าตั้งแต่ 0 -255

ซึ่งในหน่วยความจำจะมีการเก็บค่าด้วยรหัสฐานสองแทนค่า สีต่างๆ เช่น สีดำจะถูกแทนค่าด้วย 00000000 สีขาวจะถูกแทนค่าด้วย 11111111 โดยที่ค่าที่อยู่ระหว่างสีดำและสีขาวจะเป็นค่าบิตในเลขฐานสองที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าแต่ละจุดของภาพจะถูกแทนที่ด้วยตัวเลขที่มีค่า 0 -255 ในภาพระดับเทา แต่ในกรณีที่ต้องการแทนที่ค่าด้วยค่าเพียง 2 ค่า คือ ค่าสีขาวและสีดำ ซึ่งภาพนี้จะใช้พื้นที่ในการเก็บข้อมูลเพียง 1 บิตเท่านั้นซึ่งเรียกว่าภาพขาวดำ (Binary Image) ดังภาพที่ 2-32



ภาพที่ 2-32 ภาพที่มีระดับเทา 8 bits 4 bits 2 bits และ 1 bit

แสดงตัวอย่างภาพระดับเทาที่แตกต่างกัน ดังนี้

ภาพที่มีระดับสีเทา 8 บิต จะมีระดับสีเทาทั้งหมด 256 ระดับ มีค่าอยู่ในช่วง 0-255

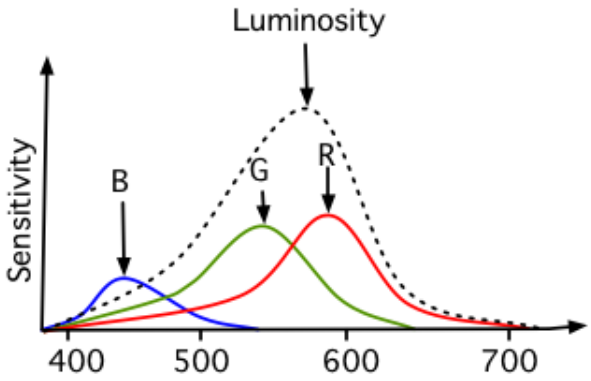
ภาพที่มีระดับสีเทา 4 บิต จะมีระดับสีเทาทั้งหมด 16 ระดับ มีค่าอยู่ในช่วง 0-15

ภาพที่มีระดับสีเทา 2 บิต จะมีระดับสีเทาทั้งหมด 4 ระดับ มีค่าอยู่ในช่วง 0-3

ภาพที่มีระดับสีเทา 1 บิต จะมีระดับสีเทาทั้งหมด 2 ระดับ มีค่าอยู่ในช่วง 0-1

2.5.3 คุณสมบัติของสี

สีเกิดจากคุณสมบัติทางกายภาพของแสงซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดสี ในระบบการมองเห็นของมนุษย์โดยธรรมชาติจะมีการตอบสนองไวต่อค่าสีมากกว่าค่าความสว่าง แสงกับระยะทางการมองวัตถุทำให้มนุษย์สามารถแยกแยะสี และจะรับรู้ได้เมื่อแสงนั้นๆ ตกกระทบไปยังวัตถุที่ไม่ดูดซึมแสงสีดังกล่าว แสงที่เรามองเห็นนั้นเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีความยาวคลื่นอยู่ 3 สี ได้แก่ แสงสีแดง (Red) ซึ่งเป็นคลื่นที่มีความยาว 580 นาโนเมตร แสงสีเขียว (Green) ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 545 นาโนเมตร และแสงสีน้ำเงิน (Blue) ที่มีความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร ดังภาพที่ 2-33



ภาพที่ 2-33 ค่าความยาวของคลื่นสีที่ตามนุษย์สามารถมองเห็น

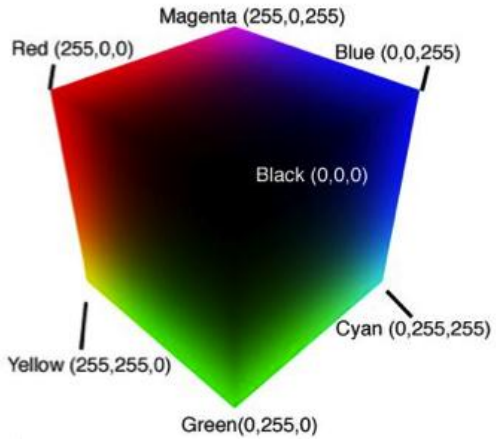
นอกจากนี้การรับรู้ของมนุษย์ยังสามารถรับรู้ได้ถึงเนื้อสี (Hue) ซึ่งจะบอกถึงสีจริงของสีนั้นๆ เช่น สีแดง เป็นต้น อีกทั้งในการรับรู้ของมนุษย์ยังสามารถบอกถึงความอิ่มตัวของสี (Saturation) ซึ่งจะบอกถึงความรู้สึกที่มีต่อสีได้แก่ สีแดงเข้ม สีแดงอ่อน และสุดท้ายคือค่าความส่องสว่าง (Brightness) มนุษย์สามารถบอกได้ว่าสีนั้นมืดหรือสว่างได้

2.5.4 แบบจำลองสี (Color Models)

แบบจำลองสีเป็นวิธีในการกำหนดสีต่างๆ ตามมาตรฐาน ในปัจจุบันมีหลากหลายแบบจำลองสีให้เลือกใช้ ตามความเหมาะสม เนื่องด้วยคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ของแต่ละแบบจำลองสี โดยในแต่ละแบบจำลองสีจะมีหลักการนำแม่สีมาผสมเพื่อให้ได้สีอื่นๆ ซึ่งแต่ละแบบจำลองสีจะมีเกณฑ์ที่แตกต่างกัน สำหรับแบบจำลองสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้สนใจเพียง 2 แบบจำลองสีเท่านั้น ซึ่งได้แก่ RGB และ HSV โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

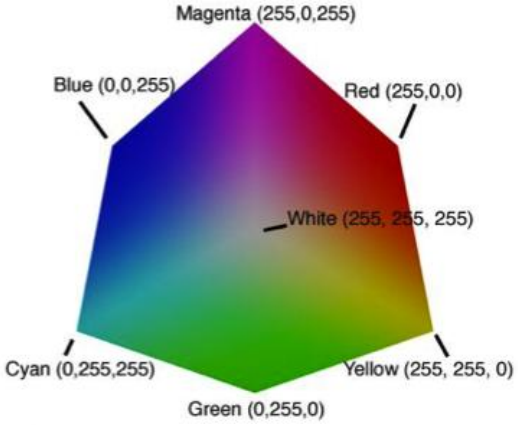
2.5.4.1 แบบจำลองสี RGB

ในแบบจำลองสีแบบนี้เกิดจากแม่สีหลัก (Primary Color) ที่มีอยู่ 3 สี คือ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) น้ำเงิน (Blue) แบบจำลองสี RGB จะมีลักษณะเป็นลูกบาศก์โดยที่แต่ละมุมจะแทนด้วยแม่สีแต่ละสี ได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ดังภาพที่ 2-34



ภาพที่ 2-34 มุมสีดำในแบบจำลองสี RGB

จากภาพ ณ จุด (0,0,0) ซึ่งจะมีสีดำและที่จุด (255,255,255) ซึ่งจะเป็นมุมที่เป็นสีขาว ดังแสดงในภาพที่ 2-35

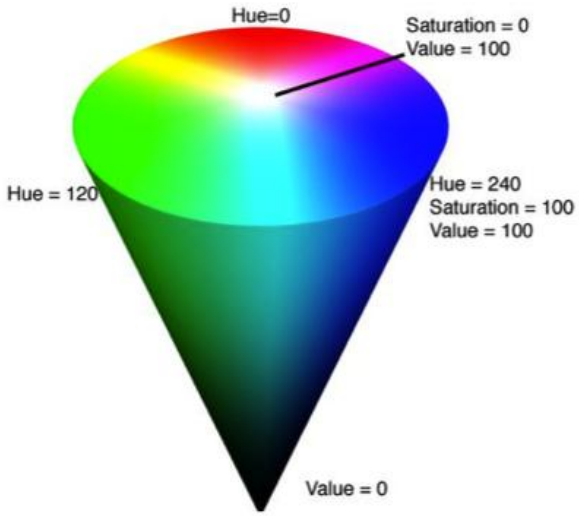


ภาพที่ 2-35 มุมสีขาวในแบบจำลองสี RGB

การเลือกค่าสีจำเป็นต้องมีการระบุค่าสีแดง เขียว และน้ำเงิน เช่น ถ้าต้องการเลือก สีเหลือง จะต้องระบุ R =255, G=255 และ B=0 เมื่อมีการเปลี่ยนค่าสีใดสีหนึ่งในแม่สี ก็จะส่งผลให้เกิดสีใหม่ทันทีโดยทั่วไปแบบจำลองสี RGB จะเหมาะกับงานที่ต้องการแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์เช่น ภาพที่ใช้ในเว็บไซต์ต่างๆ เป็นต้น และภาพในแบบจำลอง RGB นี้ยังใช้ในการจัดเก็บไฟล์ภาพในระบบคอมพิวเตอร์อีกด้วย

2.5.4.2 แบบจำลองสี HSV

HSV (Hue, Saturation, Value) Color Model ถูกเสนอโดย A.R. Smith (1978) มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้สะดวกในการใช้สีต่างๆ มากกว่าที่ใช้เฉพาะแม่สีทั้งสามสี แบบจำลองสี HSV เป็นแบบจำลองสีที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นทางเลือกโดยแบบจำลองสี HSV จะมีลักษณะเป็นกรวยสี ดังภาพที่ 2-36



ภาพที่ 2-36 แบบจำลองสี HSV

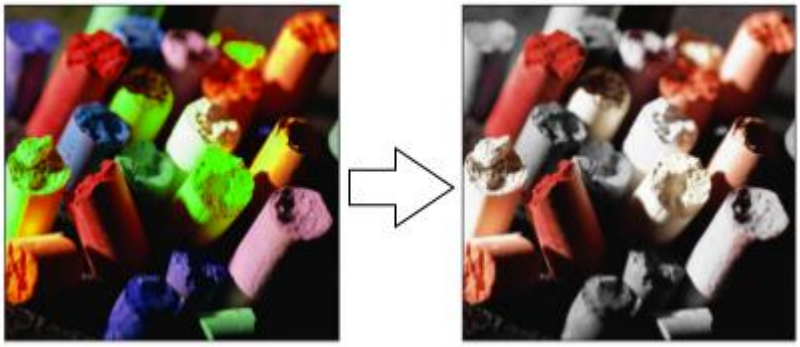
ในแบบจำลองสี HSV เมื่อกล่าวถึงสีเหลืองในทางศิลปะจะมีความแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาสีเหลืองอ่อน สีเหลืองเข้ม หรือสีน้ำตาลว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร จะพบว่าทุกสีคือสีเหลือง ที่มีระดับความเข้มหรือมีความอิ่มตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้นสีในแบบจำลองสี HSV จึงมีลักษณะใกล้เคียงกับการมองเห็นของสายตามนุษย์มากกว่าแบบจำลองสีอื่นๆ แบบจำลองสี HSV ประกอบด้วยค่า 3 ค่า ได้แก่

H หมายถึง Hue คือค่าของสี เช่น สีแดง สีเหลือง สีเขียว วัดเป็นมุมจาก 0 – 360 องศา ซึ่งสีแดง สีเหลือง และสีเขียวจะมีค่าต่างกันสีละ 60 องศา

S หมายถึง Saturation คือค่าความอิ่มของเนื้อสีหรือค่าความบริสุทธิ์ของสีซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 โดยสีจะมีความอิ่มสีมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อค่า Saturation มีค่าเพิ่มขึ้น

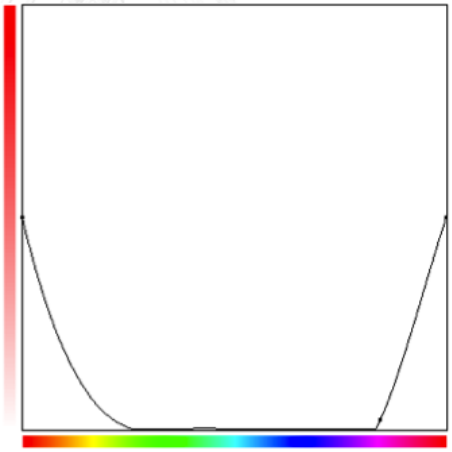
V หมายถึง Value หรือ Brightness คือความสว่างของสีมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 โดยภาพจะสว่างมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อ Brightness มีค่าเพิ่มขึ้น เช่น Hue ใดๆ ที่มีค่า Saturation เท่ากับ 0 เมื่อ Value สูงสุดก็คือสีขาว และValue ต่ำสุดจะได้สีดำหรือ Hue สีเหลืองที่ Saturation มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ Value สูงสุดจะเป็นสีเหลือง และเมื่อ Value ต่ำสุดคือสีดำ แบบจำลองสี HSV นั้นง่ายต่อการทำการเลือกสี [9] เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง RGB ทั้งนี้เนื่องจากในแบบจำลองสี RGB นั้นจะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าใดค่าหนึ่งของแม่สี ตัวอย่างในการเลือกสี เช่น ในกรณีที่ต้องการเลือกสีที่อยู่ในโทนสีเดียวกันระหว่างสีเหลืองอ่อนและสีเขียวอ่อน ในแบบจำลอง RGB ที่มีค่าสีเป็น R=254 , G=255 และ B=200 และในแบบจำลอง HSV จะมีค่าสีเป็น H = 61 องศา, S=22% และ V =100% เมื่อต้องการเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนไปเป็นสีเขียวอ่อนที่มีระดับความอิ่มสีเท่ากับสีเหลืองอ่อน ในแบบจำลองสี RGB จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนค่าทั้ง 3 ค่าเพื่อใช้ในการผสมสีให้ได้สีเขียวอ่อน ได้แก่ R=199, G=255 และ B=199 แต่ในแบบจำลองสี HSV เมื่อต้องการเลือกสีที่มีค่าความอิ่มสีเดียวกันกับสีเหลืองอ่อน ค่าความสว่างเท่ากันกับสีเหลืองอ่อน แต่ค่าสีที่ต่างกันอย่างเช่นในกรณีนี้ การเลือกสีเขียวอ่อนจะทำได้โดยการเปลี่ยนค่า H หรือ Hue

เท่านั้นซึ่งค่าสีเขียวอ่อนในแบบจำลองสี HSV จะมีค่าคือ H=120 องศา , S=22% และ V=100% จะเห็นได้ว่า HSV นั้นเป็นแบบจำลองสีที่ทำให้ง่ายต่อการเลือกสีหรือแบ่งแยกความต่างของสีได้คล้ายกับการมองเห็นของสายตามนุษย์ จึงได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในโปรแกรมที่ใช้ในการแต่งภาพ ดังตัวอย่างในภาพที่ 2-37



ภาพที่ 2-37 แสดงภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับค่า HSV

ภาพที่ 2-37 เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับ HSV Curve แล้ว ดังภาพที่ 2-38 ซึ่งเป็นการเลือกเฉพาะส่วนของภาพที่มีสีแดงให้เด่นกว่าสีอื่นๆ



ภาพที่ 2-38 HSV Curve

จากตัวอย่างที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าแบบจำลองสี HSV นั้นจะมีส่วนช่วยให้การจัดการเกี่ยวกับสี การเลือกสี การจับคู่สี ทำได้อย่างสะดวกและให้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามการเลือกใช้แบบจำลองสี HSV นี้จำเป็นต้องระวังเนื่องจากสีเทาจากสีดำไล่สีไปยังสีขาวมีค่า Hue และ Saturation เป็น 0 ในบางครั้งอาจจะทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้หากต้องการใช้สีบางสีที่อยู่ในส่วนนี้ โดยหลักการแล้วสีที่มีความอิ่มสีน้อยจะถูกมองเป็นเฉดสีเทา เมื่อทำการปรับปรุงภาพในส่วนที่มีค่า Saturation ต่ำอาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียของข้อมูลในส่วนนี้ได้ ซึ่งปัญหาการสูญเสียข้อมูลนี้จะเกิดจากการบีบอัดข้อมูลเพื่อเขียนไฟล์หรือการแสดงผล

สำหรับการใช้งานของ HSV นั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการแปลงเป็น RGB ในกรณีที่ต้องการแสดงผลผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ เนื่องด้วยระบบปฏิบัติการส่วนใหญ่จะทำการแสดงผลภาพโดยใช้แบบจำลองสี RGB เท่านั้น

2.5.5 การแปลงค่าสีจากแบบจำลองสี RGB ไปแบบจำลองสี HSV

เนื่องด้วยค่าสีต่างๆ ที่ถูกใช้ในไฟล์ภาพในระบบคอมพิเตอร์ล้วนจัดเก็บอยู่ในรูปแบบของแบบจำลองสี RGB ดังนั้นเมื่อมีความจำเป็นต้องใช้ค่าสีตามแบบจำลองสี HSV จะต้องทำการแปลงค่าสีจาก RGB ไปเป็น HSV โดยเริ่มต้นด้วยการดูค่าสีในแต่ละ Channel ของ RGB หากค่าสีในแต่ละ Channel ของ RGB เป็นค่าที่อยู่ระหว่าง 0-255 ให้ทำการหารค่าดังกล่าวด้วย 255 เพื่อให้ได้เป็นค่าที่อยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งเป็นค่าระดับสีของ Hue เพื่อเตรียมพร้อมในการแปลงค่าสีต่อไปตัวอย่าง ค่าระดับสีต่างๆ ของแบบจำลองสี HSV แสดงในตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2-8 แสดงค่าระดับสีใน HSV color model

สี (Color)	ค่าสี (Hue) ใน HSV
แดง	0
เหลือง	0.1667
เขียว	0.333
น้ำเงิน	0.6667

ในการแปลงค่าจะมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

$$V = \max\{R, G, B\} \tag{2-5}$$

$$\delta = \mathrm{V} - \min\{\mathrm{R}, \mathrm{G}, B\} \tag{2-6}$$

$$\mathrm{S} = \frac{\delta}{\mathrm{V}} \tag{2-7}$$

จากสมการที่ (2-5) จะเป็นการหาค่า V ซึ่งคือค่า Value โดยที่เลือกจากค่าสูงสุดของค่าที่มีอยู่ใน RGB จากนั้นทำการคำนวณโดยใช้สมการที่ (2-7) จะเป็นการหาค่า S ซึ่งคือค่า Saturation โดยที่ต้องมีการคำนวณค่า δ จากสมการที่ (2-6) ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการหาผลลัพธ์ค่าสี H หรือ Hue จำเป็นต้องมีการพิจารณาตามเงื่อนไขในสมการ (2-8), (2-9) และ (2-10) ดังต่อไปนี้

$$H = \frac{1}{6}\left(\frac{G - B}{\delta}\right) \qquad \text{ถ้า } R = V \tag{2-8}$$

$$H = \frac{1}{6}\left(2 + \frac{B-R}{\delta}\right) \qquad \text{ถ้า} \quad G = V \qquad (2\text{-}9)$$

$$H = \frac{1}{6}(4 + \frac{R-G}{\delta}) \qquad \text{ถ้า} \quad B = V \qquad (2\text{-}10)$$

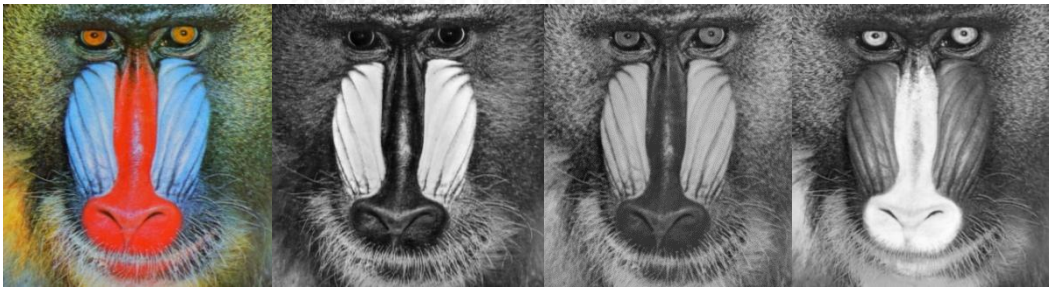
ในขั้นตอนสุดท้าย H จะมีค่าติดลบ ต้องทำการเพิ่มค่า H ด้วย 1 ถ้าในกรณีที่ค่าใน (R, G, B) มีค่า $(0,0,0)$ และในกรณีที่ $V = \delta = 0$ จะต้องกำหนดให้ (H, S, V) มีค่าเป็น $(0,0,0)$ เช่นกัน
ตัวอย่างในการคำนวณค่าสี
กำหนดค่าสีตัวอย่าง $(R, G, B) = \{0.3, 0.5, 0.6)$

$$V = \max\{0.3, 0.5, 0.6\}$$
$$\delta = V - \min\{0.3, 0.5, 0.6\} = 0.6 - 0.3 = 0.3$$
$$S = \frac{0.3}{0.6} = 0.50$$

เนื่องด้วย ค่า $B = V$ จะมีการคำนวณค่า H ดังนี้

$$H = \frac{1}{6}\left(4 + \frac{0.3-0.5}{0.3}\right) = 0.658$$

ตัวอย่างภาพที่ได้ในแบบจำลองสี RGB และ HSV แสดงดังภาพที่ 2-39



RGB Red Blue Green

HSV Hue Saturation Value

ภาพที่ 2-39 ตัวอย่างภาพในแบบจำลองสี RGB และ แบบจำลองสี HSV

2.5.6 การแปลงค่าสีจากแบบจำลองสี HSV ไปแบบจำลองสี RGB

เพื่อการแสดงผลสีที่ถูกต้องบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ แบบจำลองสี RGB เป็นสิ่งที่จำเป็น ทั้งนี้เพื่อการแสดงผลที่ถูกต้องขั้นตอนในการแปลงค่าสีจากแบบจำลองสี HSV ไปเป็นแบบจำลองสี RGB นั้นทำได้ดังต่อไปนี้ กำหนดให้ H มีค่าตั้งแต่ $0°$ ถึง $360°$ ดังในสมการที่ (2-11) กำหนดให้ค่า $\mathrm{S}_{\mathrm{HSV}}$ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ดังในสมการที่ (2-12) และค่า V มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ดังสมการที่ (2-13) จากนั้นทำการคำนวณค่า C ซึ่งเป็นค่าโครมา (Chroma) โดยใช้สมการที่ (2-14) แล้วให้ทำการคำนวณหาค่า H' ของสีนั้นโดยใช้สมการที่ (2-15) เมื่อได้ค่า H' แล้ว ทำการหาค่า X ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ของสีนั้นจากสมการที่ (2-16) คำนวณค่า m โดยใช้สมการที่ (2-18) จากนั้นทำการเลือกค่า R', G', B' ตามเงื่อนไขของ H' ในสมการที่ (2-17) เพื่อให้ได้ค่าที่จะใช้ในการเพิ่มค่าสีให้กับสีใน (R, G, B) เพื่อให้ได้ค่าสีที่ถูกต้องตามแบบจำลองสี RGB

$$H \in [0°, 360°) \tag{2-11}$$

$$S_{HSV} \in [0,1] \tag{2-12}$$

$$V \in [0,1] \tag{2-13}$$

$$C = V \times S_{HSV} \tag{2-14}$$

$$H' = \frac{H}{60°} \tag{2-15}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$X = C(1 - |H' \bmod 2 - 1|) \tag{2-16}$$

$$(R', G', B') = \begin{cases} (0,0,0) & \text{if } H \text{ is } \textit{undefined} \\ (C, X, 0) & \text{if } 0 \le H' < 1 \\ (X, C, 0) & \text{if } 1 \le H' < 2 \\ (0, C, X) & \text{if } 2 \le H' < 3 \\ (0, X, C) & \text{if } 3 \le H' < 4 \\ (X, 0, C) & \text{if } 4 \le H' < 5 \\ (C, 0, X) & \text{if } 5 \le H' < 6 \end{cases} \tag{2-17}$$

$$m = V - C \tag{2-18}$$

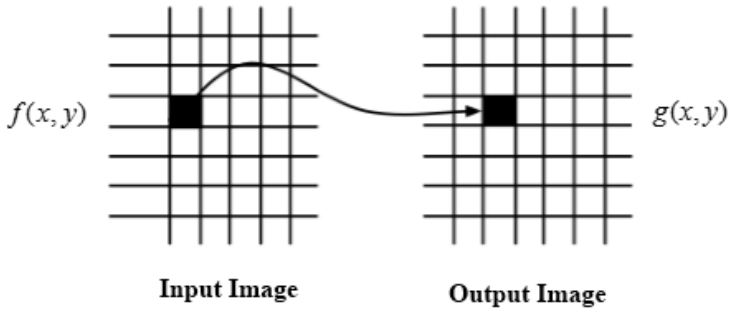
$$(R,G,B=(R^{'}+m,G^{'}+m,B^{'}+m) \quad (2\text{-}19)$$

2.6 ประเภทของการประมวลผลภาพ (Image processing)

การประมวลผลภาพดิจิตอลสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังต่อไปนี้

2.6.1 การกระทำกับจุดของภาพ (Point Processing)

การประมวลผลภาพประเภทนี้จะเป็นการปรับค่าระดับเทาของในแต่ละพิกเซลของภาพโดยจะเป็นการดำเนินการจุดต่อจุดดังแสดงในภาพที่ 2-40



ภาพที่ 2-40 การกระทำต่อจุดภาพ (Point Processing)

ซึ่งจะเป็นการกระทำเชิงพีชคณิต โดย บวก ลบ คูณ หาร หรือการกระทำทางตรรกศาสตร์ต่างๆ กับจุดในภาพต้นฉบับเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยทั่วไปการกระทำกับจุดภาพได้แก่ การปรับความเข้มของสีหรือสว่างของภาพดิจิตอล เป็นต้น

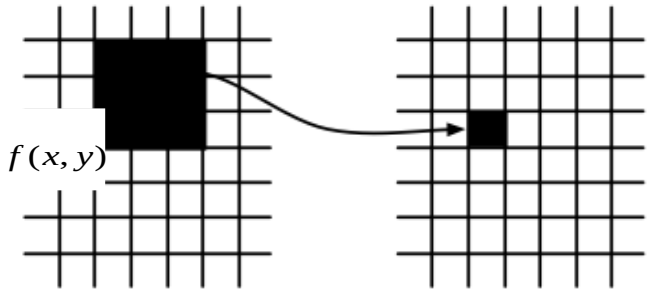
จากสมการที่ (2-20) กำหนดให้ $f\left(x_i,y_i\right)$ เป็นภาพที่นำเข้า (Input Image) และ $g\left(x_i,y_i\right)$ เป็นภาพผลลัพธ์ (Output Image)

$$g\left(x_i,y_i\right)=P\left[\,f\left(x_i,y_i\right)\right] \quad (2\text{-}20)$$

เมื่อ P เป็นการกระทำใดๆ ต่อ $f\left(x_i,y_i\right)$ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ

2.6.2 การกระทำกับภาพเฉพาะส่วน (Local Processing)

สำหรับการประมวลผลภาพแบบนี้เป็นการกระทำกับค่าระดับสีเทาในจุดของภาพผลลัพธ์จะขึ้นอยู่กับค่าระดับความเข้มของระดับสีเทาในบริเวณข้างเคียงของภาพต้นฉบับ ดังแสดงในภาพที่ 2-41



ภาพที่ 2-41 การกระทำกับภาพเฉพาะส่วน (Local Processing)

โดยที่กำหนดให้ $f(x,y)$ เป็นภาพต้นฉบับ และ $g(x,y)$ เป็นภาพผลลัพธ์ ซึ่งจะมีค่าดังแสดงในสมการที่ (2-21)

$$O(x,y) = T\left[\text{neighborhood of } I(x,y)\right] \qquad (2\text{-}21)$$

ในกระบวนการประมวลผลภาพเฉพาะบริเวณที่นิยมคือ การกรองสัญญาณในสเปเชียลโดเมนโดยที่มีชื่อเรียกว่า การคอนโวลูชัน (Convolution) คอนโวลูชันเป็นขั้นตอนของการกรองสัญญาณแบบ linear filtering ซึ่งจะมีการกำหนดมาส์ค (Mask) ที่ใช้ในการกรองสัญญาณภาพ และนำมาส์คมาเป็นตัวกำหนดพื้นที่ ที่จะทำการคำนวณ โดยที่ทำการคูณค่าในตำแหน่งที่อยู่ ในตำแหน่งเดียวกันกับมาส์ค จากนั้นทำการบวกรวมค่าในทุกๆ ตำแหน่ง ตัวอย่างการคอนโวลูชัน (Convolution)

กำหนดเมตริกซ์ A เป็นเมตริกซ์ของภาพ แสดงในสมการที่ (2-22)

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & -1 \\ 6 & -5 & 4 & 3 \\ -2 & 4 & 6 & 7 \\ 5 & 0 & 1 & 3 \end{bmatrix} \qquad (2\text{-}22)$$

กำหนดให้ B เป็นมาส์ค ที่ใช้เป็น Convolution kernel ดังแสดงในสมการที่ (2-23)

$$B = \begin{bmatrix} 1 & -3 & 5 \\ -2 & 4 & 6 \\ 7 & 8 & -9 \end{bmatrix} \qquad (2\text{-}23)$$

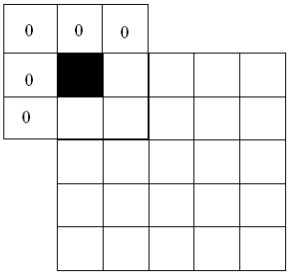
ในการคอนโวลูชันเริ่มด้วยการหมุน (Rotate) เมตริกซ์ B ไป $180°$ ซึ่งจะทำให้ได้ เมตริกซ์ C ดังสมการที่ (2-24)

$$C = \begin{bmatrix} -9 & 8 & 7 \\ 6 & 4 & -2 \\ 5 & -3 & 1 \end{bmatrix} \qquad (2\text{-}24)$$

จากนั้นทำการหาจุดกึ่งกลางของเมตริกซ์ C ซึ่งตำแหน่งศูนย์กลางของเมตริกซ์ C จะอยู่ที่ (2,2) จากนั้นนำ เมตริกซ์ C วางทาบไว้บนเมตริกซ์ A โดยที่เริ่มที่ตำแหน่ง (1,1) ให้ตำแหน่ง(2,2) ของ C ตรงกับตำแหน่ง (1,1) ของเมตริกซ์ A จากนั้นทำการคูณค่าที่อยู่ซ้อนทับ แล้วทำการนำผลคูณรวมกันจะได้เป็นค่า Convolution ของตำแหน่ง (1,1) ของเมตริกซ์ A ซึ่งคือค่าในตำแหน่ง (1,1) ของ D ซึ่งได้จาก D(1,1)=(1)(4)+(2)(-2)+(6)(-3)+(-5)(1)=-23 จากนั้นทำการเลื่อนไปยังตำแหน่งต่อไปของเมตริกซ์ A ในตำแหน่ง (1,2) ซึ่งต้องดำเนินการไปเรื่อยๆจนครบทั้งภาพ ซึ่งตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทำคอนโวลูชันระหว่างเมตริกซ์ A และ เมตริกซ์ B แสดงดังสมการที่ (2-25)

$$D = \begin{bmatrix} -23 & 57 & -8 & 25 \\ 66 & 8 & 24 & -50 \\ -18 & -24 & 78 & -6 \\ 32 & 36 & -25 & 104 \end{bmatrix} \qquad (2\text{-}25)$$

เนื่องจากพื้นที่ของมาส์คในการทำคอนโวลูชันมีการวางโดยคำนึงถึงจุดกึ่งกลางของมาส์ค ดังนั้นในกรณีที่กระทำบริเวณของขอบภาพซึ่งจะต้องมีการมองข้ามส่วนของขอบ โดยทำการแทนค่าบริเวณของมาส์คที่ไม่มีการซ้อนทับด้วย 0 และมีการคำนวณเฉพาะในส่วนที่ซ้อนทับเท่านั้นซึ่งกระบวนนี้เรียกว่าการทำ Zero Padding ตัวอย่างการทำ Zero Padding ดังภาพที่ 2-42



ภาพที่ 2-42 แสดงการทำ Zero Padding

2.6.3 การกระทำกับภาพทั้งหมด (Global Processing)

การประมวลผลภาพประเภทนี้ ระดับค่าสีเทาของภาพในจุดของผลลัพธ์จะขึ้นอยู่กับระดับค่าสีเทาของทั้งภาพ กระบวนการนี้ ได้แก่ การทำเทรสโฮลดิ้ง (Thresholding) และการทำ Histogram Equalization ซึ่งเป็นการประมวลผลกับภาพทั้งหมด (Global Processing) เริ่มต้นด้วย

การกำหนดให้ $I(x,y)$ เป็นภาพที่นำเข้าและ $O(x,y)$ เป็นผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่งค่าของจุดภาพของ $O(x,y)$ มีค่าดังสมการที่ (2-26) โดยค่าใน $f(x,y)$ จะใช้ร่วมกันทั้งภาพ

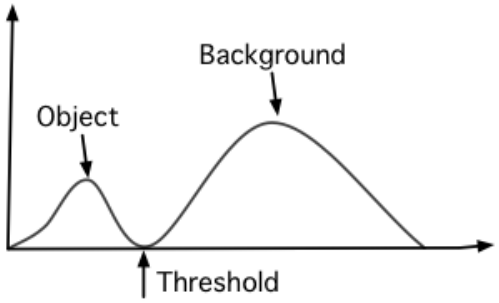
$$O(xy) = G\,[\,f(x,y)\,]$$

(2-26)

ในการกำหนดเทรสโชลด์ (Thresholding) เทคนิคนี้ใช้วิธีการแบ่งแยกวัตถุ (Object) ที่สนใจกับพื้นหลัง (Background) ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญ ที่ใช้ในการสร้างภาพไบนารี โดยที่ค่าเทรสโชลด์จะมีผลต่อภาพผลลัพธ์ในกรณีที่ กำหนดค่าให้น้อยหรือมากเกินไป จะทำให้สูญเสียรายละเอียดบางส่วนของวัตถุที่สนใจ และอีกทั้งยังส่งผลให้มีสัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งโดยทั่วไปการกำหนดเทรสโชลด์จะพิจารณาจากค่าฮิสโตรแกรมของภาพ

2.6.3.1 การหาค่าเทรสโชลด์หนึ่งระดับ (Single Thresholding)

เป็นการแบ่งข้อมูลตามการกระจายของข้อมูลเมื่อพิจารณาจาก ฮิสโตรแกรม ซึ่งการเลือกค่าเทรสโชลด์จะใช้ค่าที่ต่ำสุดที่อยู่ระหว่างกลุ่มข้อมูลสองกลุ่ม โดยค่าที่เลือกจะต้องเหมาะสมที่สุด เพื่อให้ภาพผลลัพธ์ที่ได้ปราศจากสัญญาณรบกวน ดังภาพที่ 2-43



ภาพที่ 2-43 การเลือกค่าเทรสโชลด์จากภาพฮิสโตรแกรม

เมื่อมีการสร้างฮิสโตแกรมจากภาพระดับสีเทาของภาพต้นฉบับซึ่งจะได้ข้อมูลทั้งสิ้น 2 กลุ่มคือข้อมูลที่เป็นของวัตถุและข้อมูลพื้นหลัง จากนั้นทำการเลือกค่าที่จะทำเทรสโชลด์โดยมีการกำหนดค่า (T) ระดับความเข้มสีเทาที่ใช้ในการทำเทรสโชลด์ ดังสมการที่ (2-27) ที่ซึ่ง $f(x,y)$ เป็นระดับสีเทาในตำแหน่ง (x,y) และ $p(x,y)$ เป็นค่าระดับสีเทาที่อยู่กึ่งกลางของกลุ่มข้อมูลในตำแหน่ง (x,y)

$$T = T\,[x,y,(p(x,y),\,f(x,y))]$$

(2-27)

สำหรับภาพผลลัพธ์ $g(x,y)$ ที่ได้ จะมีค่าดังสมการที่ (2-28) โดยส่วนที่เป็นวัตถุจะมีค่าเป็น 1 และ 0 แทนค่าของภาพที่เป็นพื้นหลัง

$$g(x,y)=\begin{cases}1 & if\ f(x,y)>T\\ 0 & if\ f(x,y)\le T\end{cases} \qquad (2\text{-}28)$$

2.6.3.2 การหาค่าเทรสโชลด์หลายระดับ (Multilevel Thresholding)

ในการทำการเทรสโชลด์แบบนี้มีการกำหนดค่าที่ใช้ในการทำเทรสโชลด์มากกว่า 1 ค่า โดยขั้นตอนในการทำเริ่มจากการกำหนดระดับในเทรสโชลด์ตามระดับที่สนใจแทนด้วย (T1, T2) โดยค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ได้จากการพิจารณาฮิสโตรแกรม ทำการกำหนดให้ $I(x,y)$ คือภาพต้นฉบับและ $O(x,y)$ เป็นภาพผลลัพธ์โดยได้จากพิจารณาค่าตามเงื่อนไขที่ระบุในสมการที่ (2-29)

$$O(x,y)=\begin{cases}1 & if\ I(x,y)<T_1\\ I(x,y) & if\ T_1\le I(x,y)\le T_2\\ 1 & if\ I(x,y)>T_2\end{cases} \qquad (2\text{-}29)$$

ซึ่งภาพผลลัพธ์จากการกำหนดค่าเทรสโชลด์ระดับเดียว (Single Thresholding) และการกำหนดค่าเทรสโชลด์หลายระดับ (Multilevel Thresholding) แสดงดังภาพที่ 2-44

(1) (2)

ภาพที่ 2-44 ภาพผลลัพธ์จาก Single Thresholding และ Multilevel Thresholding

จากภาพที่ 2-44 พบว่า (1) จะเป็นการกำหนดค่าเทรสโชลด์ระดับเดียวจะได้วัตถุที่มีสีดำและสีขาวเท่านั้นส่วนในภาพ (2) จะเป็นการกำหนดค่าเทรสโชลด์หลายระดับ จากผลลัพธ์จะมีระดับเทาอยู่ 2 ระดับบนวัตถุ และพื้นหลังที่เป็นสีขาว

2.7 การแปลงข้อมูลภาพสองมิติ (Two Dimension Geomatric Transformation)

ในการแปลงข้อมูลภาพนี้จะหมายถึงการปรับเปลี่ยนตำแหน่ง การเลื่อนภาพ การหมุนภาพ การบิดภาพ [11] ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำเป็นมากในกระบวนการประมวลผลภาพ ทั้งนี้การแปลงข้อมูล ที่กล่าวในหัวข้อนี้จะเป็นการแปลงข้อมูลในภาพสองมิติเท่านั้น

2.7.1 การเลื่อนจุดพิกัดภาพ (Translation)

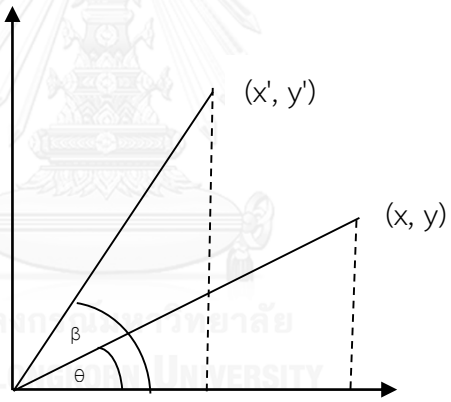
ในการเลื่อนตำแหน่งภาพจะเป็นการเลื่อนตามแนวแกน x ซึ่งจุด x จะเลื่อนไปที่ตำแหน่ง x' และในแนวแกน y จุด y จะเลื่อนไปที่จุด y' โดยที่ในการเลื่อนแต่ละจุดจะเป็นการบวกเพิ่มค่าระยะทาง คือ T_x และ T_y ในการเลื่อนจะใช้ Coordinate เดิมทำให้ตำแหน่งใหม่ของภาพสอดคล้องกับตำแหน่งของภาพเดิม ในการเลื่อนภาพจะได้จากสมการที่ (2-30) และ (2-31)

$$x' = x + T_x \qquad (2\text{-}30)$$

$$y' = y + T_y \qquad (2\text{-}31)$$

2.7.2 การหมุนภาพ (Rotation)

การหมุนภาพเป็นวิธีในการปรับตำแหน่งของภาพวัตถุจากตำแหน่ง (x,y) ไปยังภาพในตำแหน่ง(x', y') ดังภาพที่ 2-45



ภาพที่ 2-45 การหมุนภาพจากจุดกำเนิด

ซึ่งการหมุนภาพจำเป็นต้องทำที่จุดหมุนเสมอ ผลลัพธ์ที่ได้จากการหมุนภาพจะยังคงมีรูปร่างลักษณะและขนาดที่เหมือนกับภาพต้นฉบับแต่ตำแหน่งของภาพ จะเปลี่ยนไป

ในกระบวนการหมุนภาพขนาดของมุมที่หมุนแทนด้วย β และในที่นี้ให้มีจุดหมุนอยู่ที่จุดกำเนิดมุมโดยที่ θ เป็นขนาดมุมที่ได้จากการวัดตามแกนนอนจนถึงจุด (x,y) ซึ่งจะได้สมการที่มีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$x' = r\cos\theta\cos\beta - r\sin\theta\sin\beta \qquad (2\text{-}32)$$

$$y' = r\sin\theta\cos\beta - r\cos\theta\sin\beta \qquad (2\text{-}33)$$

กำหนดให้ r คือระยะทางจากจุดกำเนิดถึงจุดที่พิจารณา ได้ว่า

$$x = r\cos\theta \quad (2\text{-}34)$$

$$y = r\sin\theta \quad (2\text{-}35)$$

จะได้สมการใหม่ดังสมการที่ (2-36) และ (2-37)

$$x' = x\cos(\beta) - y\sin(\beta) \quad (2\text{-}36)$$

$$y' = x\sin(\beta) + y\cos(\beta) \quad (2\text{-}37)$$

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดการเพิ่มความจุข้อมูลบาร์โค้ดด้วยการออกแบบบาร์โค้ดสี มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.8.1 High Capacity Colored Two Dimensional Codes

โดย Antonio Grillo*, Alessandro Lentini*, Marco Querini* และ Giuseppe F.Italiano*, 2010

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอ แนวคิดการเพิ่มความจุข้อมูลในบาร์โค้ด 2 มิติ โดยเลือกใช้คิวอาร์โค้ดในการศึกษาและออกแบบ โดยการออกแบบใช้หลากหลายสีแทนสีขาวดำแบบเดิม แล้วแสดงการเปรียบเทียบความจุข้อมูลระหว่างคิวอาร์โค้ดสีขาวดำกับคิวอาร์โค้ดสี พบว่า เมื่อเลือกใช้ 4 สี เข้ารหัสคิวอาร์โค้ดจะเพิ่มความจุข้อมูลได้ 2 เท่า ของคิวอาร์โค้ดขาวดำ เมื่อเลือกใช้ 8 สี เข้ารหัสคิวอาร์โค้ดจะเพิ่มความจุข้อมูลได้ 3 เท่า ของคิวอาร์โค้ดขาวดำ และเมื่อเลือกใช้ 16 สี เข้ารหัสคิวอาร์โค้ดจะเพิ่มความจุข้อมูลได้ 4 เท่า ของคิวอาร์โค้ดขาวดำ ได้สมการคำนวณหาค่าจำนวนบิตข้อมูลต่อโมดูลของคิวอาร์โค้ด คือ BpM=log2(number of colors) และงานวิจัยฉบับนี้ทดลองออกแบบตัวอย่างคิวอาร์โค้ดสีขึ้นมา โดยนำเสนอเพียงประสิทธิภาพการเก็บข้อมูลที่เพิ่มขึ้น และเวลาในการประมวลผล จากการทดลองถอดรหัส 100 ภาพต่อเวอร์ชัน ด้วยเครื่องมือ Linux Slackware 13.0 OS running on 1.73 GHz Intel dual core with 1 GB of RAM ผลการทดลอง พบว่าจำนวนสีที่นำมาเข้ารหัสคิวอาร์โค้ด และเวอร์ชันของคิวอาร์โค้ด แปรผันตรงกันกับเวลาในการประมวลผลภาพและค่าความผิดพลาด โดยการประมวลผลภาพขึ้นอยู่กับค่าความละเอียดในการแสดงผล และจากการทดลองพบว่าคิวอาร์โค้ดเวอร์ชันสูงจะต้องแสดงผลที่ความละเอียดสูง จึงจะสามารถถอดรหัสภาพได้

2.8.2 CQR CODES: COLORED QUICK-RESPONSE CODES

โดย By Max E. Vizcarra Melgar, Alexandre Zaghetto, Bruno Macchiavello, Anderson C.A.Nascimento, 2012

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอ แนวคิดการออกแบบให้ใช้สีแทนสีขาวดำในการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ด โดยใช้สี เขียว เหลือง แดง ขาว ดำ ในการเข้ารหัส ดังภาพที่ 2-46

ภาพที่ 2-46 คิวอาร์โค้ดสีขนาด 1.3 cm × 1.3 cm

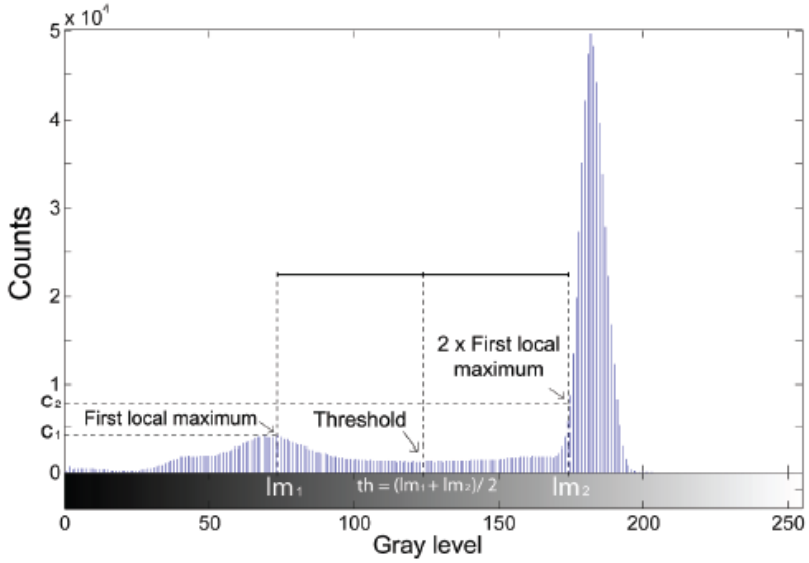
อัลกอริทึมในการถอดรหัส คือ

```
For i=1 to C.height
For j=1 to C.width
        MaxC=max(C(I,j,:))
        Min=min(C(I,j,:))
        D=MaxC-MinC
        If D>th
                If MaxC==C(I,j,R)
                  C(I,j,RGB)={255,0,0}
          Else If MaxC==C(I,j,R)
                  C(I,j,RGB)={0,255,0}
                Else
                  C(I,j,RGB)={0,0,255}
        Else
          If C(I,j,RGB)<{th,th,th}
                  C(I,j,RGB)={0,0,0}
          Else
                  C(I,j,RGB)={255,0,0}
```

โดยกำหนดให้

C คือรูป CQR Code

th คือค่า threshold คำนวณได้จาก th = (lm1+lm2)/2 ดังภาพที่ 2-47



ภาพที่ 2-47 แสดงการคำนวนค่า Threshold

ซึ่ง lm1 คือระดับสีเทาที่ให้ค่าสูงสุดในฮิสโตแกรมภาพ ที่จุด C1 บนภาพ
และ lm2 คือระดับสีเทา ที่จุดซึ่ง C2 = 2 x C1 ที่ให้ค่าน้อยสุด ดังภาพที่ 2-47
จากการทดลองถอดรหัส 15 ภาพถ่าย (snapshots) ที่แตกต่างกัน จากตัวอย่าง 120 ภาพ ที่พิมพ์ออกมาขนาด 1.3 cm x 1.3 cm ได้ผล ดังตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-9 แสดงผลการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี

CQR Code	Correctly decoded	Average symbol error (%)
1	15	0.97
2	15	0.53
3	14	5.49
4	15	8.79
5	15	8.24
6	13	14.8
7	15	7.25
8	15	3.04

2.8.3 PERFORMANCE OF A COLOR 2D BARCODE AS A PERVASIVE COMPUTING TOOL

โดย HirokoKato, 2010
งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอ เครื่องมือในการประเมินประสิทธิภาพการอ่านบาร์โค้ดสีและความสามารถในการถอดรหัสบาร์โค้ดสีได้แม้อยู่ในสภาพที่ผิดเพี้ยนไป
โดยการประเมินประสิทธิภาพการอ่านค่าบาร์โค้ดสี ประเมินจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1.อัตราการอ่านได้ในครั้งแรก (The first read rate (FRR))
ดังสมการที่ 2-38

$$\mathrm{FRR} = \frac{Number\ of\ successful\ first\ reads}{Number\ of\ attempted\ first\ reads} \qquad (2\text{-}38)$$

2.เวลาในการถอดรหัส (Decoding time)
3.ระยะห่างสูงสุดในการสแกนภาพคิวอาร์โค้ด (Maximum legible distance of sample symbols) ทดลองที่ระยะ 20.0, 16.5, 13.5 และ 9.5 cm
4.อัตราการถอดรหัสได้ (Data read rates (DRR)) ดังสมการที่ 2-39

$$\mathrm{FRR} = \frac{Number\ of\ successfully\ decoded\ data}{Number\ of\ encoded\ alphanumerical\ data} \qquad (2\text{-}39)$$

2.8.4 The Use of Alignment Cells in MMCC Barcode

โดย Siong Khai Ong*, Douglas Chai† และ Alexander Rassau‡, 2010
งานวิจัยฉบับนี้ ต้องการแก้ไขผลที่เกิดจากการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสีที่ผิดพลาด ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดขณะสแกนด้วยกล้องบนโทรศัพท์มือถือ อาจเกิดการบิดเบี้ยว ผิดรูปทำให้สแกนค่าสีผิดตำแหน่ง โดยทำการทดลองถอดรหัสแบบไม่มีการวางแนวขณะสแกนและถอดรหัสแบบมีการวางแนวขณะสแกน จากการทดลองถอดรหัสบาร์โค้ดสี โดยใช้ Visual Studio .NET Compact Framework environment with C# บนอุปกรณ์ HTC Touch Diamond, Windows Mobile 6.1 phone, ความละเอียดกล้อง 3.2 mega pixel พบว่าการวางแนวขณะถอดรหัสด้วยกล้องจากโทรศัพท์มือถือ มีประสิทธิภาพต่อการถอดรหัสบาร์โค้ดมากกว่า และหากปรับปรุงการถอดรหัสบาร์โค้ดสีให้ประสิทธิภาพ จะส่งผลต่อการเพิ่มความจุในบาร์โค้ดได้

2.8.5 A PROCESS TO REMOVE SCRATCHES FROM QR CODE IMAGES

Chulalongkorn University

โดย นายกมล หอมขจร, รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต วงศ์ประทีป, 2012
งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอ กระบวนการขจัดรอยขีดข่วนบนภาพคิวอาร์โค้ด โดยมีขั้นตอนดังนี้
1. แปลงภาพจากแบบจำลองสี RGB ไปยัง HSV
2. แยกองค์ประกอบภาพ
3. ลบรอยขีดข่วน
4. กรองสัญญาณรบกวน
5. แบ่งพื้นที่ย่อยของภาพคิวอาร์โค้ด
6. เติมเต็มโมดูลในภาพคิวอาร์โค้ด
7. ถอดรหัสภาพคิวอาร์โค้ด

จากการทดลองพัฒนากระบวนการขจัดรอยขีดข่วนบนภาพคิวอาร์โค้ดด้วย MathLab พบว่าคิวอาร์โค้ดที่มีรอยขีดข่วนสามารถถอดรหัสได้ โดยการปรับปรุงภาพตามกระบวนการขจัดรอยขีดข่วนบนภาพคิวอาร์โค้ดก่อนทำการถอดรหัส ซึ่งใช้เวลาในการประมวลผลภาพเฉลี่ยเพียง 20-60 ms

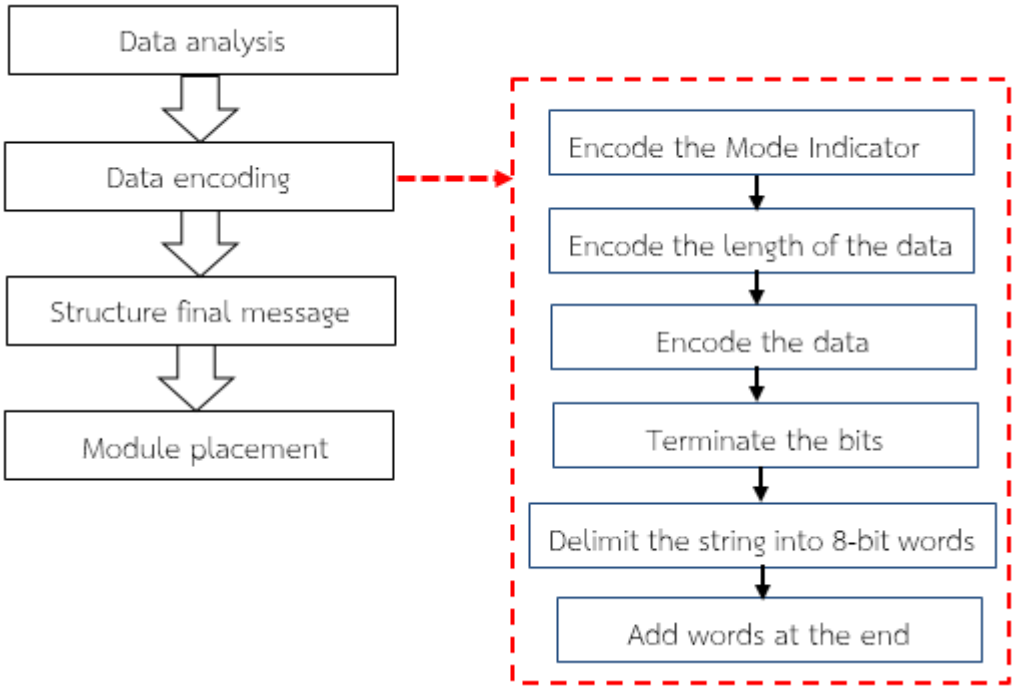
บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

คิวอาร์โค้ดเป็นภาพสัญลักษณ์แทนข้อมูลที่มีสีขาวดำ หากต้องการทำให้ความจุเพิ่มขึ้นจะต้องเข้ารหัสภาพในเวอร์ชันที่สูงขึ้น จำนวนโมดูลในภาพมีมากขึ้น เป็นผลให้ภาพมีขนาดใหญ่ขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาคิวอาร์โค้ดสีเพื่อเพิ่มความจุข้อมูล แต่ยังคงขนาดภาพเท่าเดิม โดยนำคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 1 เป็นเวอร์ชันต้นแบบในการพัฒนาคิวอาร์โค้ดสี การดำเนินงานวิจัยจะประกอบไปด้วย การเข้ารหัสและถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี โดยการเข้ารหัส จะทำการแปลงค่าข้อมูลอินพุทเป็นไบนารี ตามขั้นตอนการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ด จากนั้นแปลงค่าไบนารีเป็นเลขฐาน 8 (กรณีเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี โดยใช้สีที่แตกต่างกัน 8 สี) หรือเลขฐาน 16 (กรณีเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี โดยใช้สีที่แตกต่างกัน 16 สี) แล้วแปลงข้อมูลเป็นค่าสี เติมลงโมดูลภาพคิวอาร์โค้ด ในทางกลับกันการถอดรหัสภาพคิวอาร์โค้ด จะทำการอ่านค่าสีจากโมดูลคิวอาร์โค้ด จากนั้นแปลงค่าสีเป็นข้อมูลเลขฐาน 8 (กรณีถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี ที่แตกต่างกัน 8 สี) หรือเลขฐาน 16 (กรณีถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี ที่แตกต่างกัน 16 สี) แล้วแปลงข้อมูลเป็นไบนารี จากนั้นทำการถอดรหัสข้อมูล ตามขั้นตอนการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดแบบขาวดำ ต่อไป

3.1 ภาพรวมของงานวิจัย

3.1.1 การเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี

ภาพรวมทั้งหมดของการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี แสดงดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี

ขั้นตอนการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี มีดังต่อไปนี้

1. Data analysis เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ต้องการเข้ารหัส

ความจุของคิวอาร์โค้ดถูกกำหนดจากเวอร์ชัน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกพัฒนาจากคิวอาร์โค้ดเวอร์ชันที่ 1 สามารถเก็บข้อมูลได้ 208 โมดูล และสามารถเก็บข้อมูลแต่ละประเภทได้สูงสุด ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ค่าความจุข้อมูลสูงสุดของข้อมูลแต่ละประเภทที่นำมาเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี

ประเภทคิวอาร์โค้ดสี	ความจุข้อมูลสูงสุด (บิต)	ตัวเลข (ตัว)	ตัวอักษรและตัวเลข (อักขระ)	ตัวอักษร Kanji (อักขระ)	Byte (byte)
คิวอาร์โค้ด 8 สี	624	186	112	48	78
คิวอาร์โค้ด 16 สี	832	249	306	64	104

2. Data encoding แปลงข้อมูลที่รับเข้ามาให้อยู่ในรูปของบิต [0, 1] โดยมีขั้นตอนย่อย ดังนี้

2.1 Encode the Mode Indicator เป็นการเข้ารหัสเพื่อระบุประเภทข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 แสดงรหัสประเภทข้อมูล

ประเภทข้อมูล	รหัสประเภทข้อมูล
ตัวเลข	0001
ตัวอักษรและตัวเลข	0010
Byte	0100
ตัวอักษร Kanji	1000

2.2 Encode the length of the data เป็นการเข้ารหัสความยาวของข้อมูล โดยแปลงจำนวนข้อมูลเป็นไบนารีขนาด 9 บิต

2.3 Encode the data วิธีการเข้ารหัสข้อมูลแต่ละประเภทแตกต่างกัน ดังนี้

- ข้อมูลประเภทตัวเลข (0-9) จะแบ่งตัวเลขออกเป็นกลุ่ม กลุ่มละ 3 ตัว กรณีที่ค่าข้อมูลแต่ละกลุ่มขึ้นต้นด้วย 0 ให้ตัด 0 ออก แล้วพิจารณาเฉพาะค่าข้อมูลที่เหลืออยู่ จากนั้นแปลงข้อมูลที่แบ่งกลุ่มเป็นข้อมูลไบนารีขนาด 10 บิต กรณีที่ได้ผลลัพธ์ไม่ถึง 10 บิต ให้เติม 0 ลงไปให้ครบ
- ข้อมูลประเภทตัวอักษรและตัวเลข จะแบ่งตัวอักษรออกเป็นคู่ โดยการเข้ารหัสจะแปลงค่าตัวอักษรเป็นตัวเลข ดังแสดงในภาคผนวก

ตารางที่ ก-1 จากนั้นนำค่าตัวเลขตัวที่ 1 คูณด้วย 45 แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ บวกด้วยค่าตัวเลขตัวที่ 2 (กรณีถอดรหัสตัวอักษรเพียงตัวเดียวให้แปลงเป็นค่าตัวเลข แล้วแปลงเป็นไบนารีได้เลย) จากนั้นนำผลลัพธ์สุดท้ายแปลงเป็นไบนารีขนาด 11 บิต กรณีที่ได้ผลลัพธ์ไม่ถึง 11 บิต ให้เติม 0 ลงไปให้ครบ

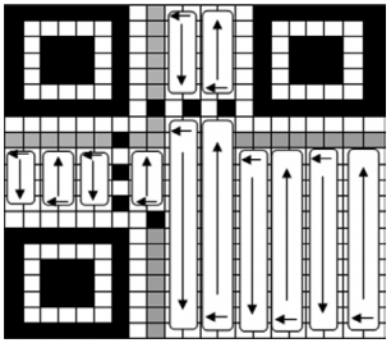
- ข้อมูลประเภทตัวอักษร Kanji การเข้ารหัสจะแปลงตัวอักษรเป็น Byte จากนั้นแปลงข้อมูลเป็นไบนารี โดย 1 ตัวอักษร Kanji จะถูกแปลงเป็นไบนารีขนาด 13 บิต กรณีที่ได้ผลลัพธ์ไม่ถึง 13 บิต ให้เติม 0 ลงไปให้ครบ
- ข้อมูล Byte (8 บิต) การเข้ารหัส จะแบ่งข้อมูลไบนารีออกเป็น 8 บิต

2.4 Terminate the bits ทำการใส่บิตปิดท้าย “0000” เป็นการแสดงว่าข้อมูลนั้นสิ้นสุด

2.5 Delimit the string into 8-bit words ทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 8 บิต กรณีที่ข้อมูลชุดใดๆ มีขนาดน้อยกว่า 8 บิต ให้เติมศูนย์ให้ครบ 8 bit

2.6 Add words at the end ทำการใส่ข้อมูล (**11101100, 00010001**) ไบนารีซ้ำซ้อน (Pad Characters) เพื่อเพิ่มความยาวข้อมูล กรณีที่ข้อมูลไบนารีที่ได้มีความยาวสั้นที่เกินกว่า Data Codewords ที่กำหนดไว้ในแต่ละเวอร์ชัน

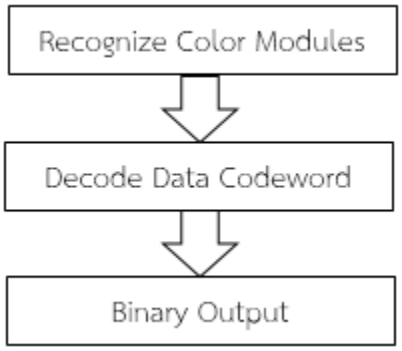
3. Structure final message ทำการเรียงข้อมูลไบนารีที่ได้จากการขั้นตอนที่ 2.1-2.5 ตามลำดับการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี จะทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 บิต (กรณีเข้ารหัสคิวอาร์โค้ด 8 สี) แล้วแปลงข้อมูลเป็นเลขฐาน 8 หรือจะทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 4 บิต (กรณีเข้ารหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี) แล้วแปลงข้อมูลเป็นเลขฐาน 16 จากนั้นเลือกสีที่เหมาะสมแทนค่าข้อมูลที่เข้ารหัสเพื่อเรียงลงในโมดูลคิวอาร์โค้ด
4. Module placement in matrix ทำการเรียงข้อมูลลงในโมดูล โดยเริ่มบันทึกข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 จากล่างขึ้นบน ใช้ขนาดความกว้างทีละ 2 โมดูล และเริ่มจากตำแหน่งมุมล่างขวาหรือพิกัด (20,20) สำหรับคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 1 ดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 ทิศทางการเรียงข้อมูลลงในโมดูลคิวอาร์โค้ด

3.1.2 การถอดรหัสคิวอาร์โค้ด

ภาพรวมทั้งหมดของการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี แสดงดังภาพที่ 3-3 การถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสีใช้ Zxing Library [17] ซึ่งเป็นโอเพนซอร์ส โดยพัฒนาฟังก์ชันการอ่านค่าสีจากโมดูลคิวอาร์โค้ด

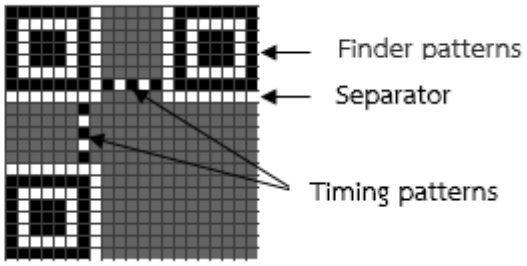


ภาพที่ 3-3 ขั้นตอนการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี

ขั้นตอนการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี มีดังต่อไปนี้

1. **Recognize Color Modules**

การรับค่าภาพคิวอาร์โค้ดสีด้วยกล้องและทำการประมวลผลภาพเพื่ออ่านค่าสีในแต่ละโมดูลของคิวอาร์โค้ดสี โดยเริ่มต้นจากการอ่านค่า Function pattern ซึ่งประกอบด้วย Finder patterns, Separator และ Timing patterns เพื่อให้ได้ตำแหน่งของคิวอาร์โค้ด ดังภาพที่ 3-4 (รายละเอียดในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.4)



ภาพที่ 3-4 แสดงตำแหน่ง Function patterns ของคิวอาร์โค้ด

2. **Decode Data Codeword**

การถอดรหัสข้อมูลค่าสีแปลงเป็นข้อมูลเลขฐาน 8 (กรณีถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 8 สี) หรือถอดรหัสข้อมูลค่าสีแปลงเป็นข้อมูลเลขฐาน 16 (กรณีถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี) แล้วแปลงข้อมูลเป็นไบนารี

3. **Binary Output**

การนำข้อมูลไบนารีที่ได้ ถอดรหัสประเภทข้อมูลซึ่งอ่านได้จาก 4 บิตแรก และค่าความยาวข้อมูลซึ่งอ่านได้จาก 9 บิตถัดมา จากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็น 8 บิต แล้วถอดรหัสตามแต่ละประเภทข้อมูล

3.2 แนวทางการออกแบบคิวอาร์โค้ดสี

3.2.1 การเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี

เมื่อทำการเข้ารหัสอินพุทข้อมูลตามมาตรฐานการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดจนได้ Structure final message แล้ว งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางในการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 บิต (กรณีเข้ารหัสคิวอาร์โค้ด 8 สี) แล้วแปลงข้อมูลเป็นเลขฐาน 8 หรือจะทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 4 บิต (กรณีเข้ารหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี) แล้วแปลงข้อมูลเป็นเลขฐาน 16 จากนั้นเลือกสีที่เหมาะสมแทนค่าข้อมูลที่เข้ารหัสเพื่อเรียงลงในโมดูลคิวอาร์โค้ด ดังนี้

การเลือกสีในแบบจำลองสี HSV

งานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองสี HSV ซึ่งมี 3 คุณสมบัติของภาพ ที่ต้องพิจารณา คือ ค่า Hue ค่า Saturation และค่า Value ซึ่งกำหนดการเลือกค่าสี โดยให้

ค่าสีขาว มีค่า Saturation=0, Value=100, Hue เป็นค่าใดก็ได้

ค่าสีดำ มีค่า Value=0, Saturation และ Hue เป็นค่าใดก็ได้

ค่าโทนสีเทา ทุกค่าจะมีค่า Hue=0, Saturation=0 แตกต่างกันที่ค่า Value โดยงานวิจัยนี้ มีหลักในการคำนวณค่า Value จากการหาช่วงของค่า Value ดังสมการที่ (3-1)

$$\mathrm{Vr} = \frac{\mathrm{Vmax} - \mathrm{Vmin}}{\mathrm{n}} \qquad (3\text{-}1)$$

กำหนดให้

Vr = ช่วงของค่า Value ที่ต้องการหาโทนสีเทา

Vmax = ค่า Value สูงสุด

Vmin = ค่า Value ต่ำสุด

n = จำนวนค่า Value ของโทนสีเทาที่ต้องการหา

เมื่อได้ช่วงของค่า Value แล้ว หาค่า Value ของแต่ละโทนสีเทา โดยคำนวณจากสมการที่ (3-2)

$$\mathrm{V}i = \frac{\mathrm{Vr}}{2} + (i * Vr) \qquad (3\text{-}2)$$

กำหนดให้

Vi = ค่า Value ของโทนสีเทา โดย i=0,..,n-1

ตัวอย่างการหาค่าโทนสีเทา 2 สี

$$\mathrm{Vr} = \frac{100 - 0}{2}$$

จะได้ Vr=50 ทำการหา Vi โดย i=0,1 แทนค่า Vr ในสมการที่ (3-2) จะได้

$$\mathrm{V0} = \frac{50}{2} + (0 * 50)$$

$$V1 = \frac{50}{2} + (1 * 50)$$

จะได้สีเทาในแบบจำลองสี HSV ที่แตกต่างกัน 2 สี โดยมีค่าดังนี้ [S=0, H=0, V=25], [S=0, H=0, V=75]

และค่าโทนสี ทุกค่าจะมีค่า Saturation=100, Value=100 แตกต่างกันที่ค่า Hue โดยงานวิจัยนี้ มีหลักในการคำนวณค่า Hue จากการหาช่วงของค่า Hue ดังสมการที่ (3-3)

$$Hr = \frac{Hmax - Hmin}{n} \quad (3\text{-}3)$$

กำหนดให้

Hr = ช่วงของค่า Hue ที่ต้องการหาโทนสี

Hmax = ค่า Hue สูงสุด

Hmin = ค่า Hue ต่ำสุด

n = จำนวนค่า Hue ของโทนสีที่ต้องการหา

เมื่อได้ช่วงของค่า Hue แล้ว หาค่า Hue ของแต่ละโทนสี โดยคำนวณจากสมการที่ (3-4)

$$Hi = \frac{Hr}{2} + (i * Hr) \quad (3\text{-}4)$$

กำหนดให้

Hi = ค่า Hue ของโทนสี โดย i=0,..,n-1

ตัวอย่างการหาค่าโทนสี 6 สี

$$Hr = \frac{360 - 0}{6}$$

จะได้ Hr=60 ทำการหา Hi โดย i=0,1,2,3,4,5 แทนค่า Hr ในสมการที่ (3-4) จะได้

$$H0 = \frac{60}{2} + (0 * 60)$$

$$H1 = \frac{60}{2} + (1 * 60)$$

$$H2 = \frac{60}{2} + (2 * 60)$$

$$H3 = \frac{60}{2} + (3 * 60)$$

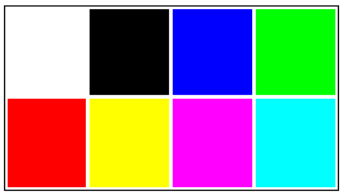
$$H4 = \frac{60}{2} + (4 * 60)$$

$$H5 = \frac{60}{2} + (5 * 60)$$

จะได้สีในแบบจำลองสี HSV ที่แตกต่างกัน 6 สี โดยมีค่าดังนี้ [S=100, H=30, V=100], [S=100, H=90, V=100], [S=100, H=150, V=100], [S=100, H=210, V=100], [S=100, H=270, V=100], [S=100, H=330, V=100]

เมื่อได้ค่าสีที่ต้องการครบแล้ว ทำการกำหนดค่าสีต่างๆ กับค่าข้อมูลที่นำมาเข้ารหัสเพื่อเรียงข้อมูลลงในโมดูลคิวอาร์โค้ด ตัวอย่างสีที่ใช้เข้ารหัสคิวอาร์โค้ด 8 สี โดยใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 6 สี แสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 การกำหนดค่าข้อมูลกับค่าสี 8 สี โดยใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 6 สี

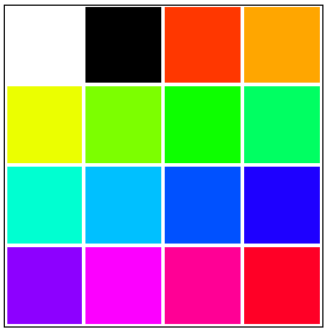
ข้อมูลไบนารี				แปลงข้อมูลไบนารีเป็นข้อมูลเลขฐาน 8				แปลงข้อมูลเลขฐาน 8 เป็นสี
000	001	010	011	0	1	2	3	
100	101	110	111	4	5	6	7	

ตัวอย่างคิวอาร์โค้ดสี 8 สี โดยใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 6 สี แสดงดังภาพที่ 3-5

ภาพที่ 3-5 คิวอาร์โค้ดสี 8 สี โดยใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 6 สี

ตัวอย่างสีที่ใช้เข้ารหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี ซึ่งการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 14 สี แสดงดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 การกำหนดค่าข้อมูลกับค่าสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 14 สี

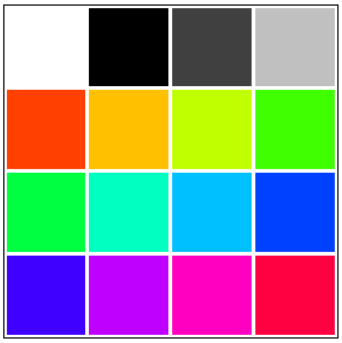
ข้อมูลไบนารี				แปลงข้อมูลไบนารีเป็นข้อมูลเลขฐาน 16				แปลงข้อมูลเลขฐาน 16 เป็นสี
0000	0001	0010	0011	0	1	2	3	
0100	0101	0110	0111	4	5	6	7	
1000	1001	1010	1011	8	9	a	b	
1100	1101	1110	1111	c	d	e	f	

ตัวอย่างคิวอาร์โค้ดสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 14 สี แสดงดังภาพที่ 3-6

ภาพที่ 3-6 คิวอาร์โค้ดสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 14 สี

ตัวอย่างสีที่ใช้เข้ารหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี ซึ่งการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทา จำนวน 2 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 12 สี แสดงดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 การกำหนดค่าข้อมูลกับค่าสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทาจำนวน 2 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 12 สี

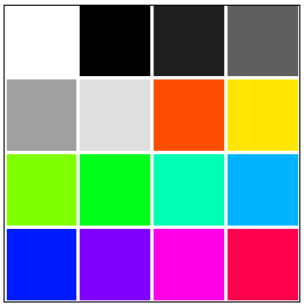
ข้อมูลไบนารี	แปลงข้อมูลไบนารีเป็นข้อมูลเลขฐาน 16	แปลงข้อมูลเลขฐาน 16 เป็นสี
0000 0001 0010 0011 0100 0101 0110 0111 1000 1001 1010 1011 1100 1101 1110 1111	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 a b c d e f	

ตัวอย่างคิวอาร์โค้ดสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทาจำนวน 2 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 12 สี แสดงดังภาพที่ 3-7

ภาพที่ 3-7 คิวอาร์โค้ดสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทาจำนวน 2 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 12 สี

และตัวอย่างสีที่ใช้เข้ารหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทาจำนวน 4 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 10 สี แสดงดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 การกำหนดค่าข้อมูลกับค่าสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทาจำนวน 4 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 10 สี

ข้อมูลไบนารี	แปลงข้อมูลไบนารีเป็นข้อมูลเลขฐาน 16	แปลงข้อมูลเลขฐาน 16 เป็นสี
0000 0001 0010 0011 0100 0101 0110 0111 1000 1001 1010 1011 1100 1101 1110 1111	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 a b c d e f	

ตัวอย่างคิวอาร์โค้ดสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทาจำนวน 4 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 10 สี แสดงดังภาพที่ 3-8

ภาพที่ 3-8 คิวอาร์โค้ดสี 16 สี โดยใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทาจำนวน 4 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 10 สี

3.2.2 การถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี

ขั้นตอนการอ่านภาพคิวอาร์โค้ดสี มีดังนี้

1. รับค่าภาพ แล้วทำการแยกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสออกมาจากภาพ จากนั้นอ่านค่าพิกเซลภาพเพื่อตรวจสอบ Function pattern ของคิวอาร์โค้ด กรณีที่ภาพนั้นมีตำแหน่ง Function pattern ไม่ตรงกับคิวอาร์โค้ดให้ทำการสแกนภาพอีกครั้ง
2. เมื่อตรวจพบตำแหน่ง Function pattern ของคิวอาร์โค้ดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ทำการอ่านค่าข้อมูลใน Data Codewords ของคิวอาร์โค้ด โดย
   - คำนวณหาขนาดโมดูลย่อยของคิวอาร์โค้ด
   - อ่านค่าพิกเซลทั้งหมดในแต่ละโมดูล เลือกค่าที่มีความถี่ข้อมูลสูงสุดเป็นตัวแทนค่าพิกเซลในโมดูลนั้นๆ เมื่อได้ค่าพิกเซลในแต่ละโมดูลจากแบบจำลองสี RGB แล้ว ทำการแปลงค่าจากแบบจำลองสี RGB ไปเป็นแบบจำลองสี HSV
   - พิจารณาค่าสีในโหมด Hue, Saturation และ Value ว่าอยู่ในช่วงสีใด ดังนี้

พิจารณาค่าความสว่างของภาพจาก Quiet zone (พื้นที่สีขาวรอบคิวอาร์โค้ด) โดยค่า Value คือค่าความสว่างของภาพ ใช้ในการคำนวณหาค่าความสว่างสำหรับใช้ชดเชยแสงให้กับโมดูลอื่นๆ โดยคำนวณได้จากสมการที่ 3-5

$$\text{ค่าความสว่างสำหรับใช้ชดเชยค่าแสง} = 100 - Vmax \qquad (3\text{-}5)$$

โดย Vmax = ค่า Value สูงสุด จากพื้นที่สีขาวรอบคิวอาร์โค้ด

<u>การพิจารณาค่าสีดำ</u> พิจารณาค่าสีในแบบจำลอง HSV ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3.2.2 มีค่า Value เท่ากับค่าความสว่างสำหรับใช้ชดเชยค่าแสงและค่า Saturation เท่ากับ 0 พบว่าโมดูลนั้นมีสีดำ

<u>การพิจารณาค่าสีขาว</u> พิจารณาค่าสีในแบบจำลอง HSV ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3.2.2 มีค่า Value เท่ากับ 100-ค่าความสว่างสำหรับใช้ชดเชยค่าแสง และค่า Saturation เท่ากับ 0 พบว่าโมดูลนั้นมีสีขาว

<u>การพิจารณาค่าสีเทา</u> พิจารณาค่าสีในแบบจำลอง HSV ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3.2.2 มีค่า Hue เท่ากับ 0 และค่า Saturation เท่ากับ 0 และค่า Value เท่ากับค่าใดๆ โดยงานวิจัยนี้กำหนดหลักในการคำนวณหาช่วงของค่า Value ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (3-6)

$$\mathrm{Vr} = \frac{\mathrm{Vmax} - \mathrm{Vmin}}{\mathrm{n}} \qquad (3\text{-}6)$$

กำหนดให้

Vr = ช่วงของค่า Value ที่ต้องการหาโทนสีเทา
Vmax = ค่า Value สูงสุด
Vmin = ค่า Value ต่ำสุด
n = จำนวนค่า Value ของโทนสีเทาที่ต้องการหา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

และหาช่วงของค่า Value แต่ละค่า ว่าอยู่ในช่วงค่าสูงสุด ต่ำสุดเท่าใด จากการทดลองแยกความแตกต่างของสีจำนวน 8-16 สี สามารถแบ่งช่วงของสีเทาแต่ละสีได้จากสมการที่ (3-7)

$$\text{ช่วงของค่า } \mathrm{V}i = [i * Vr + 1, (i + 1) * Vr] \qquad (3\text{-}7)$$

กำหนดให้

Vi = ช่วงของค่า Value ของโทนสีเทา โดย i=0,..,n-1

ตัวอย่างการหาช่วงของ Value โทนสีเทา 2 สี

$$\mathrm{Vr} = \frac{100 - 0}{2}$$

จะได้ Vr=50 ทำการหา Vi โดย i=0,1 แทนค่า Vr ในสมการที่ (3-7) จะได้

$$\text{ช่วงของค่า } \mathrm{V0} = [0 * 50 + 1, (0 + 1) * 50]$$

$$\text{ช่วงของค่า } \mathrm{V1} = [1 * 50 + 1, (1 + 1) * 50]$$

จะได้ว่าค่าสีเทาที่ 1 จะมีค่า Hue เท่ากับ 0 ค่า Saturation เท่ากับ 0 และค่า Value อยู่ในช่วง [1,50] ค่าสีเทาที่ 2 จะมีค่า Hue เท่ากับ 0 ค่า Saturation เท่ากับ 0 และค่า Value อยู่ในช่วง [51,100]

<u>การพิจารณาค่าโทนสีอื่นๆ</u> พิจารณาค่าสีในแบบจำลอง HSV ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3.2.2 มีค่า Saturation เท่ากับ 100 และค่า Value เท่ากับ 100 และค่า Hue เท่ากับค่าใดๆ โดยงานวิจัยนี้กำหนดหลักในการคำนวณหาช่วงของค่า Hue ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (3-8)

$$\mathrm{Hr} = \frac{\mathrm{Hmax} - \mathrm{Hmin}}{\mathrm{n}} \qquad (3\text{-}8)$$

กำหนดให้

Hr = ช่วงของค่า Hue ที่ต้องการหาโทนสี

Hmax = ค่า Hue สูงสุด

Hmin = ค่า Hue ต่ำสุด

n = จำนวนค่า Hue ของโทนสีที่ต้องการหา

และหาช่วงของค่า Hue แต่ละค่า ว่าอยู่ในช่วงค่าสูงสุด ต่ำสุดเท่าใด จากการทดลองแยกความแตกต่างของสีจำนวน 8-16 สี สามารถแบ่งช่วงของสีแต่ละสีได้จากสมการที่ (3-9)

$$\text{ช่วงของค่า } \mathrm{H}i = [i * Hr + 1, (i + 1) * Hr] \qquad (3\text{-}9)$$

กำหนดให้

Hi = ค่า Hue ของโทนสี โดย i=0,..,n-1

ตัวอย่างการหาช่วงของ Hue 6 สี

$$\mathrm{Hr} = \frac{360 - 0}{6}$$

จะได้ Hr=60 ทำการหา Hi โดย i=0,1,2,3,4,5 แทนค่า Hr ในสมการที่ (3-9) จะได้

$$\text{ช่วงของค่า } \mathrm{H0} = [0 * 60 + 1, (0 + 1) * 60]$$

$$\text{ช่วงของค่า } \mathrm{H1} = [1 * 60 + 1, (1 + 1) * 60]$$

ช่วงของค่า $H2 = [2 * 60 + 1, (2 + 1) * 60]$

ช่วงของค่า $H3 = [3 * 60 + 1, (3 + 1) * 60]$

ช่วงของค่า $H4 = [4 * 60 + 1, (4 + 1) * 60]$

ช่วงของค่า $H5 = [5 * 60 + 1, (5 + 1) * 60]$

จะได้ว่าค่าสีที่ 1 จะมีค่า Saturation เท่ากับ 100 ค่า Value เท่ากับ 100 ค่าความสว่างสำหรับใช้ชดเชยค่าแสง และค่า Hue อยู่ในช่วง [1,60]

จะได้ว่าค่าสีที่ 2 จะมีค่า Saturation เท่ากับ 100 ค่า Value เท่ากับ 100 ค่าความสว่างสำหรับใช้ชดเชยค่าแสง และค่า Hue อยู่ในช่วง [61,120]

จะได้ว่าค่าสีที่ 3 จะมีค่า Saturation เท่ากับ 100 ค่า Value เท่ากับ 100 ค่าความสว่างสำหรับใช้ชดเชยค่าแสง และค่า Hue อยู่ในช่วง [121,180]

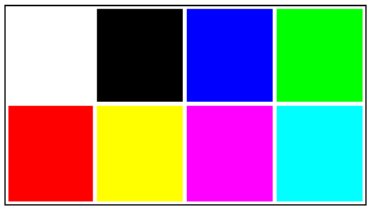
จะได้ว่าค่าสีที่ 4 จะมีค่า Saturation เท่ากับ 100 ค่า Value เท่ากับ 100 ค่าความสว่างสำหรับใช้ชดเชยค่าแสง และค่า Hue อยู่ในช่วง [181,240]

จะได้ว่าค่าสีที่ 5 จะมีค่า Saturation เท่ากับ 100 ค่า Value เท่ากับ 100 ค่าความสว่างสำหรับใช้ชดเชยค่าแสง และค่า Hue อยู่ในช่วง [241,300]

จะได้ว่าค่าสีที่ 6 จะมีค่า Saturation เท่ากับ 100 ค่า Value เท่ากับ 100 ค่าความสว่างสำหรับใช้ชดเชยค่าแสง และค่า Hue อยู่ในช่วง [301,360]

เมื่ออ่านค่าสีได้แล้ว ทำการแปลงค่าสีเป็นข้อมูลเลขฐาน 8 กรณีเข้ารหัสคิวอาร์โค้ด 8 สีหรือแปลงค่าสีเป็นข้อมูลเลขฐาน 16 กรณีเข้ารหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี จากนั้นแปลงข้อมูลเป็นไบนารี เพื่อทำการถอดรหัสแบบคิวอาร์โค้ดมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 การแปลงค่าสีเป็นข้อมูลเลขฐาน 8 และแปลงข้อมูลเลขฐาน 8 เป็นข้อมูลไบนารี

ค่าสีที่อ่านได้	แปลงค่าสีเป็นข้อมูลเลขฐาน 8				แปลงข้อมูลเลขฐาน 8 เป็นข้อมูลไบนารี			
	0	1	2	3	000	001	010	011
	4	5	6	7	100	101	110	111

บทที่ 4
การทดลองและผลการทดลอง

บทนี้นำเสนอเครื่องมือที่ใช้ทดลอง การทดลอง ผลการทดลองของกระบวนการเข้ารหัสและถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพด้วยค่าความถูกต้องจากการถอดรหัส และเวลาในการถอดรหัส

4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware) ที่ใช้ในงานวิจัย

1. คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี
    a. Processor Intel core i5-4200U CPU 2.30 GHz
    b. Memory 4 GB
    c. OS Windows 7
    d. Monitor display 12.5 inch HD 1366x768 pixel
2. โทรศัพท์มือถือที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี
    a. Processor Dual core 1.2 GHz
    b. Memory 1 GB
    c. OS Android 4.4 KitKat
    d. Monitor display 4 inch TFT LCD 800x480 pixel
    e. Camera 8 mega pixel

4.1.2 ซอฟต์แวร์ (Software) ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
    a. Eclipse
2. ภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี
    a. JAVA (jdk 8)
    b. Zxing library version 2.3 (library สำหรับ QR Code Development)
3. ภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี
    a. Android (version 4.4, API Level 20)
    b. Zxing library version 2.3 (library สำหรับ QR Code Development)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.3 คิวอาร์โค้ดสีที่พัฒนาขึ้น

คิวอาร์โค้ดสีที่พัฒนาขึ้นและใช้ในการทดสอบโปรแกรมถอดรหัสคิวอาร์โค้ด แสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงคิวอาร์โค้ดสีที่พัฒนาขึ้น

No.	Input	Output
1	Development Of Color QR Code For Increasing Capacity Test 8 Color	คิวอาร์โค้ด 8 สี
2	Development Of Color QR Code For Increasing Capacity Test 16 Color	คิวอาร์โค้ด 16 สี
3	Development Of Color QR Code For Increasing Capacity Test 16 Color	คิวอาร์โค้ด 16 สี (ใช้สีเทา 2 สี)
4	Development Of Color QR Code For Increasing Capacity Test 16 Color	คิวอาร์โค้ด 16 สี (ใช้สีเทา 4 สี)

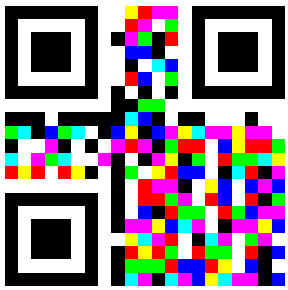
4.2 ผลการทดลอง

การทดลองเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสีและถอดรหัส แล้วเปรียบเทียบค่าความถูกต้องจากค่าสีที่อ่านได้จากโมดูลของคิวอาร์โค้ดสี ดังนี้

<u>การทดลองที่ 1</u>

เข้ารหัสและถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี 8 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 6 สี เวอร์ชัน 1 แสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แสดงภาพคิวอาร์โค้ด 8 สีและค่ารหัสสีที่ถูกต้อง

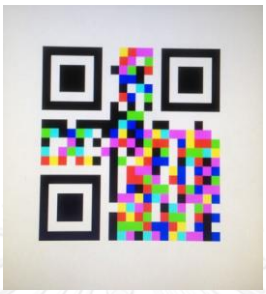
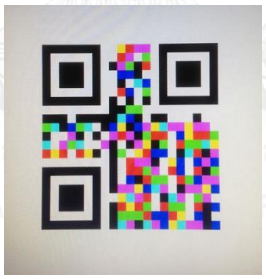
ภาพคิวอาร์โค้ด 8 สีที่นำมาถอดรหัส	รหัสค่าสีที่ถูกต้อง
	1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2

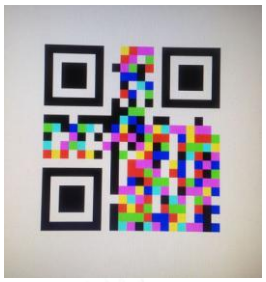
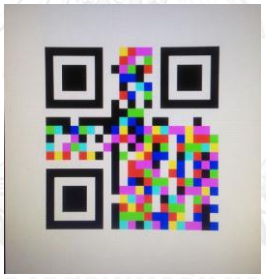
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

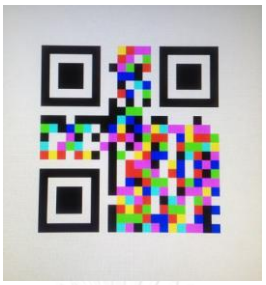
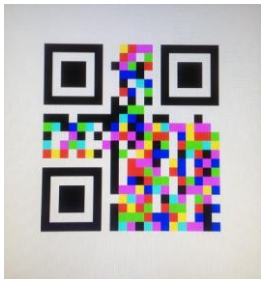
ผลการทดลองที่ 1

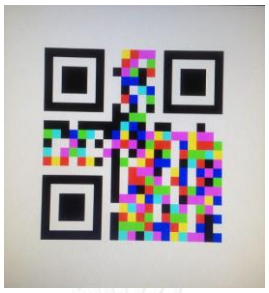
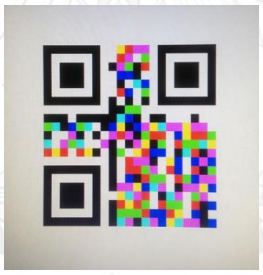
เปรียบเทียบผลการถอดรหัสที่ถูกต้องกับค่าสีที่อ่านได้จริง แสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 แสดงผลการถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 8 สี

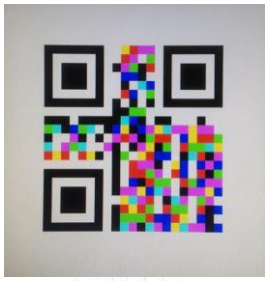
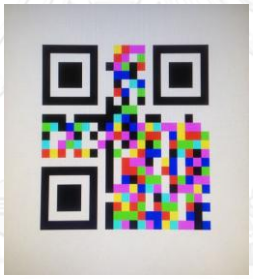
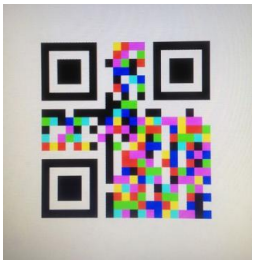
ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
1			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
2			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
3			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
4			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
5			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

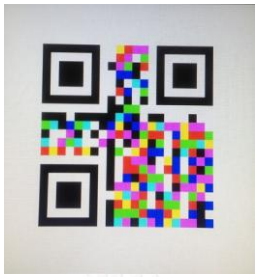
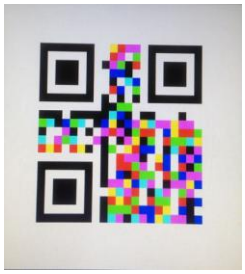
ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
6			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
7			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
8			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

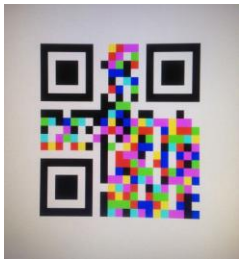
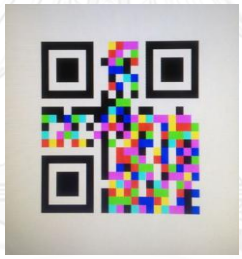
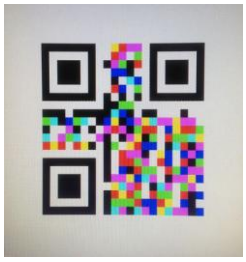
ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
9			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
10			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
11			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
12			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
13			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
14			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
15			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
16			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
17			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
18			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
19			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
20			1 1 1 1 1 1 1 0 0 5 4 6 6 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 6 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 3 1 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 2 2 1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 7 2 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 4 2 0 3 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 3 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 7 2 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 3 7 1 2 3 7 0 1 2 5 1 2 6 5 7 6 6 5 6 6 0 1 0 0 6 1 0 1 0 6 4 6 1 3 4 4 0 2 5 4 4 3 7 0 6 3 7 0 0 6 1 0 1 6 5 1 3 0 4 3 3 7 5 4 5 4 0 4 5 1 0 1 3 0 5 4 2 2 0 1 7 4 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 4 6 6 1 0 5 2 0 2 6 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 4 4 3 6 0 4 2 0 4 1 3 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 2 1 4 3 3 0 4 3 2 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 1 6 6 5 2 7 6 0 1 6 6 5 2 1 0 1 1 1 0 1 0 0 5 7 6 4 0 1 7 6 0 3 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 4 5 4 3 0 4 3 3 0 4 1 2 1 0 0 0 0 0 1 0 1 3 3 3 4 2 2 4 5 0 2 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 6 1 7 6 2 5 7 6 6 1 2 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

<u>สรุปผลการทดลองที่ 1</u>

จากการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 8 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 6 สี เวอร์ชัน 1 (ตามหลักการเลือกสีในหัวข้อที่ 3.2.2) ดังภาพที่ 4-1

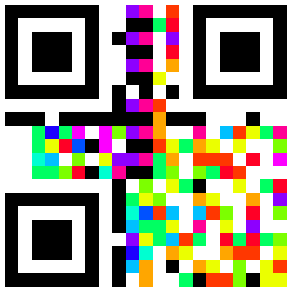
ภาพที่ 4-1 คิวอาร์โค้ดสี 8 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 6 สี

ผลการทดลองอ่านค่ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 8 สี พบว่า กรณีถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 8 สี สามารถถอดรหัสได้ถูกต้อง 20 ครั้งจากการทดลองถอดรหัสทั้งหมด 20 ครั้ง ค่าความถูกต้องคิดเป็น 100%

<u>การทดลองที่ 2</u>

เข้ารหัสและถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี 16 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 14 สี เวอร์ชัน 1 แสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 แสดงภาพคิวอาร์โค้ด 16 สีและค่ารหัสสีที่ถูกต้อง

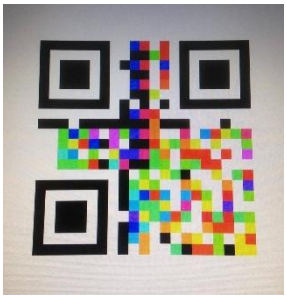
ภาพคิวอาร์โค้ด 16 สีที่นำมาถอดรหัส	รหัสค่าสีที่ถูกต้อง
	1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4

ผลการทดลองที่ 2

เปรียบเทียบผลการถอดรหัสที่ถูกต้องกับค่าสีที่อ่านได้จริง แสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 แสดงผลการถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
1			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
2			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

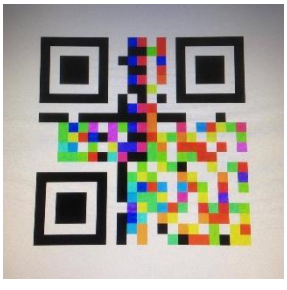
ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
3			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
4			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
5			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
6			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 f 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 7 f 1 8 e 1 1 7 7 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 8 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 2 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
7			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
8			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 f 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 7 f 1 8 e 1 1 7 7 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 8 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 2 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
9			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
10			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
11			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
12			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
13			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
14			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 f 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 8 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 7 f 1 8 e 1 1 7 7 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 8 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 2 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
15			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
16			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
17			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
18			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 f 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 7 f 1 8 e 1 1 7 7 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 8 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 2 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
19			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 f 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 8 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 7 f 1 8 e 1 1 7 7 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 8 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 2 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
20			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 f 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 0 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 0 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 0 e 0 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 0 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 0 5 0 0 8 9 0 5 0 4 c c e 7 3 0 2 2 2 0 f 0 d 0 0 7 7 7 f 1 8 e 1 1 7 7 0 5 7 f 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 0 4 7 1 0 0 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 0 3 4 0 0 3 0 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 0 9 2 5 0 f 0 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 8 7 7 4 0 e 0 4 0 c 0 0 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 0 f 7 2 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 0 3 4 0 0 3 2 2 0 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 0 1 0 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 3 0 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง

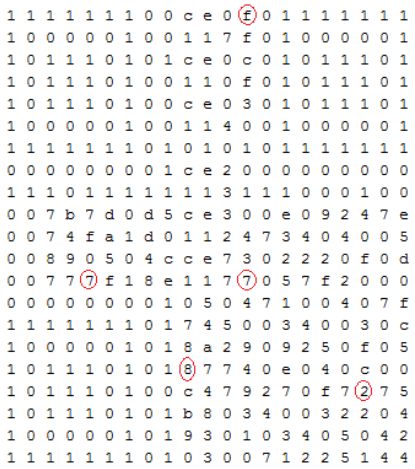
<u>สรุปผลการทดลองที่ 2</u>

จากการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 16 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 14 สี เวอร์ชัน 1 (ตามหลักการเลือกสีในหัวข้อที่ 3.2.2) ดังภาพที่ 4-2

ภาพที่ 4-2 คิวอาร์โค้ดสี 16 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ จำนวน 14 สี

ผลการทดลองอ่านค่ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 16 สี พบว่า สามารถถอดรหัสได้ถูกต้อง 14 ครั้ง จากทั้งหมด 20 ครั้ง ค่าความถูกต้องคิดเป็น 70% โดยการทดลองถอดรหัสค่าสีในลำดับที่ 6,8,14,18,19,20 ผลการถอดรหัสไม่ถูกต้อง ดังตัวอย่างผลการทดลองลำดับที่ 6 จุดที่ถอดรหัสผิดพลาดคือจุดที่วงกลมสีแดง ผิดพลาดทั้งหมด 5 จุด เรียงลำดับจากบนลงล่างและจากซ้ายไปขวา ดังแสดงในภาพที่ 4-3

(ก)

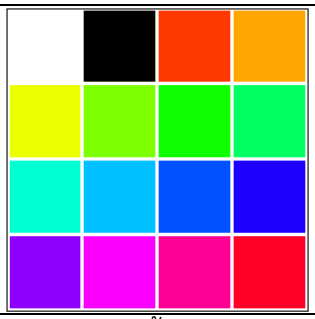


(ข)

ภาพที่ 4-3 ผลการทดลองลำดับที่ 6 (ก) ภาพคิวอาร์โค้ดสี (ข) ผลการถอดรหัส

จุดผิดพลาดที่ 1 อ่านค่าผิดพลาดจาก 2 เป็น f
จุดผิดพลาดที่ 2 อ่านค่าผิดพลาดจาก 5 เป็น 7
จุดผิดพลาดที่ 3 อ่านค่าผิดพลาดจาก 5 เป็น 7
จุดผิดพลาดที่ 4 อ่านค่าผิดพลาดจาก 9 เป็น 8
จุดผิดพลาดที่ 5 อ่านค่าผิดพลาดจาก f เป็น 2
ค่าสีของ 2 กับ f, 5 กับ 7, 9 กับ 8 มีค่าสีใกล้เคียงกัน โดยการเข้ารหัสสี แสดงดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ค่าข้อมูลเลขฐาน 16 กับค่าสี 16 สี

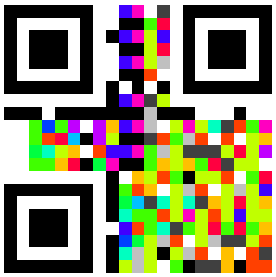
ข้อมูลเลขฐาน 16				แปลงข้อมูลเลขฐาน 16 เป็นสี
0	1	2	3	
4	5	6	7	
8	9	a	b	
c	d	e	f	

จุดที่ถอดรหัสผิดพลาดเป็นจุดที่โมดูลสีมีโทนสีใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นการเข้ารหัสจึงไม่ควรเลือกใช้สีที่มีโทนสีใกล้เคียงกันมากเกินไป เพื่อความถูกต้องแม่นยำในการถอดรหัส

<u>การทดลองที่ 3</u>

การถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ โทนสีเทา 2 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 12 สี เวอร์ชัน 1 แสดงดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 แสดงภาพคิวอาร์โค้ด 16 สี (ใช้สีเทา 2 สี) และค่ารหัสสีที่ถูกต้อง

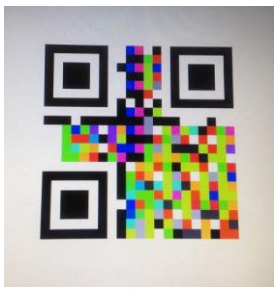
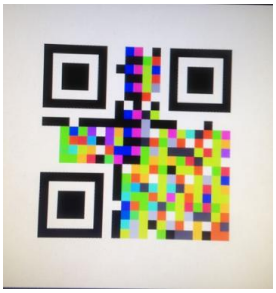
ภาพคิวอาร์โค้ด 16 สีที่นำมาถอดรหัส	รหัสค่าสีที่ถูกต้อง
	1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4

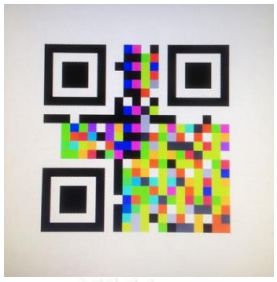
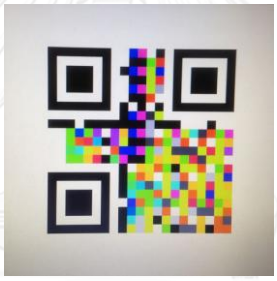
ผลการทดลองที่ 3

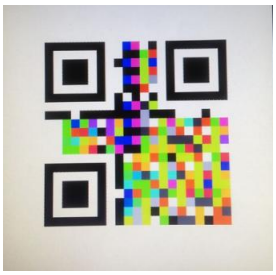
เปรียบเทียบผลการถอดรหัสที่ถูกต้องกับค่าสีที่อ่านได้จริง แสดงดังตารางที่ 4-8

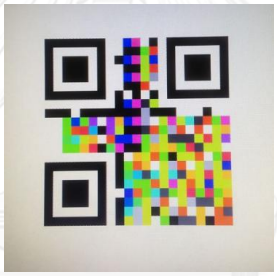
ตารางที่ 4-8 แสดงผลการถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี (ใช้สีเทา 2 สี)

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
1			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
2			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
3			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
4			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
5			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
6			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
7			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
8			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

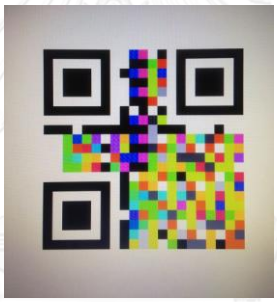
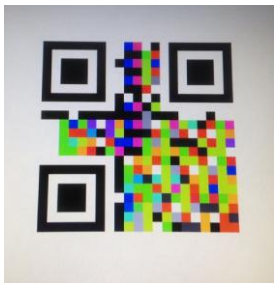
ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
9			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
10			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
11			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
12			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
13			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
14			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
15			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
16			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง
17			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 5 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 5 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

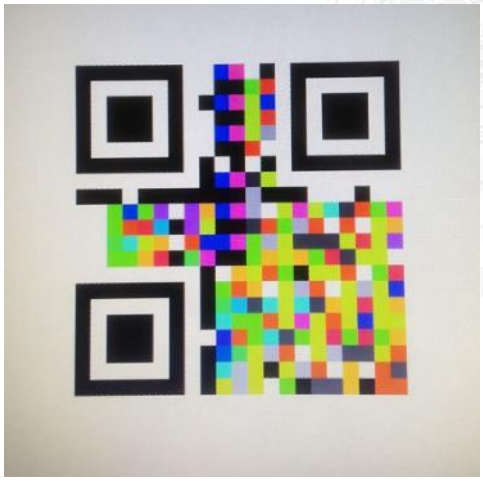
ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
18			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 ⑤ 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 ⓒ 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
19			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d ⑤ 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 ⑤ 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 ⑤ 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 ⓒ 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
20			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ถูกต้อง

<u>สรุปผลการทดลองที่ 3</u>

จากการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 16 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ โทนสีเทา 2 สี เวอร์ชัน 1 (ตามหลักการเลือกสีในหัวข้อที่ 3.2.2) และโทนสีอื่นๆ จำนวน 12 สี ดังภาพที่ 4-4

ภาพที่ 4-4 คิวอาร์โค้ดสี 16 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ โทนสีเทา 2 สีและโทนสีอื่นๆ จำนวน 12 สี

ผลการทดลองอ่านค่ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 16 สี (ใช้สีเทา 2 สี) พบว่า สามารถถอดรหัสได้ถูกต้อง 15 ครั้ง จากทั้งหมด 20 ครั้ง ค่าความถูกต้องคิดเป็น 75% โดยการทดลองถอดรหัสค่าสีในลำดับที่ 13,15,17,18,19 ผลการถอดรหัสไม่ถูกต้อง ดังตัวอย่างผลการทดลองลำดับที่ 13 จุดที่ถอดรหัสผิดพลาดคือจุดที่วงกลมสีแดง ผิดพลาดทั้งหมด 2 จุด เรียงลำดับจากบนลงล่าง ดังแสดงในภาพที่ 4-5



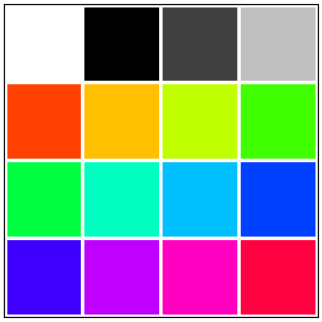
(ก)

(ข)

ภาพที่ 4-5 ผลการทดลองลำดับที่ 13 (ก) ภาพคิวอาร์โค้ดสี (ข) ผลการถอดรหัส

จุดผิดพลาดที่ 1 อ่านค่าผิดพลาดจาก 7 เป็น 6 นั้น โมดูลที่มีค่า 7 อยู่ติดกับโมดูลที่มีค่า 6 (ด้านล่าง) จุดที่ผิดพลาด 2 อ่านค่าผิดพลาดจาก 6 เป็น 5 นั้น โมดูลที่มีค่า 6 อยู่ติดกับโมดูลที่มีค่า 5 (ด้านล่าง) ค่าสีของ 5 กับ 6, 6 กับ 7 มีค่าสีใกล้เคียงกัน โดยการเข้ารหัสสีแสดงดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ค่าข้อมูลเลขฐาน 16 กับค่าสี 16 สี

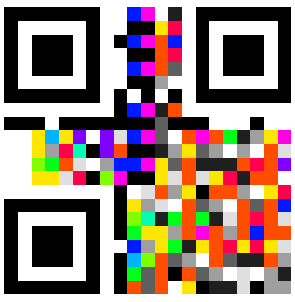
ข้อมูลเลขฐาน 16				แปลงข้อมูลเลขฐาน 16 เป็นสี
0	1	2	3	
4	5	6	7	
8	9	a	b	
c	d	e	f	

จุดที่ถอดรหัสผิดพลาดเป็นจุดที่โมดูลสีใกล้เคียงกันอยู่ติดกัน อีกทั้งจุดที่อ่านค่าผิดพลาดจาก 6 เป็น 5 นั้น มีโมดูลที่มีค่าสีที่ใกล้เคียงกันล้อมรอบจุดที่ผิดพลาดอีกด้วย ดังนั้นการเข้ารหัสจึงไม่ควรให้โมดูลที่มีค่าโทนสีใกล้เคียงกันอยู่ติดกัน เพื่อความถูกต้องแม่นยำในการถอดรหัส

<u>การทดลองที่ 4</u>

การถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ โทนสีเทา 4 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 10 สี เวอร์ชัน 1 แสดงดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 แสดงภาพคิวอาร์โค้ด 16 สี (ใช้สีเทา 4 สี) และค่ารหัสสีที่ถูกต้อง

ภาพคิวอาร์โค้ด 16 สีที่นำมาถอดรหัส	รหัสค่าสีที่ถูกต้อง
	1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 2 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 3 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 2 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 5 c e 3 0 6 e 6 9 2 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 2 4 7 3 4 0 4 0 6 5 0 0 8 9 6 5 0 4 c c e 7 3 6 2 2 2 6 f 6 d 0 0 7 7 5 f 1 8 e 1 1 7 5 6 5 7 f 2 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 5 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 5 0 6 3 4 0 6 3 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 2 9 6 9 2 5 6 f 6 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 2 7 6 f 7 f 7 5 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 3 4 0 6 3 2 2 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 3 6 1 6 3 4 0 5 0 4 2 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 3 6 0 7 1 2 2 5 1 4 4

ผลการทดลองที่ 4

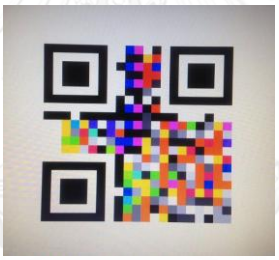
เปรียบเทียบผลการถอดรหัสที่ถูกต้องกับค่าสีที่อ่านได้จริง ดังตารางที่ 4-11

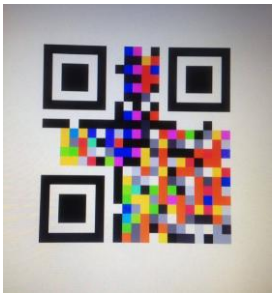
ตารางที่ 4-11 แสดงผลการถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี (ใช้สีเทา 4 สี)

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
1			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 4 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 0 c e 4 0 6 e 6 9 1 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 1 4 7 4 4 0 4 0 6 0 0 0 8 9 6 0 0 4 c c e 7 4 6 1 1 1 6 f 6 d 0 0 7 7 0 f 1 8 e 1 1 7 0 6 0 7 f 1 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 0 0 6 4 4 0 6 4 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 1 9 6 9 1 0 6 f 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 1 7 6 f 7 f 7 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 4 4 0 6 4 1 1 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 4 6 1 6 4 4 0 0 0 4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 4 6 0 7 1 1 1 0 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
2			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 4 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 0 c e 4 0 6 e 6 9 1 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 1 4 7 4 4 0 4 0 6 0 0 0 8 9 6 0 0 4 c c e 7 4 6 1 1 1 6 f 6 d 0 0 7 7 0 f 1 8 e 1 1 7 0 6 0 7 f 1 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 0 0 6 4 4 0 6 4 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 1 9 6 9 1 0 6 f 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 1 7 6 f 7 f 7 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 4 4 0 6 4 1 1 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 4 6 1 6 4 4 0 0 0 4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 4 6 0 7 1 1 1 0 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง

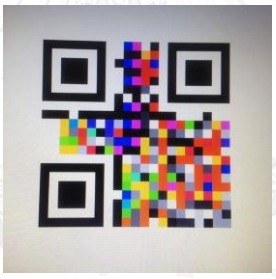
ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
3			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 4 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 0 c e 4 0 6 e 6 9 1 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 1 4 7 4 4 0 4 0 6 0 0 0 8 9 6 0 0 4 c c e 7 4 6 1 1 1 6 f 6 d 0 0 7 7 0 f 1 8 e 1 1 7 0 6 0 7 f 1 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 0 0 6 4 4 0 6 4 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 1 9 6 9 1 0 6 f 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 1 7 6 f 7 f 7 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 4 4 0 6 4 1 1 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 4 6 1 6 4 4 0 0 0 4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 4 6 0 7 1 1 1 0 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
4			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 4 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 0 c e 4 0 6 e 6 9 1 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 1 4 7 4 4 0 4 0 6 0 0 0 8 9 6 0 0 4 c c e 7 4 6 1 1 1 6 f 6 d 0 0 7 7 0 f 1 8 e 1 1 7 0 6 0 7 f 1 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 0 0 6 4 4 0 6 4 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 1 9 6 9 1 0 6 f 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 1 7 6 f 7 f 7 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 4 4 0 6 4 1 1 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 4 6 1 6 4 4 0 0 0 4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 4 6 0 7 1 1 1 0 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
5			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 4 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 0 c e 4 0 6 e 6 9 1 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 1 4 7 4 4 0 4 0 6 0 0 0 8 9 6 0 0 4 c c e 7 4 6 1 1 1 6 f 6 d 0 0 7 7 0 f 1 8 e 1 1 7 0 6 0 7 f 1 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 0 0 6 4 4 0 6 4 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 1 9 6 9 1 0 6 f 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 1 7 6 f 7 f 7 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 4 4 0 6 4 1 1 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 4 6 1 6 4 4 0 0 0 4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 4 6 0 7 1 1 1 0 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
6			ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
7			ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
8			ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
9			ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
10			ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
11			ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
12			ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
13			ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
14			ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง

ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
15			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 4 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 0 c e 4 0 6 e 6 9 1 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 1 4 7 4 4 0 4 0 6 0 0 0 8 9 6 0 0 4 c c e 7 4 6 1 1 1 6 f 6 d 0 0 7 7 0 f 1 8 e 1 1 7 0 6 0 7 f 1 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 0 0 6 4 4 0 6 4 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 1 9 6 9 1 0 6 f 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 1 7 6 f 7 f 7 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 4 4 0 6 4 1 1 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 4 6 1 6 4 4 0 0 0 4 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 4 6 0 7 1 1 1 0 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
16			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 4 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 0 c e 4 0 6 e 6 9 1 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 1 4 7 4 4 0 4 0 6 0 0 0 8 9 6 0 0 4 c c e 7 4 6 1 1 1 6 f 6 d 0 0 7 7 0 f 1 8 e 1 1 7 0 6 0 7 f 1 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 0 0 6 4 4 0 6 4 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 1 9 6 9 1 0 6 f 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 1 7 6 f 7 f 7 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 4 4 0 6 4 1 1 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 4 6 1 6 4 4 0 0 0 4 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 4 6 0 7 1 1 1 0 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
17			1 1 1 1 1 1 1 0 0 c e 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 7 f 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 c e 6 c 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 6 f 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c e 6 4 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 4 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 c e 1 6 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 4 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 7 b 7 d 0 d 0 c e 4 0 6 e 6 9 1 4 7 e 0 0 7 4 f a 1 d 6 1 1 1 4 7 4 4 0 4 0 6 0 0 0 8 9 6 0 0 4 c c e 7 4 6 1 1 1 6 f 6 d 0 0 7 7 0 f 1 8 e 1 1 7 0 6 0 7 f 1 6 6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 6 4 7 1 6 6 4 0 7 f 1 1 1 1 1 1 1 0 1 7 4 0 0 6 4 4 0 6 4 6 c 1 0 0 0 0 0 1 0 1 8 a 1 9 6 9 1 0 6 f 6 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 9 7 7 4 6 e 6 4 6 c 6 6 1 0 1 1 1 0 1 0 0 c 4 7 9 1 7 6 f 7 f 7 0 1 0 1 1 1 0 1 0 1 b 8 6 4 4 0 6 4 1 1 6 4 1 0 0 0 0 0 1 0 1 9 4 6 1 6 4 4 0 0 0 4 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 6 4 6 0 7 1 1 1 0 1 4 4 ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง

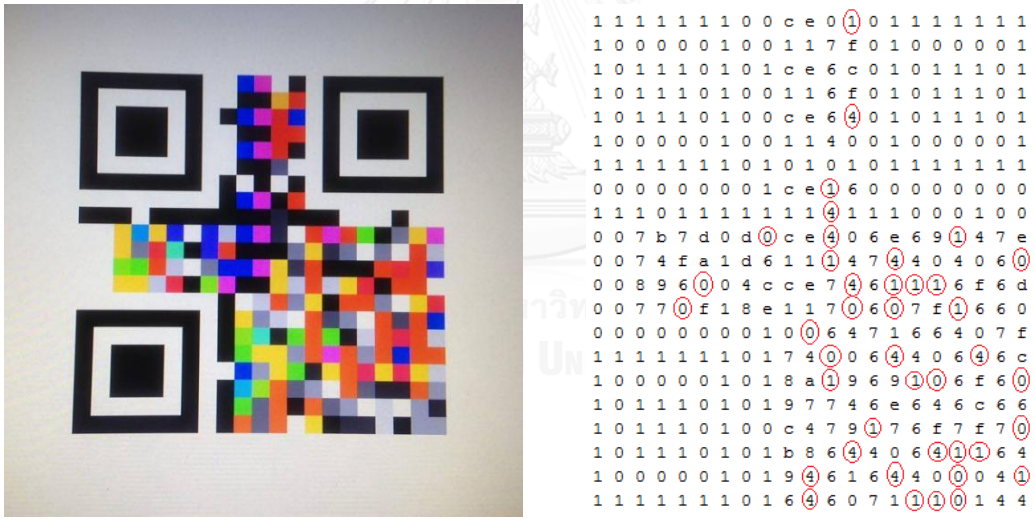
ลำดับที่	ภาพคิวอาร์โค้ดสีต้นแบบ	ภาพคิวอาร์โค้ดที่สแกน	ผลการถอดรหัสค่าสีจากภาพ
18			ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
19			ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง
20			ผลการถอดรหัส: ไม่ถูกต้อง

<u>สรุปผลการทดลองที่ 4</u>

จากการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 16 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ โทนสีเทา 4 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 10 สี เวอร์ชัน 1 ดังภาพที่ 4-6

ภาพที่ 4-6 คิวอาร์โค้ดสี 16 สีประกอบด้วย สีขาว สีดำ โทนสีเทา 4 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 10 สี

ผลการทดลองอ่านค่ารหัสคิวอาร์โค้ดสี 16 สี (ใช้สีเทา 4 สี) พบว่า การถอดรหัสไม่ถูกต้องทั้งหมด ค่าความถูกต้องคิดเป็น 0% ดังตัวอย่างผลการทดลองลำดับที่ 1 จุดที่ถอดรหัสผิดพลาดคือจุดที่วงกลมสีแดง ดังแสดงในภาพที่ 4-7



(ก) (ข)

ภาพที่ 4-7 ผลการทดลองลำดับที่ 1 (ก) ภาพคิวอาร์โค้ดสี (ข) ผลการถอดรหัส

จากภาพที่ 4-7 พบว่า มีจุดที่ถอดรหัสผิดพลาดเกิดขึ้นหลายจุด แบ่งออกเป็น 3 แบบหลักๆ ดังนี้

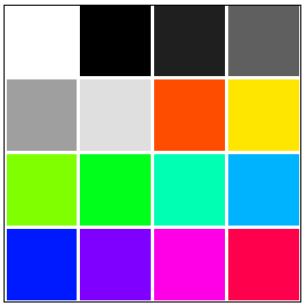
แบบที่ 1 อ่านค่าผิดพลาดจาก 5 เป็น 0

แบบที่ 2 อ่านค่าผิดพลาดจาก 2 เป็น 1

แบบที่ 3 อ่านค่าผิดพลาดจาก 3 เป็น 4

จากผลการทดลองพบว่า ค่าสีของ 5 กับ 0, 2 กับ 1, 3 กับ 4 มีค่าสีใกล้เคียงกัน โดยการเข้ารหัสสีแสดงดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 ค่าข้อมูลเลขฐาน 16 กับค่าสี 16 สี

ข้อมูลเลขฐาน 16				แปลงข้อมูลเลขฐาน 16 เป็นสี
0	1	2	3	
4	5	6	7	
8	9	a	b	
c	d	e	f	

การถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสีซึ่งใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทา 4 สี และโทนสีอื่นๆ จำนวน 10 สี พบว่าการถอดรหัสผิดพลาด เกิดขึ้นที่โมดูลโทนสีเทา สีขาว และสีดำ เนื่องจากการแยกความแตกต่างของโทนสีเทาทำได้ยากกว่าโทนสีอื่นๆ เมื่อเลือกใช้โทนสีเทาที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการแยกสีได้มากขึ้น ดังนั้นการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี จึงไม่ควรใช้โทนสีเทาในการเข้ารหัส มากกว่า 2 สี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี

การเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสีสามารถเก็บข้อมูลได้มากกว่าคิวอาร์โค้ดแบบขาวดำ และเมื่อใช้สีในการเข้ารหัสแตกต่างกันมากขึ้น การเก็บข้อมูลก็จะสามารถทำได้มากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 แสดงค่าความจุข้อมูลของคิวอาร์โค้ดสีที่เข้ารหัสด้วยจำนวนสีต่างกัน

ประเภท คิวอาร์โค้ดสี	ความจุข้อมูลสูงสุด (บิต)	ตัวเลข (ตัว)	ตัวอักษรและตัวเลข (อักขระ)	ตัวอักษร Kanji (อักขระ)	Byte (byte)
คิวอาร์โค้ด 2 สี (ขาวดำ)	208	102	36	16	26
คิวอาร์โค้ด 8 สี	624	186	112	48	78
คิวอาร์โค้ด 16 สี	832	249	306	64	104

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนบิตข้อมูลสูงสุดที่สามารถเก็บในคิวอาร์โค้ดสีได้ พบว่า คิวอาร์โค้ดแบบ 8 สี มีค่าความจุเป็น 3 เท่าของคิวอาร์โค้ดขาวดำและคิวอาร์โค้ดแบบ 16 สี มีค่าความจุเป็น 4 เท่าของคิวอาร์โค้ดแบบขาวดำ ส่วนความจุข้อมูลประเภทต่างๆ ที่สามารถเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดได้ก็มีจำนวนเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 5-1 ซึ่งการเข้ารหัสข้อมูลแต่ละประเภทแตกต่างกัน เป็นผลให้สัดส่วนความจุข้อมูลแต่ละประเภทไม่เท่ากัน ทั้งนี้ การออกแบบคิวอาร์โค้ดสีโดยพิจารณาค่าสีในแบบจำลอง HSV เมื่อเลือกใช้สีที่มีค่าใกล้เคียงกันมากๆ ค่าความถูกต้องในการถอดรหัสจะน้อยลง ดังนั้นในการออกแบบคิวอาร์โค้ดสี จึงควรหลีกเลี่ยงการใช้สีใกล้เคียงกันมากเกินไป

5.1.2 การถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสี

จากการทดลองถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 8 สีที่แตกต่างกัน ให้ความถูกต้อง 100% และการทดลองถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี เกิดความผิดพลาดในการถอดรหัสขึ้น จากสาเหตุหลักคือ จุดที่ผิดพลาดเป็นจุดที่มีค่า Hue หรือค่าสี และค่า Value หรือค่าความเข้มแสงที่มีผลต่อระดับค่าสีเทา ในแบบจำลองสี HSV โดยค่า Hue และค่า Value ที่ใกล้เคียงกันมาก ส่งผลให้ไม่สามารถแยกความแตกต่างของสีได้ ซึ่งการเลือกใช้สีในการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดที่แตกต่างกัน ให้ผลในการถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสีแตกต่างกัน ดังนี้

1. การทดลองถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี โดยเลือกใช้สีขาว สีดำ และโทนสีอื่นๆ 14 สี ค่าสีที่เลือกใช้มีค่า Hue ใกล้เคียงกันมากที่สุด ส่งผลให้โทนสีในแต่ละโมดูลของคิว

อาร์โค้ดมีความใกล้เคียงกันมาก จึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการแยกความแตกต่างของสีในแต่ละโมดูลของคิวอาร์โค้ด จากการทดลองพบว่าค่าความถูกต้องในการถอดรหัสเท่ากับ 70%

2. การทดลองถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี โดยเลือกใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทา 2 สี และโทนสีอื่นๆ 12 สี โทนสีในแต่ละโมดูลของคิวอาร์โค้ดมีความใกล้เคียงกันน้อยลง ความถูกต้องในการถอดรหัสมากขึ้น แต่ยังเกิดความผิดพลาดในการถอดรหัสคือ เมื่อโมดูลสีที่มีโทนสีใกล้เคียงกัน ถูกเข้ารหัสให้อยู่ติดกัน ทำให้การแยกความแตกต่างของสีในแต่ละโมดูลของคิวอาร์โค้ดผิดพลาดไป จากการทดลองพบว่าค่าความถูกต้องในการถอดรหัสเท่ากับ 75%
3. การทดลองถอดรหัสคิวอาร์โค้ด 16 สี โดยเลือกใช้สีขาว สีดำ โทนสีเทา 4 สี และโทนสีอื่นๆ 10 สี เมื่อโทนสีเทาในแต่ละโมดูลของคิวอาร์โค้ดมีความใกล้เคียงกันมากขึ้น และยังใกล้เคียงกับโมดูลสีขาวและสีดำ ทำให้เกิดความผิดพลาดในการแยกความแตกต่างของสีเทาในแต่ละโมดูลของคิวอาร์โค้ดสีมากขึ้น จากการทดลองพบว่าไม่มีความถูกต้องในการถอดรหัสเลย ทั้งนี้ จุดที่ให้ผลการถอดรหัสผิดพลาดทั้งหมดเกิดขึ้นที่โมดูลโทนสีเทา ขาว และดำ ทั้งสิ้น

ดังนั้นการออกแบบคิวอาร์โค้ดสี ที่ใช้หลักการเลือกสีในแบบจำลองสี HSV แบ่งโทนสีที่เลือกนำมาเข้ารหัสออกเป็น 4 ประเภทคือ สีขาว สีดำ โทนสีเทาและโทนสีอื่นๆ และมีหลักการในการเลือกสี ดังนี้

1. ไม่ควรใช้โทนสีเทาในการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี มากกว่า 2 สี เนื่องจากโทนสีเทาทำให้เกิดความผิดพลาดในการแยกความแตกต่างของสีได้ง่ายกว่าโทนสีอื่น
2. ไม่ควรใช้โทนสีอื่นๆ ในการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี มากกว่า 10 สี
3. กรณีที่เลือกใช้โทนสีอื่นๆ ในการเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสีเท่ากับ 12 สี ควรมีการปรับปรุงภาพคิวอาร์โค้ดสีก่อน เนื่องจากอาจจะเกิดความผิดพลาดในการถอดรหัสเมื่อโมดูลโทนสีใกล้เคียงวางอยู่ในตำแหน่งติดกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ ทำการออกแบบคิวอาร์โค้ดสีและทดสอบความถูกต้องในการถอดรหัส มีข้อเสนอแนะ ดังนี้

1. การถอดรหัสคิวอาร์โค้ดสีอาจจะเพิ่มกระบวนการปรับปรุงภาพก่อนการถอดรหัส เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการถอดรหัส เมื่อเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดสี โดยใช้สีที่แตกต่างกันจำนวนมาก
2. การออกแบบคิวอาร์โค้ดสีอาจทำการเข้ารหัสในส่วน Error correction เพิ่มเติม เพื่อให้คิวอาร์โค้ดยังสามารถถอดรหัสได้แม้เกิดการชำรุด เสียหาย เนื่องจากคิวอาร์โค้ดสีมีปัญหาเรื่องความซีดจางของสีภาพ เมื่อนำไปใช้งานเป็นระยะเวลานาน จึง

อาจมีการปรับปรุงเรื่องความคงทนของภาพคิวอาร์โค้ดสีเพื่อประสิทธิภาพในการถอดรหัส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิง

[1] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. แนะนำเทคโนโลยีบาร์โค้ด [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา : http://www.nstda.or.th/nstda-knowledge/2866-2d-barcode [19 เมษายน 2556]

[2] Lei Fu. Design of QR Code-based Mall Shopping Guide System. Proceedings of the International Conference on Information Science and Technology (2011) : 450-453.

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

[4] Denso wave incorporated. About QR Code [Online]. 1994. Available from: http://www.denso-wave.com/qrcode/index-e.html [2013, April 20]

[5] Namiotand, D. and Sneps-Sneppe, M. A New Approach to Advertising in Social Networks Business-Centric Check-ins. Proceedings of the 15th International Conference on Intelligence in Next Generation Network (2011) : 92-96.

[6] QRreaders. QR Code Boarding Passes [Online]. 2010. Available from : http://www.qrreaders.org/boarding-passes.html [2013, March 26]

[7] Maria Ebling and Ramon Caceres. Bar Codes Everywhere You Look. Proceedings of the IEEE CS (2010) : (4-5).

[8] สุพพัต รุ่งเรืองศิลป์. การพัฒนาคิวอาร์โค้ดร่วมกับลายน้ำดิจิตอลเพื่อซ่อนข้อมูล.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

[9] Darrin Cardani. Adventures in HSV Space. The vision and image sciences laboratory Thechnion-Israel Institute of Technology .

[10] Rafael Gonzalez and Richard Woods. Digital image processing. Prentice-Hall Publishing, 2001.

[11] นริศ หนูหอม. การฝังลายน้ำอเนกประสงค์บนรูปภาพดิจิตอลเพื่อตรวจสอบรับรองความเป็นต้นฉบับและพิสูจน์ความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

[12] Xiong, Z., Guo-dong, L. and Jian-min, W. Study on the Sequence of Steps in the QR Code Image Preprocessing. Proceedings of the 2nd International Conference on Future Computer and Communication (2010) : 446 - 449.

[13] Chung-Hua, C., De-Nian, Y. and Ming-Syan, C. Image Stabilization for 2D Barcode in Handheld Devices. Graduate Institute of Communication Engineering National Taiwan University (2007) : 697-706.

[14] Yuji, K., Daisuke, D., Tomokazu, T., Ichiro, I. and Hiroshi M. Low resolution QR-code recognition by applying super-resolution using the property of QR-codes. Proceedings of the International Conference on Document Analysis and Recognition (2011) : 992-996.

[15] Yinghui, Z., Tianlei, G., Deguang, L. and Huaqi L. An Improved Binarization Algorithm of QR Code Image. Proceedings of the Consumer Electronics Communications and Networks (2012) : 2376-2379.

[16] Yue, L., Ju, Y. and Mingjun, L. Recognition of QR Code with Mobile Phone. Proceedings of the Chinese Control and Decision Conference (2008) : 203-206.

[17] ZXing. ZXing Multi-format 1D/2D barcode image processing library with clients [Online]. Available from : https://code.google.com/p/zxing [2013, March 26]

[18] OpenCV. OpenCV Open Source Computer Vision [Online]. Available from : http:// opencv.org [2013, March 26]

[19] Gao JerryZeyu. Understanding 2D-BarCode Technology and Application in M-Commerce. Proceedings of the 31st International Computer Software Conference (2007):49-56

[20] Namiotand, D. and Sneps-Sneppe, M. A New Approach to Advertising in Social Networks Business-Centric Check-ins. Proceedings of the 15th International Conference on Intelligence in Next Generation Network (2011):92-96.

[21] QRme. QR Code Example [Online]. Available from : http://qrme.com.au/qr-code-examples [2013, March 26]

[22] ประทาน โชติพันธุ์บัณฑิตย์. การซ่อนข้อมูลและความมั่นคงสำหรับเอกสารสิ่งพิมพ์.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

[23] Vongpradhip S. and Homkajorn K.An Implementation of Process to Remove Scratches from QR Code with Mobile Phone. Proceeding of the International Conference on Information Technology, Electronics and Communications (January 2013):42-46.

[24] Tobias O. and Seara R. Image Segmentation by Histogram Thresholding Using Fuzzy Sets. IEEE Transactions on Image Processing 11 (December 2002) : 1457-1465.

[25] Ohbuchi, E., Hanaizumi, H. and Hock A. L. Barcode Readers using the Camera Device in Mobile Phones. Proceeding of the International Conference on Cyberworlds (2004).

[26] Bi, L., Feng, Z., Liu, M. and Wang, W. Design and Implementation of the Airline Luggage Inspection System Base on Link Structure of QR Code. Internation Symposium on Electornic Comerce and Security (2008):527-530.

[27] Homkajorn K., Ketcham, M. and Vongpradhip S. A Technique to Remove Scratches from QR Code Images. Proceeding of the International Conference on Computer and Communication Technologies (2012):127-131.

[28] Cliff Reiter. With J. Image Processing 2 Color Spaces. APL Quote Quad (2004): 3-12.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงค่าต่าง ๆ

ตารางที่ ก-1 แสดงค่าตัวอักษรและจำนวนเต็มที่กำหนดไว้ ในการเข้ารหัส

Alphanumeric	Value	Alphanumeric	Value
0	0	O	22
1	1	P	23
2	2	N	24
3	3	Q	25
4	4	R	26
5	5	S	27
6	6	R	28
7	7	T	29
8	8	U	30
9	9	V	31
A	10	W	32
B	11	X	33
C	12	Y	34
D	13	Z	35
E	14	$	36
F	15	(space)	37
G	16	%	38

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Alphanumeric	Value	Alphanumeric	Value
H	17	*	39
I	18	+	40
J	19	-	41
K	20	.	42
L	21	/	43
		:	44

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนุชนารถ ทวีรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 09 ธันวาคม พ.ศ. 2528 เกิดที่กรุงเทพ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2552 จากนั้นได้ทำงานในตำแหน่งนักพัฒนาระบบ โดยมีหน้าที่หลักในการพัฒนาระบบงานเว็บแอพลิเคชัน และพัฒนาแอพลิชันบนสมาร์โฟน หลังจากนั้น ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาปลายปีการศึกษา 2555

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University