



คิวอาร์โค้ดแบบทวิภาพ
DUAL IMAGE QR CODE

นายชาคริต คำมะสอน

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2565

คิวนาร์โค้ดแบบทวิภาพ

นายชาคริต คำมะสอน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสถิติประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2565

DUAL IMAGE QR CODE

MR. CHAKRIT KAMMASON

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN APPLIED STATISTICS
GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY
2022



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
หลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถิติประยุกต์

ชื่อวิทยานิพนธ์: คิวอาร์โค้ดแบบทวิภาพ

ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์: นายชาคริต คำมะสอน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์:

ดร. อัคร สุประทักษ์	ประธานกรรมการ
ดร. ชนพงศ์ อินทร	กรรมการ
ผศ.ดร. วุฒิชัย ศรีโสภาพล	กรรมการ
ดร. เปรม จันทร์สว่าง	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. ชนพงศ์ อินทร)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติไชย พักศรี)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังคณา บุญยี่ต)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

ชาคริต คำมะสอน. 2565. **คิวอาร์โค้ดแบบทวิภาพ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา

สถิติประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: ดร. ธนพงศ์ อินทร

บทคัดย่อ

เนื่องจากปัจจุบันการใช้งาน QR Code มีความนิยมอย่างแพร่หลายทั่วโลก และมีนักวิจัยได้พยายามปรับปรุงการใช้งาน QR Code ได้ปรับปรุง QR Code ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในด้านต่างๆไม่ว่าจะเป็นด้านความสวยงามที่สามารถสื่อความหมายให้แก่ผู้ใช้งานได้มากยิ่งขึ้น หรือปรับปรุงความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลที่เพิ่มมากยิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้เราขอเสนอ การเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดแบบทวิภาพ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการปรับปรุง QR Code ที่สามารถรวมความสามารถทั้งสองด้านนี้ภายในหนึ่ง QR Code และในขณะเดียวกันยังรักษาความสามารถในการถอดรหัสข้อมูลด้วยเครื่องถอดรหัสแบบมาตรฐานได้อีกด้วย โดยเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้การปรับเปลี่ยน QR Code สองรูปแบบ นั่นคือ การเปลี่ยนให้ QR Code แบบมาตรฐานให้เป็น QR Code ที่สามารถสื่อความหมายได้ ด้วยหลักการสร้าง QR Code แบบ Halftone และการรวม QR Code สอง QR Code ให้อยู่ใน QR Code เดียวด้วยเทคนิคภาพเลนส์ (Lenticular Image) ในการทดสอบประสิทธิภาพและเพื่อทดสอบความทนทานของ QR Code ที่เสนอเราได้ทดสอบผ่านพารามิเตอร์แบบต่างๆ 6 รูปแบบ คือ รหัสการแก้ไขข้อผิดพลาด เวอร์ชัน ขนาด ระยะห่าง และมุมมอง โดยจะทดสอบในชุดการทดลองแบบต่างๆ 24,000 ชุด เราพบว่ามีเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองทั้งหมด 3,714 เงื่อนไขที่ได้ผลลัพธ์อัตราความสำเร็จในการสแกนถึง 100% สุดท้ายนี้ เรายังทดลองเกี่ยวกับตัวอย่างกรณีการใช้งานในสถานการณ์จริงในรูปแบบต่างๆสำหรับผู้ใช้งานด้วย การเข้ารหัสคิวอาร์โค้ดแบบทวิภาพที่นำเสนอ

Chakrit Kammason. 2022. **Dual Image QR Code**. Master of Science Thesis in Applied Statistics, Graduate School, Khon Kaen University.

Thesis Advisor: Dr. Thanapong Intharah

ABSTRACT

Due to the high adoption rate of QR codes across the world, researchers have been attempting to improve classical QR codes by either improving their appearance to be more meaningful to human perception or improving their capability to be able to store more messages. In this work, we propose dual image QR codes that aim to improve both aspects while preserving the ability to be able to scan by standard QR code readers. We improve the appearance of the QR code using the halftone QR principle and increase the capacity of the QR code with the lenticular imaging technique. To test the robustness of the proposed QR code, we evaluated six important parameters: error correction code, version, size, spacing and perspective for appropriate conditions through 24,000 combinations. From the experiments, we found 3,714 appropriate conditions which achieved 100% successful scanning rate. Lastly, we also list of examples use cases to use in real-world situations for the proposed dual image QR codes.

งานวิทยานิพนธ์นี้ขอมอบส่วนดีให้บุพการีและคณาจารย์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์เป็นอย่างดีได้ด้วยความช่วยเหลือ และการให้คำปรึกษาจากคณะอาจารย์ที่ปรึกษา ได้แก่ ดร.ธนพงศ์ อินทระ สาขาวิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น คำแนะนำในทุกขั้นตอนที่ได้ทำการศึกษาวิทยานิพนธ์การวางแผนการศึกษาทั้งหลักสูตร การออกแบบการทดลอง กระบวนการศึกษาทดลองเพื่อให้ได้คำตอบที่ถูกต้อง การสนับสนุนและเปิดโอกาสให้ได้รับทุนในการศึกษาและการนำเสนอผลงาน ตลอดจนการเขียนรายงานทางวิชาการเพื่อนำเสนอผลงานวิจัย การตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานทุกอย่าง รวมทั้งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น อาจารย์ เจ้าหน้าที่และบุคลากร สาขาวิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นทุกท่านที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดการศึกษาที่ผ่านมา

สุดท้ายผลประโยชน์ ความดีทั้งปวง ที่เกิดขึ้นจากการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแต่คุณพ่อและคุณแม่ที่เคารพยิ่งและหากมีข้อบกพร่องด้วยประการใดๆผู้วิจัยขอน้อมรับไว้ด้วยความขอบคุณยิ่ง

ชาคริต คำมะสอน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
คำอุทิศ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ของเขตงานวิจัย	2
1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ส่วนประกอบของ QR Code	4
2.2 QR Code ที่สื่อความหมาย	29
2.3 การเพิ่มความจุของ QR Code	32
2.4 ทฤษฎีการทำภาพแบบเลนติคิวลาร์	37
2.5 การวัดประสิทธิภาพ	41
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	43
3.1 การสร้างคิวอาร์โค้ดแบบทวิภาพ	43
3.2 การผสมผสานโมดูลสำหรับ Lenticular Image	48
3.3 การออกแบบการวัดประสิทธิภาพ	49
บทที่ 4 ผลการทดลอง	55
4.1 ผลจากการทดลอง	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	65
5.1 บทสรุป	65
เอกสารอ้างอิง	67
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก แสดงภาพการทดลองเพิ่มเติม	70
ภาคผนวก ข แสดงตาราง INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC 18004 เพิ่มเติม	75
ประวัติผู้เขียน	107

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2-1	แสดงจำนวน Error Correction Codewords	8
ตารางที่ 2-2	แสดงความจุของข้อมูลที่เก็บได้ใน QR Code	9
ตารางที่ 2-3	แสดงการเข้ารหัสข้อมูล Character เพื่อแปลงข้อมูลในโหมดต่างๆ	11
ตารางที่ 2-4	แสดงการระบุโหมดและความยาวในการเข้ารหัสข้อมูลของ QR Code	12
ตารางที่ 2-5	แสดงการเข้ารหัสและถอดรหัสสำหรับโหมด Alphanumeric	12
ตารางที่ 2-6	แสดงตัวอย่างการเข้ารหัสข้อมูล	13
ตารางที่ 2-7	แสดงรูปแบบการ Masking และเงื่อนไขในการใช้	23
ตารางที่ 2-8	แสดงเงื่อนไขและคะแนนของ Mask Pattern แต่ละรูปแบบ	26
ตารางที่ 2-9	แสดงเลข Binary indicator ในส่วนของ Error Correction Level	26
ตารางที่ 3-1	แสดง Pseudo-code อธิบายการสร้าง Dual Image QR Code	48
ตารางที่ 3-2	แสดงพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับใช้ในการทดลอง	51
ตารางที่ 4-1	แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับภาพคู่ที่ใช้ในการทดลอง	55
ตารางที่ 4-2	แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับ Error Correction Level ต่างๆ	56
ตารางที่ 4-3	แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับขนาดของ Dual Image QR Code	57
ตารางที่ 4-4	แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับระยะห่างของกล้องที่สแกน	58
ตารางที่ 4-5	แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับเวอร์ชันของ Dual Image QR Code	58
ตารางที่ 4-6	แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับมุมมองต่างๆในการสแกน	59
ตารางที่ 4-7	แสดงผลการทดลองของผู้ใช้งาน	62
ตาราง ข-1	Data capacity of all versions of QR Code	76
ตาราง ข-2	Error correction characteristics for QR Code 2005	78
ตาราง ข-3	Number of symbol characters and input data capacity for versions 1 to 8	97
ตาราง ข-4	Encoding/decoding table for JIS8 character set	97
ตาราง ข-5	ตารางการแปลงค่าพหุนาม	98

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1-1	แสดงตัวอย่าง Dual Image QR Code ในมุมมองต่างๆ	2
ภาพที่ 2-1	ตัวอย่าง QR Code	4
ภาพที่ 2-2	แสดงโครงสร้างของ QR Code	5
ภาพที่ 2-3	แสดงโครงสร้างของ Finder Pattern	6
ภาพที่ 2-4	แสดงการจัดวาง Data Codewords และ Error Correction Codewords	7
ภาพที่ 2-5	แสดงจำนวนโมดูลและขนาดของ QR Code เมื่อ Version เปลี่ยนไป	9
ภาพที่ 2-6	แสดงวงจร Division	16
ภาพที่ 2-7	แสดงการคำนวณ Error Correction Codewords	20
ภาพที่ 2-8	แสดงการวาง Block ในส่วนของ Data และ Error Correction Codewords ใน QR Code version 1	21
ภาพที่ 2-9	แสดงการวางบิตในรูปแบบแนวตั้ง	21
ภาพที่ 2-10	แสดงการวางบิตในรูปแบบแนวนอน	22
ภาพที่ 2-11	แสดงการวางบิตแบบไม่ปกติเมื่อวางติดกับ Alignment Pattern หรือ Version Information	22
ภาพที่ 2-12	แสดงลำดับในการวาง Bitstream ของ QR Code	24
ภาพที่ 2-13	แสดง Masking ในรูปแบบต่างๆ	25
ภาพที่ 2-14	แสดงการวาง Mask Pattern กับ QR Code	27
ภาพที่ 2-15	แสดงการวางในส่วนของ Format Information Codewords	28
ภาพที่ 2-16	แสดงแผนภาพของการถอดรหัส QR Code	29
ภาพที่ 2-17	แสดงตัวอย่าง QArt Code	30
ภาพที่ 2-18	แสดงตัวอย่าง Halftone QR Codes	30
ภาพที่ 2-19	แสดงแผนภาพการสร้าง Halftone QR Code	31
ภาพที่ 2-20	แสดงตัวอย่าง QR Code แบบฝึงลายน้ำ	31
ภาพที่ 2-21	แสดงตัวอย่าง QR Code Micrography	32
ภาพที่ 2-22	แสดงการเพิ่มความจุของ QR Code ที่ใช้ความแตกต่างของสี	33
ภาพที่ 2-23	แสดงตัวอย่างของโมดูลใน Two Level QR Code	33
ภาพที่ 2-24	แสดงแผนภาพการเพิ่มความจุของ QR Code โดยใช้เทคนิคความแตกต่างของสี	34
ภาพที่ 2-25	แสดงรูปแบบของ Two Layer QR Code	34
ภาพที่ 2-26	แสดงมุมมองของ Two Layer QR Code	35
ภาพที่ 2-27	แสดงการจัดวางโมดูลของ Two Layer QR Code	37
ภาพที่ 2-28	แสดงรูปแบบการออกแบบ Two Layer QR Code	38
ภาพที่ 2-29	แสดงภาพวาดสีน้ำมัน Tabula Scalata จากปี 1580	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 2-30	แสดงมุมมองการฉายภาพเมื่อภาพพิมพ์อยู่ภายใต้ Lenticular Lens	38
ภาพที่ 2-31	แสดงมุมมองการฉายภาพ	39
ภาพที่ 2-32	แสดงตัวอย่างของ Lenticular Lenses	39
ภาพที่ 2-33	แสดงการผสมกันของภาพ 2 ภาพ	40
ภาพที่ 2-34	แสดงพารามิเตอร์ต่างๆในการวัดประสิทธิภาพของ Dual Image QR Code	41
ภาพที่ 3-1	แสดงแผนผังการสร้าง Dual Image QR Codes	43
ภาพที่ 3-2	แสดงการเข้ารหัสรูปภาพ	44
ภาพที่ 3-3	แสดงการแปลงรูปภาพให้เป็น QR Code แบบ Halftone	44
ภาพที่ 3-4	แสดงจำนวนพิกเซลใน 1 โมดูลของ QR Code	45
ภาพที่ 3-5	แสดงการตัดคอลัมน์ของโมดูล	45
ภาพที่ 3-6	แสดงการแทรกช่องว่างคอลัมน์ของ 2 โมดูลจาก ภาพ QR Code 2 รูปภาพ	46
ภาพที่ 3-7	แสดงรูปแบบโมดูลเมื่อทำการวาง Lenticular Lens ทับบน QR Code	46
ภาพที่ 3-8	แสดงรูปแบบของโมดูลบน Dual Image QR Code	47
ภาพที่ 3-9	แสดงรูปแบบของโมดูลสำหรับ QR Code แบบทั่วไป	47
ภาพที่ 3-10	แสดงรูปแบบการมองเห็นมุมมองต่างๆของโมดูลภายใน Dual Image QR Code	49
ภาพที่ 3-11	แสดงภาพคู่ทั้ง 10 คู่ (pair1-pair10) สำหรับการใส่ Dual Image QR Code ใน Version ต่างๆ	50
ภาพที่ 3-12	แสดง Dual Image QR Code ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองด้านผู้ใช้งาน	53
ภาพที่ 3-13	อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	54
ภาพที่ 4-1	แสดงอัตราความสำเร็จสำหรับพารามิเตอร์รูปแบบต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	60
ภาพที่ 4-2	แสดงเปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จสำหรับพารามิเตอร์รูปแบบต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	61
ภาพที่ 4-3	แสดงเปอร์เซ็นต์ของผลการทดลองผู้ใช้งาน	63
ภาพที่ ก-1	แสดงการทดลองสแกน Dual Image QR Code มุมมองด้านซ้าย	71
ภาพที่ ก-2	แสดงการทดลองสแกน Dual Image QR Code มุมมองด้านขวา	71
ภาพที่ ก-3	แสดงมุมมองการสแกน Dual Image QR Code ที่มีการปรับมุมมองและระยะห่าง	72
ภาพที่ ก-4	แสดงมุมมองการสแกน Dual Image QR Code ที่มีการปรับมุมมองและระยะห่างเพิ่มเติม	72
ภาพที่ ก-5	แสดงการสแกน Dual Image QR Code เมื่อสแกนสำเร็จ	73
ภาพที่ ก-6	แสดงมุมมอง Dual Image QR Code เมื่อมองจากมุมมองทางด้านขวา	73
ภาพที่ ก-7	แสดงมุมมอง Dual Image QR Code เมื่อมองจากมุมมองตรงกลาง	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ ก-8	แสดงมุมมอง Dual Image QR Code เมื่อมองจากมุมมองด้านซ้าย	74
ภาพที่ ก-9	แสดงการทดลองของผู้ทำการทดลอง	74

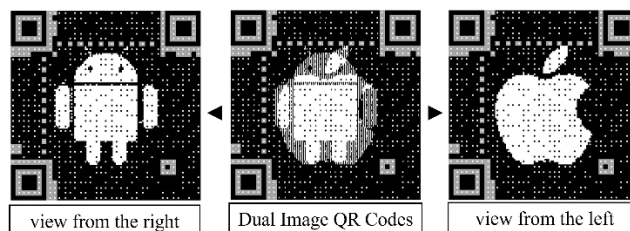
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รหัสตอบกลับด่วน (Quick Response Code หรือ QR Code) ถูกนำมาใช้ในปี 1994 โดย Masahiro Hara (Hara, 1994) โดยการออกแบบมาเพื่อแก้ไขปัญหาด้านข้อจำกัดด้านความจุของบาร์โค้ดที่สามารถจุได้สูงสุดเพียงแค่ 20 อักขระ ซึ่งรหัส QR Code สามารถเก็บความจุของอักขระข้อความได้ถึง 7,089 ตัว ประกอบด้วยตัวเลข (0-9) ตัวอักษรพิเศษ (0-9, A-Z, a-z, , \$ # % @ & * + - : . /) รวมไปถึงตัวอักษรคันจิ/คะนะ และอักขรแบบ 8-bit byte นอกจากนี้ QR Code ยังสามารถสแกนได้จากทุกมุมมองถึง 360° และยังสามารถถอดรหัสข้อความออกมาได้อย่างรวดเร็ว QR Code มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั่วโลก โดยในปี 2560 มีการใช้งานอย่างแพร่หลายถึง 34% และในปี 2564 ในช่วงการแพร่ระบาดของไวรัส โควิด 19 มีการกระตุ้นการนำ QR Code มาใช้งานมากถึง 56% โดยการใช้งาน QR Code ส่วนใหญ่จะเป็นการใช้งานทางด้านการชำระเงินต่างๆเป็นหลัก QR Code สามารถใช้งานได้สะดวกสบาย โดยสามารถใช้งานได้ผ่านการสแกนผ่านแอปพลิเคชันสแกน QR Code ที่สามารถดาวน์โหลดได้ทั่วไป และในโทรศัพท์มือถือบางระบบปฏิบัติการยังสามารถสแกน QR Code ได้ผ่านทางแอปพลิเคชันกล้องมือถือดั้งเดิมของเครื่องได้อีกด้วย เช่น การสแกนผ่านกล้องของโทรศัพท์มือถือ iPhone ที่ใช้งานในระบบปฏิบัติการ iOS ซึ่ง ระบบปฏิบัติการ iOS มีการเริ่มสแกนผ่านกล้องของโทรศัพท์มือถือดั้งเดิมได้ตั้งแต่ iOS Version 11

อย่างไรก็ตาม มีนักวิจัยมากมายที่พยายามปรับปรุง QR Code ในหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นความสวยงาม และการเพิ่มความจุให้กับ QR Code ซึ่งการปรับปรุง QR Code ที่ผ่านมาสามารถปรับปรุง QR Code ได้แค่ด้านใดด้านหนึ่งเท่านั้น ในงานวิจัยเราตั้งใจที่จะปรับปรุง QR Code ในรูปแบบทั้งสองรูปแบบ โดยการนำเสนอ QR Code รูปแบบใหม่ที่เรียกว่า คิวอาร์โค้ดแบบทวิภาพ (Dual Image QR Code) ซึ่งเป็นการรวมจุดเด่นในการปรับปรุง QR Code ในทั้งสองด้านเข้าไว้ด้วยกัน Dual Image QR Code เป็น QR Code ที่มนุษย์สามารถเข้าใจได้ผ่านมุมมองที่แตกต่างกันและยังมีความสามารถในการเก็บความจุของข้อความได้มากถึงสองข้อความ โดยมีหลักการคือ จะเป็น QR Code ในรูปแบบรูปภาพที่มีความสวยงาม และผู้ใช้จะสังเกตเห็น QR Code รูปภาพที่มีความสามารถในการสื่อความหมายกับข้อความใน QR Code ทั้ง 2 ข้อความได้ ผ่านมุมมองที่แตกต่างกันสองมุมมอง และทั้งสองมุมมองสามารถสแกนเพื่อถอดรหัสข้อความ โดยจะได้ข้อความจากการที่ถอดรหัสข้อความออกมาได้ถึงสองข้อความที่แตกต่างกัน และยังสามารถถอดรหัสข้อความได้ผ่านการใช้โปรแกรมถอดรหัสข้อความ QR Code แบบมาตรฐาน ดูรูปภาพที่ 1-1 ประกอบ



ภาพที่ 1-1 แสดงตัวอย่าง Dual Image QR Code ในมุมมองต่างๆ

งานวิจัยของเราจะมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของ QR Code อยู่ทั้งหมด 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเราจะทำการปรับเปลี่ยน QR Code แบบมาตรฐานเพื่อให้เป็น QR Code แบบ Halftone (Chu et al., 2013) โดยการใช้รูปภาพที่สื่อความหมายกับข้อความที่ฝังอยู่ใน QR Code ในการเข้ารหัสก่อน เพื่อให้ QR Code มีความสวยงามและยังสามารถสื่อความหมายสำหรับการมองเห็นของมนุษย์ได้มากยิ่งขึ้น ขั้นตอนที่สองจะเป็นการเพิ่มความจุของข้อความใน QR Code โดยการใช้แนวคิดการทำภาพสามมิติด้วยการใช้ภาพเลนส์หรือการทำภาพแบบเลนติคิวลาร์ (Lenticular Image) ซึ่งเป็นการเพิ่มความจุให้กับ QR Code ให้ QR Code สามารถเก็บข้อความได้เพิ่มมากขึ้น จากนั้นเราจะทำการประเมินการใช้งานของ Dual Image QR Code ที่เรานำเสนอด้วยการทดสอบอย่างเข้มงวดและมีการปรับปรุงการตั้งค่าต่างๆเพื่อให้ได้ Dual Image QR Code ที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานจริงมากที่สุด ในสถานการณ์ต่างๆ

ตัวอย่างการใช้งาน Dual Image QR Code เช่น เมื่อเจ้าของแอปพลิเคชันต้องการโปรโมทแอปพลิเคชันผ่านการโปรโมทในรูปแบบ การ์ดหรือบัตรโปรโมท เมื่อนำ Dual Image QR Code ที่มีการเข้ารหัสข้อความในรูปแบบลิงก์เพื่อที่จะนำผู้ใช้งานเข้าไปดาวน์โหลดแอปพลิเคชันตามระบบปฏิบัติการต่างๆ เมื่อผู้ใช้งานสังเกต QR Code จากด้านหลังจะเห็นโลโก้ Android และเมื่อสแกนผ่านเครื่องอ่าน QR Code จะนำผู้ใช้ไปที่ลิงก์ดาวน์โหลดที่อยู่ในร้านค้า Google Play Store และเมื่อผู้ใช้งานสังเกตจากด้านขวาของ QR Code จะเห็นโลโก้ Apple และเมื่อสแกนผ่านเครื่องอ่าน QR Code จะนำผู้ใช้ไปที่ลิงก์ดาวน์โหลดที่อยู่ในร้านค้า Apple App Store

1.2 วัตถุประสงค์

สร้างคิวอาร์โค้ดแบบทวิภาพ (Dual Image QR Code) ที่มนุษย์สามารถคาดเดาได้ว่า จะเจอกับข้อความอะไรอยู่ภายใต้ QR Code และสามารถรู้ได้ว่าควรสแกนที่มุมไหน นอกจากนี้ยังสามารถเก็บข้อความได้มากถึงสองชุดข้อมูล

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 Dual Image QR Code สามารถเก็บข้อความได้ทั้งหมด 2 ข้อความ
- 1.3.2 Dual Image QR Code จะอยู่ในรูปแบบของ QR Code รูปภาพ สีขาวและสีดำ
- 1.3.3 ขนาดของ Dual Image QR Code มี 3 ขนาด คือ 3x3 นิ้ว, 4x4 นิ้ว, 5x5 นิ้ว

1.3.4 ในการทดสอบจะมีการทดสอบบนระบบปฏิบัติการ iOS 15.5 และ ใช้การสแกนผ่านโปรแกรมสแกน QR Code ของ iPhone 13 Pro Max

1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

- 1.4.1 แผ่น Lenticular sheet ขนาด 50 LPI
- 1.4.2 ขาดังกล้อง
- 1.4.3 ไมโครแทรกเตอร์แบบครึ่งวงกลม เพื่อวัดมุม
- 1.4.4 มือถือระบบปฏิบัติการ iOS รุ่น iPhone 13 Pro max ใช้ iOS เวอร์ชัน 15.5
- 1.4.5 ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการปรับปรุงระบบในงานวิจัย คือ คอมพิวเตอร์โน้ตบุค ASUS ระบบ Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz 2.59 GHz และ RAM ขนาด 16 GB ระบบปฏิบัติการ Window 10
- 1.4.6 เครื่องปริ้น HP LaserJet 600 M602
- 1.4.7 กระดาษสำหรับปริ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในงานวิจัย

- 1.5.1 สามารถเก็บข้อมูลได้มากยิ่งขึ้นมากกว่า QR Code แบบทั่วไป
- 1.5.2 มีความสวยงาม ซึ่งทำให้ผู้ใช้เข้าใจได้ผ่านมุมมองที่แตกต่างกัน ผ่านรูปแบบที่สื่อความหมายกับข้อความที่ฝังอยู่ใน QR Code
- 1.5.3 ผู้ใช้รู้ว่าควรสแกน QR Code ที่มุมไหนเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่รวดเร็วที่สุด
- 1.5.4 สามารถใช้ได้ สถานการณ์ที่หลากหลาย เช่น การโฆษณาผ่านการ์ดหรือแผ่นใบปลิว ที่มีพื้นที่จำกัด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ การสร้างคิว QR Code แบบทั่วไป วิธีการปรับปรุง QR Code แบบ Halftone การปรับปรุง QR Code ในรูปแบบต่างๆ การสร้างรูปภาพแบบสองมุมมองด้วยเทคนิค Lenticular Image และการวัดผล

2.1 ส่วนประกอบของ QR Code

QR Code ย่อมาจาก Quick Response Code แปลว่าโค้ดที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว สามารถเก็บข้อมูล ได้ทั้งตัวอักษร ตัวเลข และ Binary เช่น ชื่อเว็บไซต์, เบอร์โทรศัพท์, ข้อความ, E-mail ฯลฯ คิวอาร์โค้ดประกอบด้วยสี่เหลี่ยมสีขาวดำ ที่เรียกว่าโมดูล และมีการแปลงข้อมูล (Encode) และถอดรหัส (Decode) ด้วยการใช้รูปแบบ 2D ด้วย QR Code ถูกคิดค้นสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ของญี่ปุ่นโดยบริษัท Denso Wave1 ในปี 1994 ลักษณะที่สำคัญที่สุดของรหัสนี้คือขนาดงานพิมพ์ที่มีขนาดเล็กและมีกระบวนการอ่านความเร็วสูง การรับรอง QR Code ดำเนินการโดย International Organization of Standardization (ISO/IEC 18004, 2006) รูปภาพที่ 2-1 ประกอบ โดยโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆของ QR Code มีดังนี้



ภาพที่ 2-1 ตัวอย่าง QR Code

2.1.1 Bitstream

Bitstream คือ ไบนารีที่ประกอบด้วยบิต 0 และ 1 ได้มาจากการแปลง Data Characters ตามหลักการเข้ารหัสของ QR Code

2.1.2 โมดูล (Module)

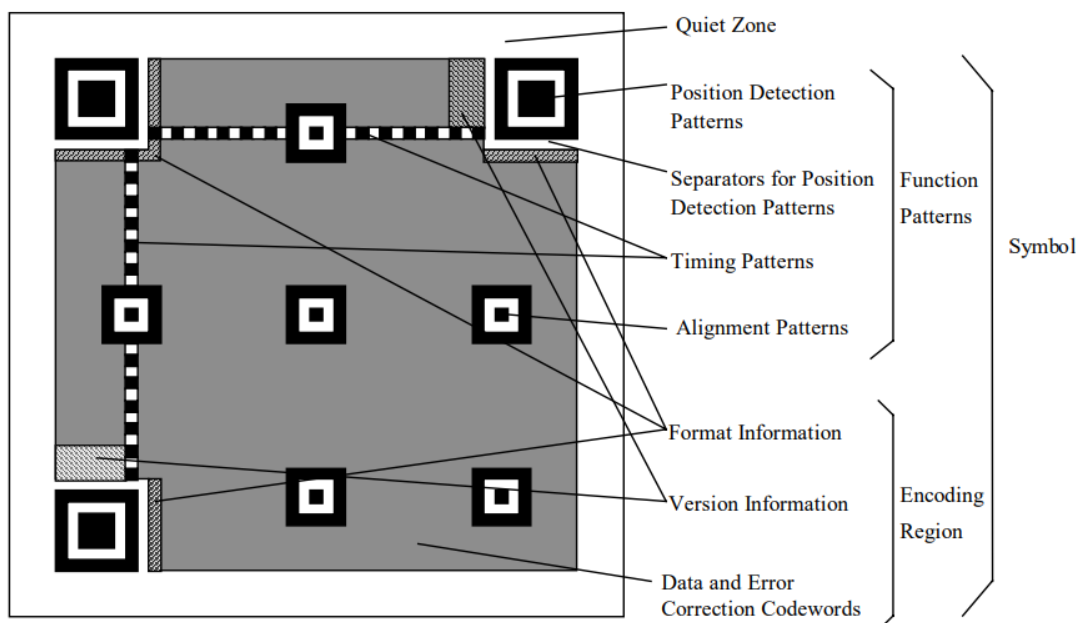
QR Code จะประกอบด้วย สีเหลี่ยมสีดำและสีเหลี่ยมสีขาว โดยสีเหลี่ยมแต่ละบล็อกเหล่านี้จะเรียกกันว่า โมดูล สำหรับการแทนข้อมูลในโมดูลแต่ละโมดูลนั้นจะแทนบิต 1 ด้วยโมดูลในโทนมืดหรือสีดำ (Dark Module) และบิต 0 จะถูกแทนด้วยโมดูลในโทนสว่างหรือสีขาว (Light Module)

การวางตำแหน่งในโมดูลนั้นจะถูกกำหนดโดยแถว (Row) และคอลัมน์ (Column) โดยในฟังก์ชันรูปแบบสัญลักษณ์จะใช้ I, J โดยให้ I เป็นแถว นับจากบนลงล่างและให้ J เป็นคอลัมน์ นับจากซ้ายไปขวา โดยการนับโมดูลจะเริ่มนับจากโมดูลแรกที่โมดูล 0 หรือโมดูล (0,0) จะอยู่ที่มุมซ้ายบนของสัญลักษณ์

2.1.3 Codewords

Codewords เป็นกลุ่มของโมดูล หลังจากการเข้ารหัส Bitstream ซึ่ง 1 Codeword จะประกอบด้วย 8 บิต หรือมี 8 โมดูลหรือ 8-bit Codewords ซึ่งจำนวน Codewords จะขึ้นอยู่กับการใช้ เวอร์ชัน (Version) ของ QR Code

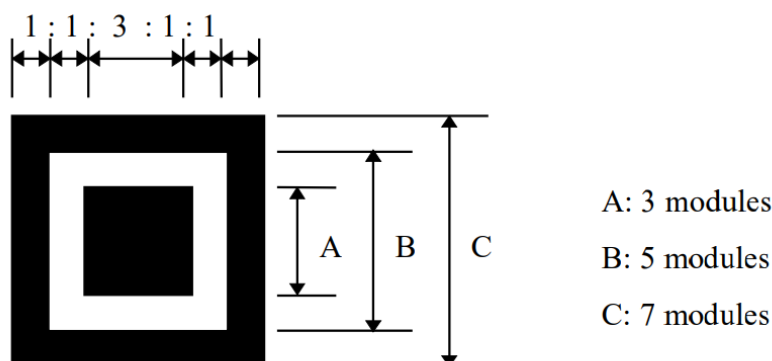
2.1.4 โครงสร้างของ QR Code



ภาพที่ 2-2 แสดงโครงสร้างของ QR Code (ISO/IEC 18004, 2006)

2.1.4.1 Function Pattern เป็นส่วนที่ใช้สำหรับระบุตำแหน่งพร้อมทั้งปรับปรุงร่างของ QR Code เพื่อใช้สำหรับถอดรหัสข้อมูล ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1) Finder Pattern เป็นส่วนประกอบที่ใช้สำหรับระบุทิศทางของ QR Code และยังทำให้ QR Code สามารถอ่านได้ 360° รอบทิศทางอีกด้วย ซึ่งใน Finder Pattern จะประกอบด้วย Finder Pattern ใน 3 ตำแหน่ง ได้แก่ มุมบนซ้าย บนขวาและล่างซ้าย Finder Pattern ทั้ง 3 ส่วนจะประกอบด้วยสีเหลี่ยมที่ซ้อนทับกันอยู่ด้วยกัน 3 สีเหลี่ยม โดยสีเหลี่ยมทั้ง 3 จะมีขนาดที่แตกต่างกันและสีโมดูลที่แตกต่างกัน โดยจะประกอบด้วย โครงสร้างโมดูลสีดำขนาด 7x7 โมดูล, โครงสร้างโมดูลสีขาวขนาด 5x5 โมดูล และโครงสร้างโมดูลสีดำขนาด 3x3 โมดูล โดยจะมีอัตราส่วนของ Finder Pattern คือ 1:1:3:1:1 ดังแสดงในภาพที่ 2-3



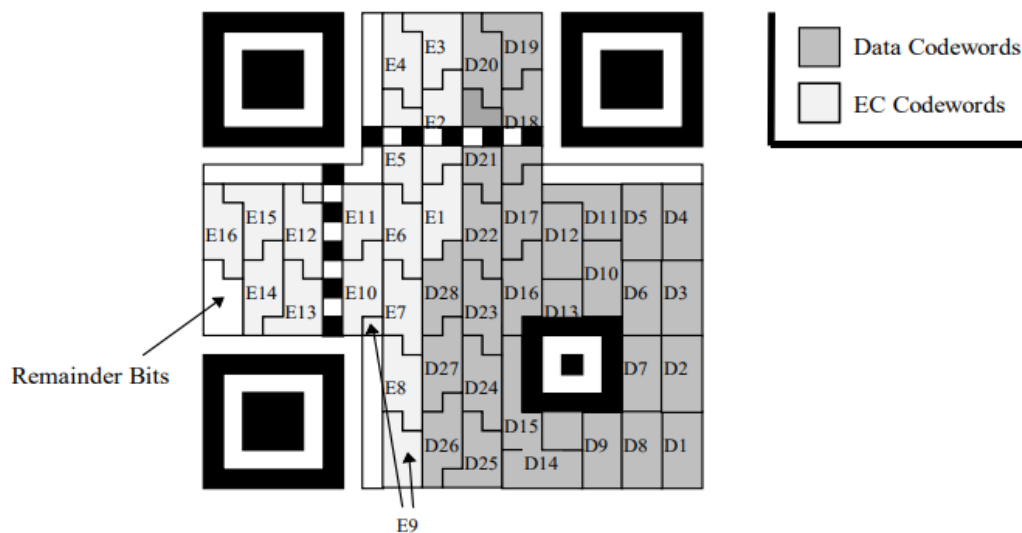
ภาพที่ 2-3 แสดงโครงสร้างของ Finder Pattern (ISO/IEC 18004, 2006)

- 2) Timing Pattern เป็นโมดูลสีขาวสลับสีดำ ซึ่งมีหน้าที่ในการตรวจสอบพิกัดของ QR Code โดยทั่วไป Timing Pattern จะวางอยู่ในตำแหน่งระหว่าง Finder Pattern แต่ละมุม
- 3) Alignment Pattern เป็นส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ในการแก้ไขการบิดเบือนของ QR Code โดยเมื่อ QR Code มีการโค้งหรือบิดงอ โดยส่วนใหญ่ Alignment Pattern จะเริ่มปรากฏใน QR Code เวอร์ชันที่ 2 และจะมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อ QR Code มีเวอร์ชันที่สูงมากขึ้น
- 4) Quiet Zone เป็นบริเวณช่องว่างที่ปราศจากเครื่องหมายใดๆ โดยจะพบปรากฏอยู่บริเวณโดยรอบของ QR Code และมีลักษณะเป็นพื้นที่โมดูลสว่าง (Light Module) หรือโมดูลสีขาว
- 5) Separator เป็นส่วนที่มีลักษณะพื้นที่โมดูลสว่าง (Light Module) หรือโมดูลสีขาวทั้งหมด เป็นแนวยาวขนาด 1 โมดูล ใช้สำหรับแบ่งส่วนของ Finder Pattern ออกจากส่วนที่เหลือทั้งหมดใน QR Code

2.1.4.2 Encoding Region เป็นส่วนประกอบที่ใช้ในการเข้ารหัสของ QR Code ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

- 1) Format Information จะประกอบด้วยส่วนในการแก้ไขความผิดพลาดและรูปแบบมาร์กของ QR Code โดยในส่วนนี้จะเป็นส่วนแรกที่อ่านเมื่อมีการถอดรหัสผ่าน QR Code
- 2) Version Information ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการบอก Version ของ QR Code จะอยู่ในตำแหน่งทางด้านข้างด้านซ้ายของ Finder Pattern มุมขวาบนและอยู่บน Finder Pattern มุมซ้ายล่าง
- 3) Data and Error Correction Codewords เป็นส่วนที่ใช้ในการเก็บข้อมูล (Data Codewords) และส่วนในการแก้ไขความผิดพลาด (Error Correction Codewords) ของ QR Code จะมีลักษณะเป็นอาร์เรย์แถวและคอลัมน์ โดยในแต่ละโมดูล จะถูกเก็บเป็นเลขฐาน 2 (1 และ 0) จะมีลักษณะเป็นการเรียงต่อกันโดยจะเริ่มต้นจาก Data Codewords และเมื่อวางบิตของ Data Codewords เติมก็จะวางต่อยับบิตของ Error Correction Codewords

ตัวอย่าง การวางตำแหน่งของ Data Codewords และ Error Correction Codewords ในรูปภาพที่ 2-4 จะแสดงการวางตำแหน่ง (โซน A) ของ Data Codewords (D1-D28) และการวางตำแหน่ง (โซน B) ของ Error Correction Codewords (E1-E16)



ภาพที่ 2-4 แสดงการจัดวาง Data Codewords และ Error Correction Codewords (ISO/IEC 18004, 2006)

4) Remainder Bits จะอยู่ในตำแหน่งสุดท้ายต่อจาก Error Correction Codewords โดยจะมีลักษณะเป็นบิตที่เหลือจากการเข้ารหัส QR Code ซึ่งจะมีไม่ครบ 8 บิต หรือ 1 Codeword

2.1.4.3 รูปแบบอักขระภาษาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลของ QR Code (Data characters) รูปแบบและประเภทในการเก็บข้อมูลใน QR Code มีอยู่ 4 ประเภท ดังนี้

1) Numeric data (0 - 9) จะเก็บข้อมูลในรูปแบบของตัวเลขเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะสามารถเก็บความจุของข้อมูลได้สูงสุดถึง 7,089 ตัวหรือน้อยกว่า

2) Alphanumeric data (0 - 9, A - Z, \$ # % @ & * + - . : /) จะเก็บข้อมูลประเภทไบนารี 8 บิต โดยจะสามารถเก็บความจุของข้อมูลได้สูงสุด 2,953 ตัวหรือน้อยกว่า

3) 8-bit byte data จะเก็บข้อมูลประเภทของตัวเลข ตัวอักษรภาษาอังกฤษ และอักขระพิเศษ โดยจะสามารถเก็บความจุของข้อมูลได้สูงสุด 4,296 ตัวหรือน้อยกว่า

4) Kanji Data จะเก็บ ข้อมูลประเภทของตัวอักษร คันจิ/คะนะ โดยจะสามารถเก็บความจุของข้อมูลได้สูงสุด 1,817 ตัวหรือน้อยกว่า

2.1.4.4 การแก้ไขความผิดพลาด (Error Correction) ส่วนของการแก้ไขความผิดพลาด (Error Correction) คือ เปรอร์เซ็นต์ข้อมูลที่เมื่อมีการสูญเสียข้อมูลที่ไม่เกินกำหนดไว้จะสามารถกู้ข้อมูลนั้นกลับมาได้ และสามารถแบ่งออกเป็นแต่ละระดับ ดังนี้

- 1) Level L ความผิดพลาด 7% หรือน้อยกว่าจึงจะสามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้
- 2) Level M ความผิดพลาด 15% หรือน้อยกว่าจึงจะสามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้
- 3) Level Q ความผิดพลาด 25% หรือน้อยกว่าจึงจะสามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้

4) Level H ความผิดพลาด 30% หรือน้อยกว่าจึงจะสามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้ การสูญเสียข้อมูล หมายถึง การเกิดสัญญาณรบกวนที่มีผลต่อการอ่านค่าโมดูลนั้นๆ ซึ่งอาจเกิดจากการที่ โมดูลมีการเสียหาย หรืออาจมีการขาดของ QR Code โดยในการจัดการกับสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่มักจะใช้ Reed-Solomon Error Correction (RS Code) ในการเข้ารหัส Error Correction ซึ่งเป็นการเข้ารหัสแบบ 8 บิต โดยถ้าข้อมูลหายไป 1 บิตข้อมูลที่เหลืออีก 7 บิตจะสูญเสียไปด้วย

โดยการคำนวณหา Error Correction นั้นจะคำนวณในส่วน Encoding Region ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการวาง Data Codewords และ Error Correction Codewords ดังสมการที่ 2-1

$$\text{Error Correction} = N \times 100 / (D+E) \quad (2-1)$$

N = จำนวน Data Codewords ที่สูญเสีย

D = จำนวน Data Codewords

E = จำนวน Error Codewords

ตารางที่ 2-1 แสดงจำนวน Error Correction Codewords (ISO/IEC 18004, 2006)

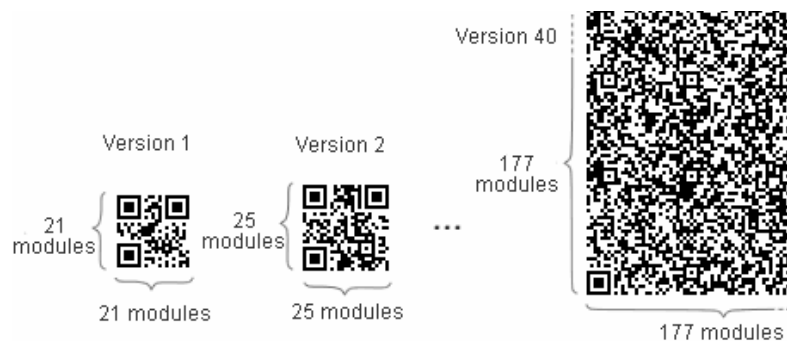
Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)
1	26	L	7	1	(26,19,2)
		M	10	1	(26,16,4)
		Q	13	1	(26,13,6)
		H	17	1	(26,9,8)
2	44	L	10	1	(44,34,4)
		M	16	1	(44,28,8)
		Q	22	1	(44,22,11)
		H	28	1	(44,16,14)

2.1.4.4 เวอร์ชัน (Version) และขนาด (Size) ของ QR Code จำนวนเวอร์ชันของ QR Code มีตั้งแต่เวอร์ชัน 1 – 40 โดยเวอร์ชัน 1 มีขนาดอยู่ที่ 21 x 21 โมดูล และเมื่อเพิ่มเวอร์ชันขึ้นอีก 1 เวอร์ชัน จะมีการเพิ่มจำนวนของโมดูลทั้งด้านกว้างและด้านยาวอีกอย่างละ 4 โมดูล ดังสมการที่ 2-2

$$\text{จำนวนโมดูลของ QR Code} = (21 + ((V - 1) \times 4)) \times (21 + ((V - 1) \times 4)) \text{ โมดูล} \quad (2-2)$$

โดยที่ V = เวอร์ชันของ QR code

ดังนั้น QR Code เวอร์ชัน 20 = $(21 + ((20 - 1) \times 4)) \times (21 + ((20 - 1) \times 4)) = 97 \times 97$ โมดูล, QR Code เวอร์ชัน 40 = $(21 + ((40 - 1) \times 4)) \times (21 + ((40 - 1) \times 4)) = 177 \times 177$ โมดูล



ภาพที่ 2-5 แสดงจำนวนโมดูลและขนาดของ QR Code เมื่อ Version เปลี่ยนไป (ISO/IEC 18004, 2006)

2.1.4.5 ความจุของข้อมูล (Data capacity) ที่เก็บได้ใน QR Code ความจุของข้อมูล (Data capacity) หมายถึง จำนวนของตัวอักษร ตัวเลขหรือสัญลักษณ์ (Characters) ที่สามารถจัดเก็บได้ใน QR Code โดยทั่วไปความจุที่สามารถเก็บได้สูงสุดจะขึ้นอยู่กับ Version, Error Correction ของภาษาที่เข้ารหัส ดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 แสดงความจุของข้อมูลที่เก็บได้ใน QR Code (ISO/IEC 18004, 2006)

Version	Module	Error Correction Level	Number of data codewords	Number of data bits	Data capacity			
					Numeric	Alphanumeric	8-bit	kanji
1	21 x 21	L	19	152	41	25	17	10
		M	16	128	34	20	14	8
		Q	13	104	27	16	11	7
		H	9	72	17	10	7	4
2	25 x 25	L	34	272	77	47	32	20
		M	28	224	63	38	26	16
		Q	22	176	48	29	20	12
		H	16	128	34	20	14	8

ตารางที่ 2-2 แสดงความจุของข้อมูลที่เก็บได้ใน QR Code (ISO/IEC 18004, 2006) (ต่อ)

Version	Module	Error Correction Level	Number of data codewords	Number of data bits	Data capacity			
					Numeric	Alphanumeric	8-bit	kanji
3	29 x 29	L	55	440	127	77	53	32
		M	44	352	101	61	42	26
		Q	34	272	77	47	32	20
		H	26	208	58	35	24	15
4	33 x 33	L	80	640	187	114	78	48
		M	64	512	149	90	62	38
		Q	48	384	111	67	46	28
		H	36	288	82	50	34	21

2.1.5 การเข้ารหัส QR Code ในส่วน Data Codewords

โดย Data Codewords เป็นส่วนประกอบหนึ่งใน Encoding Region ซึ่งขั้นตอนแรกในการสร้าง QR Code คือ การสร้าง Bitstream ที่เป็นการเปลี่ยนข้อมูล (Data) มาเป็น Binary และมีการใส่ข้อมูลที่เกี่ยวกับ โหมด ของรูปแบบภาษาที่ QR code เก็บรวบรวมข้อมูลรวมถึงความยาวของข้อมูล โดยจะสาธิตการเข้ารหัส “CHAKRIT” ที่ Error Correction Level L (ความผิดพลาด 7%)

2.1.5.1 การเข้ารหัสข้อมูลเพื่อระบุโหมด โดยในส่วนนี้จะเป็นการใช้ Bitstream จำนวน 4 บิต ในการเลือกรูปแบบภาษาที่ QR Code ใช้ในการเก็บข้อมูล โดยจะมีการแบ่งโหมดต่างๆตามลักษณะดังนี้

- 1) โหมด Numeric จะใช้ Bitstream เป็น 0001
- 2) โหมด Alphanumeric จะใช้ Bitstream เป็น 0010
- 3) โหมด 8-bit byte จะใช้ Bitstream เป็น 0100
- 4) โหมด kanji จะใช้ Bitstream เป็น 1000

โดยข้อมูล (Data) ที่ใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลจะใช้คำว่า “CHAKRIT” จะเป็นรูปแบบที่อยู่ในโหมดข้อมูลแบบ Alphanumeric ดังนั้นจึงจะสามารถเริ่มต้น Bitstream ที่ “0010” แสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 แสดงการเข้ารหัสข้อมูล Character เพื่อแปลงข้อมูลในโหมดต่างๆ

Index	Char	CP hex	NM	AM	BM	KM
0	C	U+43	No	Yes	Yes	No
1	H	U+48	No	Yes	Yes	No
2	A	U+41	No	Yes	Yes	No
3	K	U+48	No	Yes	Yes	No
4	R	U+52	No	Yes	Yes	No
5	I	U+49	No	Yes	Yes	No
6	T	U+54	No	Yes	Yes	No
Mode				Encodable		
Numeric				No		
Alphanumeric				Yes		
Byte				Yes		
Kanji				No		

2.1.6 การเข้ารหัสความยาวข้อมูล

ขั้นตอนนี้จะบอกถึงความยาวของข้อมูลที่เข้ารหัสใน QR Code โดยความยาวของ Bitstream จะขึ้นอยู่กับ Version ของ QR Code และรูปแบบของความยาวของการเข้ารหัสข้อมูลเป็น ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 แสดงการระบุโหมดและความยาวในการเข้ารหัสข้อมูลของ QR Code (ISO/IEC 18004, 2006)

Version QR Code	โหมด			
	Numeric (บิต)	Alphanumeric (บิต)	8-bit byte (บิต)	Kanji (บิต)
1-9	10	9	8	8
10-26	12	11	16	10
27-40	14	13	16	12

จากการเข้ารหัสข้อมูล “CHAKRIT” มีทั้งหมด 7 ตัวอักษร สามารถแปลงเป็นเลขฐานสองได้ 111 เมื่อทำการเข้ารหัส QR Code Version 1 โดยโหมดที่ใช้เป็นโหมด Alphanumeric จากข้อมูลต้องเข้ารหัสเป็น Binary String จำนวน 9 บิต จะได้ “000000111” เมื่อรวมกับ Binary String จากการระบุโหมดเริ่มแรกจะได้ “0010 000000111”

2.1.7 การเข้ารหัสข้อมูล

2.1.7.1 ทำการแบ่งคำที่ต้องการเข้ารหัสออกเป็นคู่ จากตัวอย่างจะสามารถแบ่งได้เป็น “CH, AK, RI, T”

2.1.7.2 ทำการแปลงตัวอักษรเป็นรหัสตาม ตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 แสดงการเข้ารหัสและถอดรหัสสำหรับโหมด Alphanumeric (ISO/IEC 18004, 2006)

Char	Value	Char	Value
0	0	O	24
1	1	P	25
2	2	Q	26
3	3	R	27
4	4	S	28
5	5	T	29
6	6	U	30
7	7	V	31
8	8	W	32

ตารางที่ 2-5 แสดงการเข้ารหัสและถอดรหัสสำหรับโหมด Alphanumeric (ISO/IEC 18004, 2006) (ต่อ)

Char	Value	Char	Value
9	9	X	33
A	10	Y	34
B	11	Z	35
C	12	SP	36
D	13	\$	37
E	14	%	38
F	15	*	39
G	16	+	40
H	17	-	41
I	18	.	42
J	19	/	43
K	20	:	44

วิธีการคำนวณการเข้ารหัสตัวอักษร จะใช้วิธีการ นำตัวอักษรตัวแรกคูณ 45 แล้วนำมาบวกกับตัวอักษรตัวที่จับคู่กันที่ทำการแปลงจากตารางที่ 2-5 เมื่อคำนวณเสร็จจะทำการแปลงให้เป็น Bitstream จำนวน 11 บิต และเมื่อตัวอักษรตัวสุดท้ายไม่มีคู่ ให้เปลี่ยนแปลงเป็นรหัสตาม ตารางที่ 2-6 แล้วแปลงเป็น Bitstream จำนวน 6 บิต ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตารางที่ 2-6 แสดงตัวอย่างการเข้ารหัสข้อมูล (ISO/IEC 18004, 2006)

Char	Value Symbol	Combined	Bits
CH	$(45 \times 12) + 17$	577	01000101101
AK	$(45 \times 10) + 20$	470	00111010110
RI	$(45 \times 27) + 18$	1233	10011010001
T	29	29	011101

เมื่อนำมาเรียง Bitstream ทั้งหมดจนถึงขั้นตอนนี้จะได้ “0010 00000111 01000101101 00111010110 10011010001 011101”

2.1.7.3 ทำการจัดเรียงกลุ่มใหม่ให้อยู่ในรูปของ 8 บิต ถ้าบิตสุดท้ายไม่เต็มให้เติม 0 จนครบ เมื่อนำมาเรียง Bitstream ทั้งหมดจนถึงขั้นตอนนี้จะได้ “00100000 00111010 00101101 00111010 11010011 01000101 11010000”

2.1.7.4 ทำการใส่ Pad Characters เพื่อเพิ่มความยาว Bitstream ให้เต็ม ถ้า Bitstream มีความยาวสั้นเกินกว่าที่กำหนดเกินกว่า Data Codewords ที่กำหนดไว้ในแต่ละ Version ซึ่งการเติมจะทำการเติม Bitstream 11101100 และ 00010001 สลับกันจนได้จำนวน Data Codewords เท่ากับในตารางที่ 2-2

ในตัวอย่างที่กำหนด พบว่า QR Code Version 1 และ Error Correction Level L ต้องทำการสร้าง Data Codewords จำนวน 19 Codewords ขนาดยาว 152 บิต ดังนั้นสามารถรวมเป็น Bitstream ที่สมบูรณ์ได้ดังนี้ “00100000 00111010 00101101 00111010 11010011 01000101 11010000 11101100 00010001 11101100 00010001 11101100 00010001 11101100 00010001 11101100 00010001 11101100 00010001” หรือ “32 58 45 58 211 69 208 236 17 236 17 236 17 236 17 236 17 236 17 236 17” ในเลขฐาน 10

2.1.8 การเข้ารหัส Error Correction Codewords (EC Codewords, ECC)

ใน QR Code ส่วนของ Error Correction Codewords เป็นส่วนที่มีความสามารถในการกู้คืนความผิดพลาดของ QR Codes ซึ่งจะเป็นการสร้างข้อมูลขึ้นมาเพื่อให้แน่ใจว่า QR code ยังสามารถถอดรหัสข้อมูลได้แม้ว่าส่วนหนึ่งจะหายไป โดยใช้หลักการของ Reed Solomon Error Correction (RS Code) มาช่วย โดยมีกระบวนการที่สร้างเป็น Polynomial โดยใช้ Bitstream จากส่วนของการเข้ารหัส Data Codewords มาช่วยเพื่อสร้าง Error Correction Codewords โดย Generator Polynomial เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า A Finite Field, A Galois Field ซึ่งจะมีอยู่ 256 องค์ประกอบ GF(256) โดย The Generator Polynomial จะอยู่ในรูปแบบ ดังสมการที่ 2-3 (Sklar, 2001)

$$(X - \alpha)(X - \alpha^2) \dots (X - \alpha^t) \quad (2-3)$$

โดยความยาวของ Bitstream ของ Error Correction Codewords (ECC) นั้นจะขึ้นอยู่กับเวอร์ชันและ Error Correction ใน QR Code ซึ่งจากตัวอย่างจะเป็นการใช้ QR Code Version และใช้ Error Correction Level L จากตารางที่ 2-1 จำนวน Error Correction Codewords จะมีค่าเท่ากับ 7 จะสามารถหา Generator Polynomial ได้จาก สมการที่ 2-4 (Sklar, 2001)

$$g(X) = X^7 + \alpha^{87} X^6 + \alpha^{229} X^5 + \alpha^{146} X^4 + \alpha^{149} X^3 + \alpha^{238} X^2 + \alpha^{102} X + \alpha^{21} \quad (2-4)$$

สามารถหา Data Code words ได้ดังนี้ “32 58 45 58 211 69 208 236 17 236 17 236 17 236 17 236 17 236 17 236 17”

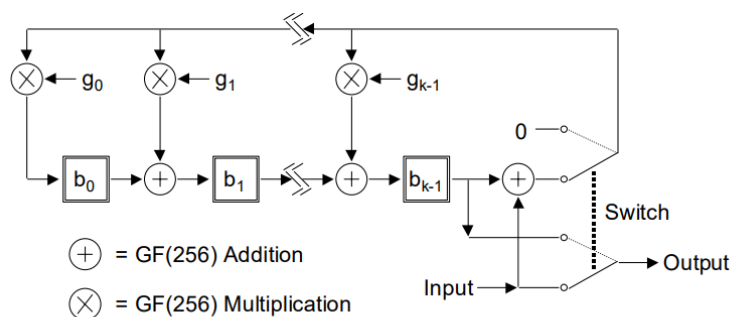
ซึ่งสามารถหา Coefficients calculation $f(x)$ โดยพิจารณาให้จำนวนสัมประสิทธิ์เท่ากับจำนวน Data Codewords ซึ่ง X ที่มีตัวยกกำลังมากที่สุดจะเท่ากับ 25 ได้ดัง สมการที่ 2-5 (Sklar, 2001)

$$\begin{aligned} f(X) = & 32X^{25} + 58X^{24} + 45X^{23} + 58X^{22} + 211X^{21} + 69X^{20} + 208X^{19} \\ & + 236X^{18} + 17X^{17} + 236X^{16} + 17X^{15} + 236X^{14} + 17X^{13} + 236X^{12} \\ & + 17X^{11} + 236X^{10} + 17X^9 + 236X^8 + 17X^7 + 0X^6 + 0X^5 + 0X^4 \\ & + 0X^3 + 0X^2 + 0X^1 + 0X^0 \end{aligned} \quad (2-5)$$

จากสมการที่ 2-5 สามารถแปลงสัมประสิทธิ์ (สามารถดูค่าจากภาคผนวก ตาราง ข-5 ประกอบ) ได้ดังสมการที่ 2-6 (Sklar, 2001)

$$\begin{aligned}
 f(X) = & \alpha^5 X^{25} + \alpha^9 X^{24} + \alpha^{18} X^{23} + \alpha^9 X^{22} + \alpha^{82} X^{21} + \alpha^{221} X^{20} + \alpha^{108} X^{19} \\
 & + \alpha^{122} X^{18} + \alpha^{100} X^{17} + \alpha^{122} X^{16} + \alpha^{100} X^{15} + \alpha^{122} X^{14} + \alpha^{100} X^{13} + \alpha^{122} X^{12} \\
 & + \alpha^{100} X^{11} + \alpha^{122} X^{10} + \alpha^{100} X^9 + \alpha^{122} X^8 + \alpha^{100} X^7
 \end{aligned}
 \tag{2-6}$$

โดยสามารถดำเนินการได้ตามวงจร Division ตามที่แสดงในภาพ 2-6 โดย b_0 ถึง b_{k-1} จะมีค่าเริ่มต้นเป็น 0 โดยจะมีสองช่วงในการเข้ารหัส ช่วงแรกสวิตช์จะอยู่ในตำแหน่งล่าง Data Codewords จะถูกส่งออกมาออกมาเป็นผลลัพธ์และดำเนินต่อไปในวงจร ในช่วงแรกของวงจรจะมีความสมบูรณ์หลังจาก N clock pulses ในช่วงที่ 2 ($n + 1 \dots n + k$ clock pulses) ที่สวิตช์อยู่ตำแหน่งบน Error correction $\epsilon_{k-1} \dots \epsilon_0$ จะถูกสร้างจากการกรองเป็นลำดับที่ Data input เป็น 0



ภาพที่ 2-6 แสดงวงจร Division (ISO/IEC 18004, 2006)

จากวงจรในภาพที่ 2-6 จะสามารถคำนวณ Error Correction Codewords ได้ตามภาพที่ 2-7

ดังนี้

		32x ²⁵⁺ , 50x ²⁴⁺ , 45x ²³⁺ , 59x ²²⁺ , 49x ²¹⁺ , 60x ²⁰⁺ , 0x ¹⁹⁺ , 51x ¹⁸⁺ , 51x ¹⁷⁺ , 204x ¹⁶⁺ , 236x ¹⁵⁺ , 17x ¹⁴⁺ , 51x ¹³⁺ , 51x ¹²⁺ , 51x ¹¹⁺ , 236x ¹⁰⁺ , 17x ⁹⁺ , 236x ⁸⁺ , 17x ⁷⁺ , 0x ⁶⁺ , 0x ⁵⁺ , 0x ⁴⁺ , 0x ³⁺ , 0x ²⁺ , 0x ¹⁺ , 0x ⁰																					
	0+	87+	229+	146+	238+	102+	21+																
	5	5	5	5	5	5	5																
	0 ²	=0 ³²	=0 ²³⁴	=0 ¹⁵¹	=0 ⁴³	=0 ¹⁰⁷	=0 ²⁸																
	32=	0	xor	xor	xor	xor	xor																
	0	105	214	145	8	65	104	53															
		105x ²⁴⁺ , 214x ²³⁺ , 145x ²²⁺ , 8x ²¹⁺ , 65x ²⁰⁺ , 104x ¹⁹⁺ , 53x ¹⁸⁺ , 51x ¹⁷⁺ , 204x ¹⁶⁺ , 236x ¹⁵⁺ , 17x ¹⁴⁺ , 51x ¹³⁺ , 51x ¹²⁺ , 51x ¹¹⁺ , 236x ¹⁰⁺ , 17x ⁹⁺ , 236x ⁸⁺ , 17x ⁷⁺ , 0x ⁶⁺ , 0x ⁵⁺ , 0x ⁴⁺ , 0x ³⁺ , 0x ²⁺ , 0x ¹⁺ , 0x ⁰																					
	0+	87+	229+	146+	238+	102+	21+																
	5	5	5	5	5	5	5																
	0 ²	=0 ⁸	=0 ¹⁴⁵	=0 ¹²	=0 ²⁰⁴	=0 ¹⁰⁷	=0 ²⁸																
	105=	0	xor	xor	xor	xor	xor																
	0	155	12	213	145	8	65	104	53	51	195												
		155x ²³⁺ , 12x ²²⁺ , 213x ²¹⁺ , 231x ²⁰⁺ , 188x ¹⁹⁺ , 211x ¹⁸⁺ , 195x ¹⁷⁺ , 204x ¹⁶⁺ , 236x ¹⁵⁺ , 17x ¹⁴⁺ , 51x ¹³⁺ , 51x ¹²⁺ , 51x ¹¹⁺ , 236x ¹⁰⁺ , 17x ⁹⁺ , 236x ⁸⁺ , 17x ⁷⁺ , 0x ⁶⁺ , 0x ⁵⁺ , 0x ⁴⁺ , 0x ³⁺ , 0x ²⁺ , 0x ¹⁺ , 0x ⁰																					
	0+	87+	229+	146+	238+	102+	21+																
	5	5	5	5	5	5	5																
	0 ²	=0 ¹⁷	=0 ⁴⁹	=0 ¹⁰⁸	=0 ¹¹¹	=0 ²⁰⁰	=0 ⁸⁴																
	xor	xor	xor	xor	xor	xor	xor																
	155=	0	12	213	145	8	65	104	53	51	195												
	0	128	229	146	238	102	21																
		128x ²²⁺ , 148x ²¹⁺ , 55x ²⁰⁺ , 114x ¹⁹⁺ , 207x ¹⁸⁺ , 156x ¹⁷⁺ , 199x ¹⁶⁺ , 204x ¹⁵⁺ , 236x ¹⁴⁺ , 17x ¹³⁺ , 51x ¹²⁺ , 51x ¹¹⁺ , 236x ¹⁰⁺ , 17x ⁹⁺ , 236x ⁸⁺ , 17x ⁷⁺ , 0x ⁶⁺ , 0x ⁵⁺ , 0x ⁴⁺ , 0x ³⁺ , 0x ²⁺ , 0x ¹⁺ , 0x ⁰																					
	0+	87+	229+	146+	238+	102+	21+																
	5	5	5	5	5	5	5																
	0 ²	=0 ⁷	=0 ⁹⁴	=0 ³⁶	=0 ¹⁵³	=0 ¹⁶⁶	=0 ²⁴⁵																
	xor	xor	xor	xor	xor	xor	xor																
	128=	0	148	55	114	207	156	204	204	199													
	0	229	229	146	238	102	21																
		229x ²¹⁺ , 252x ²⁰⁺ , 224x ¹⁹⁺ , 43x ¹⁸⁺ , 117x ¹⁷⁺ , 122x ¹⁶⁺ , 212x ¹⁵⁺ , 236x ¹⁴⁺ , 17x ¹³⁺ , 51x ¹²⁺ , 51x ¹¹⁺ , 236x ¹⁰⁺ , 17x ⁹⁺ , 236x ⁸⁺ , 17x ⁷⁺ , 0x ⁶⁺ , 0x ⁵⁺ , 0x ⁴⁺ , 0x ³⁺ , 0x ²⁺ , 0x ¹⁺ , 0x ⁰																					
	0+	87+	229+	146+	238+	102+	21+																
	5	5	5	5	5	5	5																
	0 ²	=0 ¹⁶⁹	=0 ¹⁶⁹	=0 ¹⁴³	=0 ⁶⁰	=0 ⁸³	=0 ¹⁶²																
	xor	xor	xor	xor	xor	xor	xor																
	229=	0	254	180	254	180	152	66	66	66													
	0	254	252	224	43	117	122	236	236	212													
		254x ²⁰⁺ , 180x ¹⁹⁺ , 146x ¹⁸⁺ , 212x ¹⁷⁺ , 51x ¹⁶⁺ , 152x ¹⁵⁺ , 66x ¹⁴⁺ , 17x ¹³⁺ , 51x ¹²⁺ , 51x ¹¹⁺ , 236x ¹⁰⁺ , 17x ⁹⁺ , 236x ⁸⁺ , 17x ⁷⁺ , 0x ⁶⁺ , 0x ⁵⁺ , 0x ⁴⁺ , 0x ³⁺ , 0x ²⁺ , 0x ¹⁺ , 0x ⁰																					
	0+	87+	229+	146+	238+	102+	21+																
	5	5	5	5	5	5	5																
	0 ²	=0 ⁸⁸	=0 ²⁰	=0 ¹⁵³	=0 ¹¹	=0 ¹²⁵	=0 ¹⁷																
	xor	xor	xor	xor	xor	xor	xor																
	229=	0	88	88	88	88	88																
	0	229	229	146	238	102	21																
		229x ¹⁹⁺ , 75x ¹⁸⁺ , 76x ¹⁷⁺ , 184x ¹⁶⁺ , 36x ¹⁵⁺ , 236x ¹⁴⁺ , 172x ¹³⁺ , 51x ¹²⁺ , 51x ¹¹⁺ , 236x ¹⁰⁺ , 17x ⁹⁺ , 236x ⁸⁺ , 17x ⁷⁺ , 0x ⁶⁺ , 0x ⁵⁺ , 0x ⁴⁺ , 0x ³⁺ , 0x ²⁺ , 0x ¹⁺ , 0x ⁰																					
	0+	87+	229+	146+	238+	102+	21+																
	5	5	5	5	5	5	5																
	0 ²	=0 ⁸⁸	=0 ¹⁷⁵	=0 ⁶²	=0 ²³⁴	=0 ²³⁷	=0 ¹⁹⁰																
	xor	xor	xor	xor	xor	xor	xor																
	254=	0	75	76	146	152	66	66	66	66													
	0	75	75	76	146	152	66	66	66	66													
		75x ¹⁹⁺ , 76x ¹⁸⁺ , 76x ¹⁷⁺ , 184x ¹⁶⁺ , 36x ¹⁵⁺ , 236x ¹⁴⁺ , 172x ¹³⁺ , 51x ¹²⁺ , 51x ¹¹⁺ , 236x ¹⁰⁺ , 17x ⁹⁺ , 236x ⁸⁺ , 17x ⁷⁺ , 0x ⁶⁺ , 0x ⁵⁺ , 0x ⁴⁺ , 0x ³⁺ , 0x ²⁺ , 0x ¹⁺ , 0x ⁰																					

ภาพที่ 2-7 แสดงการคำนวณ Error Correction Codewords (ISO/IEC 18004, 2006)

$g(x)(a^{128})x^7$	$133x^{14} + 121x^{13} + 131x^{12} + 55x^{11} + 91x^{10} + 46x^9 + 216x^8 + 17x^7 + 0x^6 + 0x^5 + 0x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0x^0$ $a^{128} \quad a^{212} \quad a^{247} \quad a^{185} \quad a^{82} \quad a^{130} \quad a^{251} \quad a^{100}$ $0+ \quad 87+ \quad 229+ \quad 146+ \quad 149+ \quad 238+ \quad 102+ \quad 21+$ $128 \quad 128 \quad 128 \quad 128 \quad 128 \quad 128 \quad 128 \quad 128$ $=a^{128} \quad =a^{215} \quad =a^{102} \quad =a^{19} \quad =a^{22} \quad =a^{111} \quad =a^{230} \quad =a^{149}$ $xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor$ $133= \quad 121= \quad 131= \quad 55= \quad 91= \quad 46= \quad 216= \quad 17=$ $0 \quad 150= \quad 199= \quad 109= \quad 177= \quad 224 \quad 44 \quad 181$
$g(x)(a^{160})x^5$	$150x^{13} + 199x^{12} + 109x^{11} + 177x^{10} + 224x^9 + 44x^8 + 181x^7 + 0x^6 + 0x^5 + 0x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0x^0$ $a^{180} \quad a^{118} \quad a^{133} \quad a^{86} \quad a^{203} \quad a^{240} \quad a^{42}$ $0+ \quad 87+ \quad 229+ \quad 146+ \quad 149+ \quad 238+ \quad 102+ \quad 21+$ $180 \quad 180 \quad 180 \quad 180 \quad 180 \quad 180 \quad 180 \quad 180$ $=a^{180} \quad =a^{12} \quad =a^{154} \quad =a^{71} \quad =a^{74} \quad =a^{153} \quad =a^{27} \quad =a^{201}$ $xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor$ $150= \quad 199= \quad 109= \quad 177= \quad 224= \quad 44= \quad 181= \quad 0=$ $0 \quad 10= \quad 84= \quad 13= \quad 105 \quad 79 \quad 185 \quad 56$
$g(x)(a^{21})x^4$	$117x^{11} + 14x^{10} + 228x^9 + 83x^8 + 247x^7 + 170x^6 + 101x^5 + 0x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0x^0$ $a^{21} \quad a^{199} \quad a^{156} \quad a^{200} \quad a^{232} \quad a^{151} \quad a^{72}$ $0+ \quad 87+ \quad 229+ \quad 146+ \quad 149+ \quad 238+ \quad 102+ \quad 21+$ $21 \quad 21 \quad 21 \quad 21 \quad 21 \quad 21 \quad 21 \quad 21$ $=a^{21} \quad =a^{108} \quad =a^{250} \quad =a^{167} \quad =a^{170} \quad =a^4 \quad =a^{123} \quad =a^{42}$ $xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor$ $117= \quad 14= \quad 228= \quad 83= \quad 247= \quad 170= \quad 101= \quad 0=$ $0 \quad 222 \quad 136 \quad 45 \quad 32 \quad 166 \quad 160 \quad 181$
$g(x)(a^{82})x^3$	$222x^{10} + 136x^9 + 45x^8 + 32x^7 + 166x^6 + 160x^5 + 161x^4 + 0x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0x^0$ $a^{82} \quad a^{103} \quad a^{18} \quad a^5 \quad a^{57} \quad a^{42}$ $0+ \quad 87+ \quad 229+ \quad 146+ \quad 149+ \quad 238+ \quad 102+ \quad 21+$ $62 \quad 62 \quad 62 \quad 62 \quad 62 \quad 62 \quad 62 \quad 62$ $=a^{82} \quad =a^{149} \quad =a^{38} \quad =a^{208} \quad =a^{211} \quad =a^{45} \quad =a^{194} \quad =a^{83}$ $xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor$ $222= \quad 136= \quad 45= \quad 32= \quad 166= \quad 160= \quad 161= \quad 0=$ $0 \quad 44 \quad 8 \quad 113 \quad 8 \quad 97 \quad 115 \quad 187$
$g(x)(a^{240})x^2$	$44x^8 + 113x^7 + 8x^6 + 97x^5 + 115x^4 + 187x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0x^0$ $a^{240} \quad a^3 \quad a^{84} \quad a^3 \quad a^{88} \quad a^{159} \quad a^{83}$ $0+ \quad 87+ \quad 229+ \quad 146+ \quad 149+ \quad 238+ \quad 102+ \quad 21+$ $240 \quad 240 \quad 240 \quad 240 \quad 240 \quad 240 \quad 240 \quad 240$ $=a^{240} \quad =a^{72} \quad =a^{214} \quad =a^{31} \quad =a^{134} \quad =a^{23} \quad =a^{87} \quad =a^8$ $xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor \quad xor$ $44= \quad 113= \quad 8= \quad 97= \quad 115= \quad 187= \quad 0= \quad 0=$ $0 \quad 109 \quad 136 \quad 84 \quad 187 \quad 122 \quad 196 \quad 64$
	$109x^8 + 136x^7 + 84x^6 + 97x^5 + 115x^4 + 187x^3 + 0x^2 + 0x^1 + 0x^0$ $a^{109x^8} \quad a^{136x^7} \quad a^{84x^6} \quad a^{97x^5} \quad a^{115x^4} \quad a^{187x^3} \quad a^{0x^2} \quad a^{0x^1} \quad a^{0x^0}$

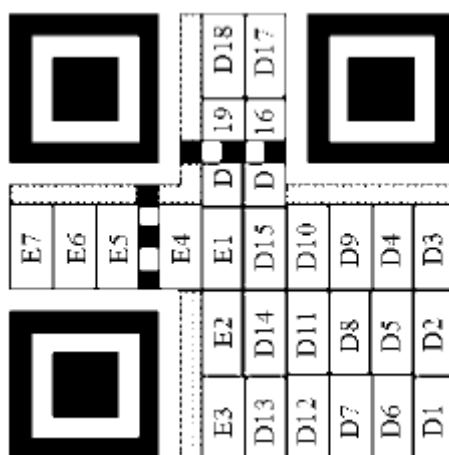
ภาพที่ 2-7 แสดงการคำนวณ Error Correction Codewords (ISO/IEC 18004, 2006) (ต่อ)

ขั้นต่อไปจะเป็นการวางข้อมูลในส่วน Data และ Error Correction และส่วนของ Remainder Codeword

2.1.8.1 ทำการแบ่ง Data Codewords ออกเป็น N Block ตามที่กำหนดไว้ตาม เวอร์ชัน (Version) และ Error Correction Level

2.1.8.2 สำหรับแต่ละ Data Block ให้คำนวณ Error Correction Codewords ที่สัมพันธ์กัน

2.1.8.3 รวบรวมส่วนของ Data และ Error Correction Codewords แต่ละ Block เช่น QR Code version 1 ที่ Error Correction L จะประกอบด้วย Data และ Error Correction อย่างละ 1 block ทั้งหมด 26 Codewords จะประกอบด้วย 19 data codewords และ 7 error correction ดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 แสดงการวาง Block ในส่วนของ Data และ Error Correction Codewords ใน QR Code version 1 (ISO/IEC 18004, 2006)

D1-D15 Data Block 1
 E1-E7 Error Correct Block 1

จากตัวอย่าง QR Code จะนำ 19 Data Codewords และ 7 Error Correction ที่คำนวณไว้มาเรียงต่อกัน ได้ดังนี้ “00100000 00111010 00101101 00111010 11010011 01000101 11010000 11101100 00010001 11101100 00010001 11101100 00010001 11101100 00010001 11101100 00010001 01111110 01111010 10100101 10000000 10110001 10010101 01001110”

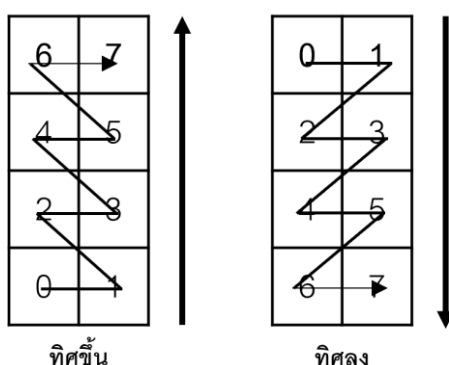
2.1.9 การวาง Codewords ในเมตริก (Codeword placement in matrix)

การวาง Codewords ในเมตริกจะมี 2 ลักษณะคือ การวางแบบปกติ (regular) และ แบบไม่ปกติ (irregular) ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งเมื่อเทียบกับสัญลักษณ์อื่นและ Function Pattern โดยส่วนมาก Codewords จะมีขนาด 2x4 โมดูล และมีสองทางสำหรับ Codewords คือ แนวตั้ง (กว้าง 2 โมดูล และสูง 4 โมดูล) และในแนวนอน (กว้าง 4 โมดูลและยาว 2 โมดูล) ในการวางที่ผิดปกติจะเป็นการวางเพื่อเป็นการเปลี่ยนทิศทาง ซึ่ง

ตำแหน่งในการวางจะขึ้นอยู่กับ Alignment Pattern หรือ Function Pattern อื่นๆ โดยตำแหน่งการวางจะเริ่มจากมุมล่างขวาและจะวางต่อกันขึ้นไปโดยสลับขวาไปซ้าย (Zigzag) โดยการกำหนดทิศทางจะมีหลักการดังนี้

2.1.9.1 ลำดับการวางบิต (Bit) โดยหลักการจะวางจากขวาไปซ้าย ทิศทางขึ้นไปหรือทิศทางลงตามทิศทางในการวาง

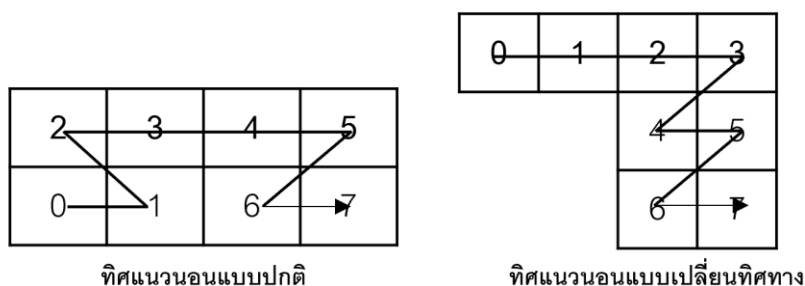
2.1.9.2 Significant Bit จะประกอบด้วยการวางบิต 7 บิต ในช่องของแต่ละ Codeword จะเป็นการวางตำแหน่งแรก และบิตที่ตามมาจะถูกวางในตำแหน่งถัดไป Significant Bit จะอยู่ในตำแหน่งขวาล่างเมื่อมีการวางบิตในทิศทางขึ้น และตำแหน่งขวบนเมื่อมีการวางบิตในทิศทางลง ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 แสดงการวางบิตในรูปแบบแนวตั้ง

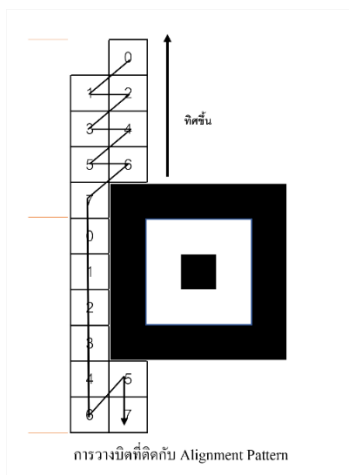
2.1.9.3 เมื่อวางไปจบถึงขอบแนวอนของ Alignment Pattern หรือ Timing Pattern ให้วางบิตอยู่เหนือหรือใต้ของ Pattern ทั้งสองโดยใช้รหัสต่อเนื่องกัน

2.1.9.4 เมื่อวางบิตถึงขอบแนวด้านบนหรือขอบแนวด้านล่างของสัญลักษณ์ เช่น ขอบของ QR Code, Format Information, Version หรือ Separator) ให้วางบิตที่เหลื่อไปทางด้านซ้ายหรือทำการกลับทิศทางดังภาพที่ 2-10



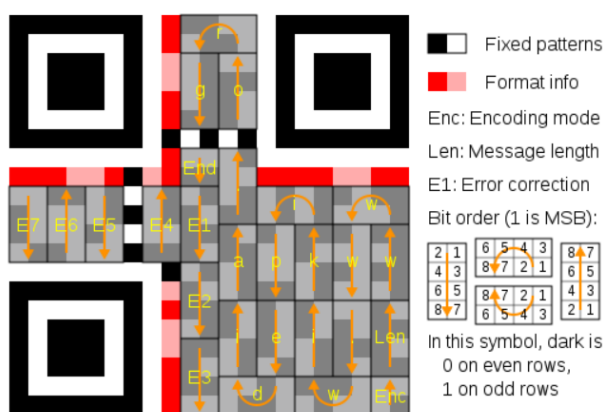
ภาพที่ 2-10 แสดงการวางบิตในรูปแบบแนวอน

2.1.9.5 เมื่อวางโมดูลทางขวามือจนถึง Alignment Pattern หรือพื้นที่ Version Information โดยบิตจะถูกวางแบบไม่ปกติ โดยจะทำการขยายคอลัมน์ที่หลักที่ติดอยู่กับ Alignment Pattern หรือ Version Information ถ้า Codeword สิ้นสุดก่อนจะวางคอลัมน์ถัดไป ให้อ่าง Significant Bit ของ Codeword ต่อไปในตำแหน่ง ดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 แสดงการวางบิตแบบไม่ปกติเมื่อวางติดกับ Alignment Pattern หรือ Version Information

โดยใน QR Code เวอร์ชัน 1 จะเป็นการเรียงโมดูลเป็นแบบปกติขนาด 2 x 4 โมดูล โดยในการวางแต่ละ Bitstream จะแบ่งวางทีละชุดจะแบ่งเป็นชุดละ 8 บิต ลงใน Codeword แต่ละชุด ซึ่งใน 1 บิต จะแทนด้วยโมดูลสีดำในบิต 1 และแทนด้วยโมดูลสีขาวในบิต 0 ดังภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 แสดงลำดับในการวาง Bitstream ของ QR Code (ISO/IEC 18004, 2006)

2.1.10 ขั้นตอนการวาง Masking ใน QR Code

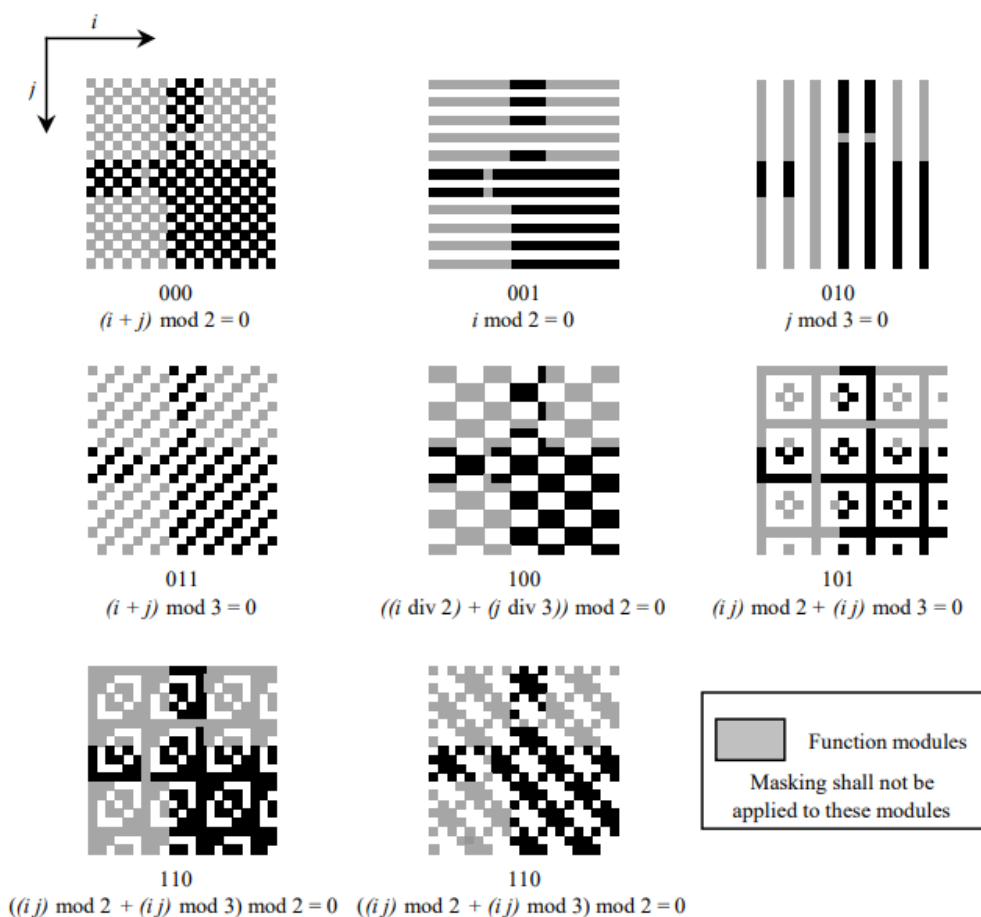
หลังจากที่ทำการลง Binary String ลงบน QR Code เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนถัดไปจะเป็นการลง Mask ใน QR Code โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกระจายโมดูลขาว ดำ ของ QR Code โดยการ Masking นั้นจะมี Mask ทั้งหมด 8 รูปแบบด้วยกัน โดยจะต้องเลือกรูปแบบที่ดีที่สุดซึ่งตามเงื่อนไขของรูปแบบ Mask จะเป็นดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 แสดงรูปแบบการ Masking และเงื่อนไขในการใช้ (ISO/IEC 18004, 2006)

รูปแบบ Mask	เงื่อนไข
000	$(i + j) \bmod 2 = 0$
001	$i \bmod 2 = 0$
010	$J \bmod 2 = 0$
011	$(i + j) \bmod 3 = 0$
100	$((i \text{ div } 2) + j \text{ div } 2) \bmod 2 = 0$
101	$(i * j) \bmod 2 + (i * j) \bmod 3 = 0$
110	$((i * j) \bmod 2 + (i * j) \bmod 3) \bmod 2 = 0$
111	$((i * j) \bmod 3 + (i * j) \bmod 2) \bmod 2 = 0$

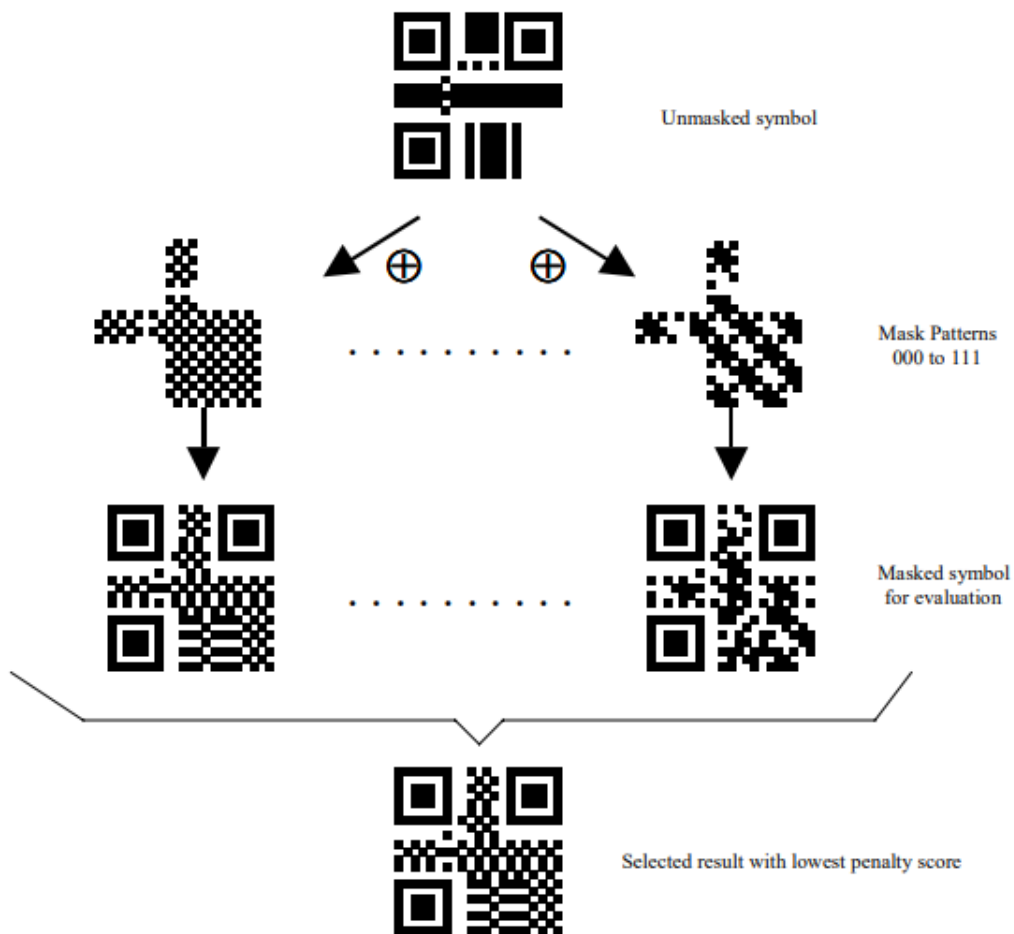
โดยที่ i, j คือ ตำแหน่งที่อ้างอิงโมดูลใน QR Code ถ้าโมดูลที่ตำแหน่ง i, j เป็นไปตามเงื่อนไข ข้างต้น โมดูลที่อยู่ในตำแหน่งนั้นจะทำการสลับสีภายในโมดูล

จากตารางที่ 2-7 ทำให้สามารถหา Mask ของ QR Codes ได้ ดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 แสดง Masking ในรูปแบบต่างๆ (ISO/IEC 18004, 2006)

โดยขั้นตอนการ Masking นั้น ใช้วิธีการซ้อนทับกันของ Mask และ QR Code และทำการ XOR กับบิตที่วางอยู่ในโครงสร้างของ QR Code โดยเมื่อมีการวางซ้อนทับกันระหว่างโมดูลที่มีสีเดียวกัน โมดูลนั้นจะทำการเปลี่ยนสีของบิตนั้น เช่น เมื่อ Mask บิตสีขาว ซ้อนทับกันกับ QR Code บิตสีขาว จะทำการเปลี่ยนสีของบิตนั้นเป็นสีดำ ในทำนองเดียวกัน เมื่อ Mask บิตสีดำ ซ้อนทับกันกับ QR Code บิตสีดำ จะทำการเปลี่ยนสีของบิตนั้นเป็นสีขาว และจะไม่ทำการ Masking ในบริเวณที่เป็น Function Information Pattern ดังแสดงในภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 แสดงการวาง Mask Pattern กับ QR Code (ISO/IEC 18004, 2006)

เมื่อทำการ Mask กับทั้ง 8 แบบแล้วจะต้องทำตามเงื่อนไขดัง ตารางที่ 2-8 เพื่อเป็นการเลือกคะแนนในการใช้ Mask ที่ดีที่สุด

ตารางที่ 2-8 แสดงเงื่อนไขและคะแนนของ Mask Pattern แต่ละรูปแบบ (ISO/IEC 18004, 2006)

รูปแบบ	เงื่อนไข	คะแนนต่อจุด
โมดูลที่อยู่ติดกับแถวหรือคอลัมน์ที่มีสีเดียวกัน	ติดกันมากกว่า 5 โมดูลขึ้นไปจำนวนของโมดูลจะเท่ากับ (5+i)	$N1 + i$
บล็อกของโมดูลสีเดียวกัน	บล็อกขนาด $m \times n$	$N2 \times (m - 1) \times (n - 1)$
อัตราส่วน 1 : 1 : 3 : 1 : 1 (ดำ, ขาว, ดำ, ขาว, ดำ) ในหลักหรือแถว		$N3$
สัดส่วนของโมดูลโทนมืดในโมดูลทั้งหมด	$50 \pm (5 \times k)\%$ ถึง $50 \pm (5 \times (k + 1))\%$	$N4 \times k$

2.1.11 การเข้ารหัสในส่วน Format Information

Format Information ประกอบด้วยข้อมูลบิต จำนวน 15 บิต โดยข้อมูลบิตที่เรียงต่อกันจำนวน 5 บิตจะเป็น Data Bit และ 10 บิตจะเป็น Error Correction โดยใช้ (5, 15) BCH Code ในการเข้ารหัสในส่วน Format Information โดยจะอ้างอิงจากตาราง International Standard ISO/IEC 18004 โดยข้อมูล 2 บิตแรกจะเป็นข้อมูล Error Correction Level ดังตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-9 แสดงเลข Binary indicator ในส่วนของ Error Correction Level (ISO/IEC 18004, 2006)

Error Correction Level	Binary indicator
L	01
M	00
Q	11
H	10

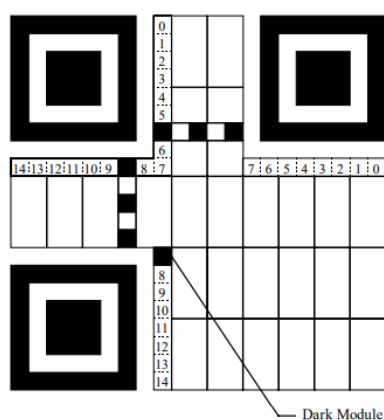
ข้อมูลบิตที่ 3 และบิตที่ 5 ของ Format Information จะเป็นข้อมูล Mask Pattern ตามตารางที่ 2-8 ส่วน 10 บิตที่เหลือจะสามารถหาได้จากการคำนวณ Error Correction แล้วนำมารวมกับ 5 บิตแรก เมื่อได้ข้อมูลครบทั้ง 15 บิตขั้นตอนต่อไปจะทำการ XOR กับ Mask Pattern 10101000010010

ตัวอย่างการคำนวณในส่วนของ Format Information

Error Correction Level M	00
รูปแบบ Data mask Pattern	101

ข้อมูล (Data)	00101
BCD bits	0011011100
ลำดับบิตที่ยังไม่ผ่านการ Mask	001010011011100
Mask Pattern สำหรับ XOR	101010000010010
รูปแบบ Format Information	100000011001110

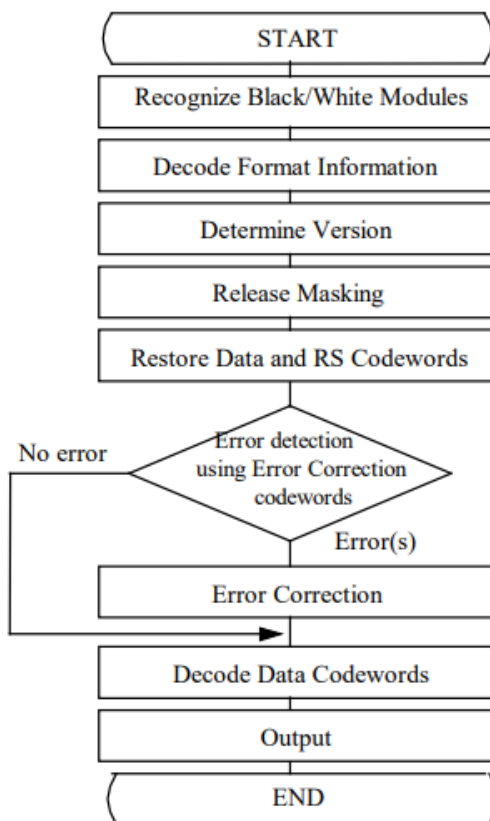
จาก Format Information ที่ได้จากการคำนวณตัวอย่างจะสามารถนำไปวางใน QR Code ตามลำดับบิตดังในภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 แสดงการวางในส่วนของ Format Information Codewords (ISO/IEC 18004, 2006)

ในการวาง Format Information จะทำการวางข้อมูลจำนวน 2 ชุด โดยบิตที่น้อยที่สุดจะวางที่ตำแหน่งที่ 0 และบิตที่มากที่สุดจะทำการวางที่ตำแหน่งบิตที่ 10 โดย โมดูลในโหมดมืดในตำแหน่ง (4V+9, 8) จะไม่มีส่วนเกี่ยวข้องในการเข้ารหัสของ QR Code โดยที่ V คือ เวอร์ชันของ QR Code

2.1.12 การถอดรหัสของ QR Code (QR Code Decoding procedure)



ภาพที่ 2-16 แสดงแผนภาพของการถอดรหัส QR Code (ISO/IEC 18004, 2006)

ขั้นตอนการถอดรหัส QR Code ทำได้โดยย้อนกลับจากการเข้ารหัส QR Code ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1.12.1 หาดำแหน่ง (Finder Pattern) ของภาพ QR Code และทำให้โมดูลรับรู้จากแสงและความมืดแล้วทำการแปลเป็นรูปแบบของอาเรียร์บิต “0” และ “1”

2.1.12.2 อ่าน Format Information เพื่อตรวจสอบในส่วนของประเภท Masking Pattern และระดับ ของ Error Correction ใน QR Code

2.1.12.3 อ่านข้อมูล Version ของ QR Code

2.1.12.4 ทำการถอดรหัส Masking โดยใช้โอเปอเรเตอร์ XOR

2.1.12.5 อ่านรูปแบบตำแหน่งของโมดูลในรูปแบบการวางโมดูลตามหลักเกณฑ์

2.1.12.6 หากพบข้อผิดพลาดใช้ Error Correction Codewords ที่สอดคล้องกับระดับนั้นๆ

2.1.12.7 แบ่ง Codewords ออกเป็นข้อมูลส่วนๆ ตามตัวชี้วัดและโหมดในการนับจำนวน

ตัวอักษร

2.1.12.8 ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการถอดรหัสตัวอักษรตามข้อมูลโหมดในการใช้งานและส่งข้อความที่ถอดรหัสออกมาให้แก่ผู้ใช้

2.1.13 หลักการอ่าน QR Code ของเครื่องสแกน (QR Code Reader)

กระบวนการการถอดรหัส QR Code ผ่านเครื่องอ่าน QR Code (QR Code Reader) เครื่องอ่าน QR Code จะใช้หลักการในการจับภาพไปเรื่อยๆ และเมื่อเครื่องอ่าน QR Code ตรวจพบ QR Code เครื่องอ่าน QR Code จะทำการจับภาพและทำการตรวจสอบว่าภาพที่ได้เป็น QR Code หรือไม่ โดยการตรวจจับภาพจะใช้อัลกอริทึมในการตรวจสอบภาพ QR Code ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ไม่ว่า QR Code จะอยู่ในรูปแบบหมุน เอียง หรือมีการบิดบังบางส่วน จะประกอบไปด้วยหลักการที่สำคัญดังนี้

2.1.13.1 ตรวจสอบรูปแบบของ Finder Pattern

2.1.13.2 ตรวจสอบว่าโมดูลเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมหรือไม่

2.1.13.3 ตรวจสอบว่ารูปแบบโมดูลกลางขาจะมีลักษณะแบบไหน และทำการประมาณการจัดเรียงโมดูล ตำแหน่งนั้นๆ

2.1.13.4 คำนวณขนาดของโมดูล (จำนวนของโมดูลตามขนาดของ QR Code) ตามขนาดของ Finder Pattern ทั้ง 3 มุม

2.1.13.5 คำนวณความกว้างของโมดูลทั้งหมด เพื่อดูจุดศูนย์กลางของโมดูลเพื่อใช้ในการกำหนดทิศทางในการถอดรหัสในแต่ละโมดูล

2.1.13.6 ในส่วนการตรวจสอบโมดูล จะทำการค้นขอบของโมดูลลดลงครึ่งหนึ่ง แล้วทำการตรวจสอบเริ่มจากศูนย์กลางของโมดูล เพื่อลดความผิดพลาดและสามารถกู้คืนประสิทธิภาพได้ในกรณีโมดูลมีการผิดเพี้ยน

2.1.13.6 อ่านค่าบิตและทำการถอดรหัสข้อความตามขั้นตอนการถอดรหัส QR Code

2.2 QR Code ที่สื่อความหมาย

มนุษย์มองเห็นแล้วไม่สามารถเข้าใจได้ นักวิจัยจึงได้นำเสนอให้สามารถแก้ไขและตกแต่ง QR Code ซึ่งส่งผลให้ QR Code สามารถบอกใบ้ให้ผู้ใช้งานได้ว่าจะได้ข้อมูลในรูปแบบใดเมื่อมีการถอดรหัสข้อมูลออกมา

Cox (2012) นำเสนอรหัส QArt Code ที่มีความสามารถในการเข้ารหัสรูปภาพเป็นข้อมูลในรูปแบบตัวเลขและวางตัวเลขไว้ในส่วนท้ายของข้อความ รูปภาพที่ 2-17 ประกอบ



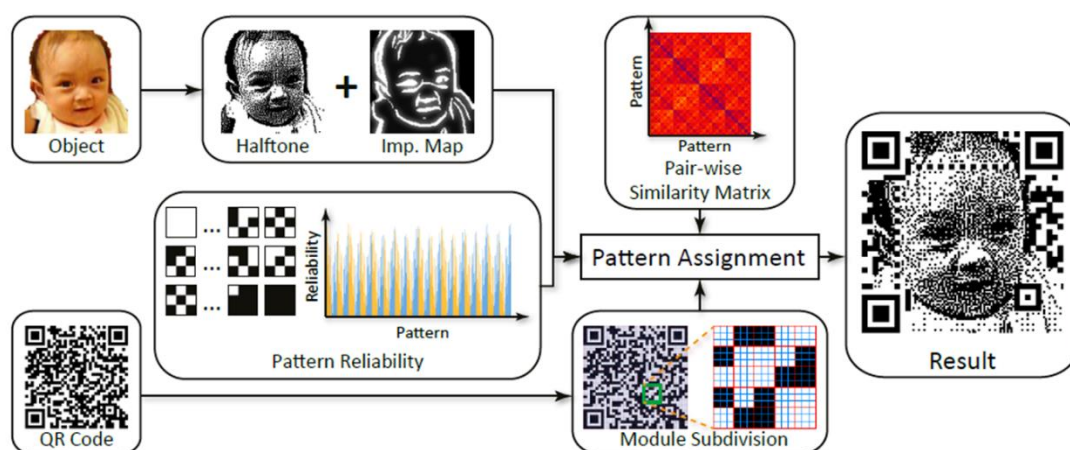
ภาพที่ 2-17 แสดงตัวอย่าง QArt Code (Cox, 2012)

Chu et al. (2013) นำเสนอ Halftone QR Code ซึ่งใช้เทคนิคในการปรับเปลี่ยนลักษณะโมดูลของ QR Code (โมดูลเป็น '0' หรือ '1') หลักการจะเป็นการแบ่งโมดูลย่อยแต่ละโมดูลออกเป็นโมดูลที่มีลักษณะเป็นโมดูลแบบ 3x3 และยังคงรูปแบบโทนสีในส่วนตรงจุดกลางโมดูลไว้ โดยที่โมดูลย่อยโดยรอบ 8 โมดูล สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระเพื่อให้เข้าได้กับภาพแบบ Halftone โดย Halftone QR Code จะมีความสวยงาม มีความสามารถในการสื่อสารให้มนุษย์สามารถเข้าใจได้ก่อนที่และไม่ลดทอนประสิทธิภาพในการอ่าน โดยจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ ดูภาพที่ 2-18 ประกอบ



ภาพที่ 2-18 แสดงตัวอย่าง Halftone QR Codes (Chu et al., 2013)

หลักการสร้าง Halftone QR Code มีหลักการดังนี้



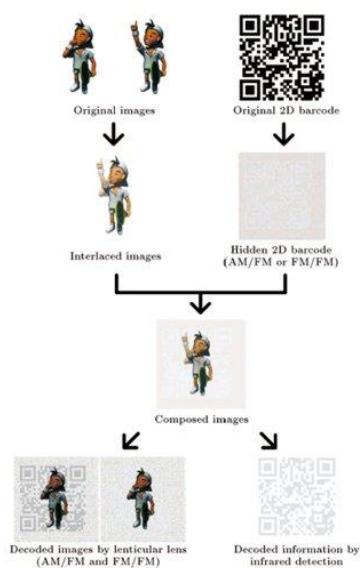
ภาพที่ 2-19 แสดงแผนภาพการสร้าง Halftone QR Code (Chu et al., 2013)

2.2.1 สร้าง QR Code ที่มีการเข้ารหัสข้อความไว้

2.2.2 นำภาพที่สื่อความหมายกับข้อความที่อยู่ภายใน QR Code และเปลี่ยนรูปภาพให้เป็นรูปภาพแบบ Halftone

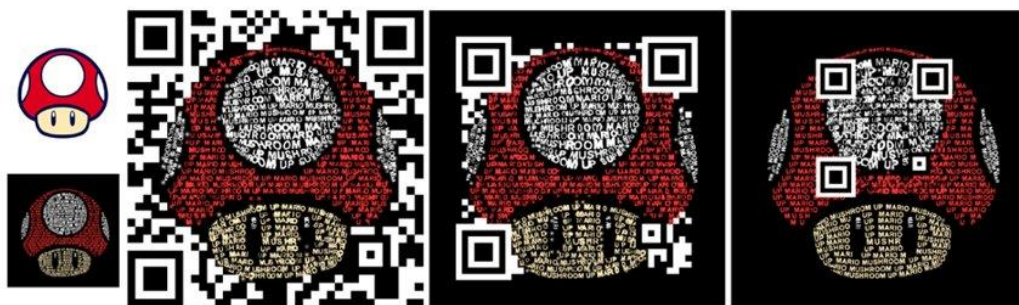
2.2.3 ทำการแปลง QR Code ทั่วไปให้เป็น Halftone QR Code โดยการรวมรูปภาพ Halftone กับ QR code ในส่วนของ Pattern Assignment โดยในแต่ละโมดูลของ QR code จะทำการสร้าง Pattern Reliability โดยการแบ่งโมดูลออกเป็นโมดูลย่อยในรูปแบบ 3x3 โดยจะคงรูปแบบโทนสีในส่วนตรงจุดกลางโมดูลไว้ แล้วโมดูลอีก 8 โมดูลย่อยโดยรอบจุดโมดูลตรงกลางสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามรูปแบบของภาพ Halftone

Gararteguy et al. (2014) ได้ใช้เทคนิคในการสร้าง QR Code แบบ Halftone ทำให้ QR Code มีความสามารถในการฝังภาพลายน้ำลงใน QR Code ได้ ดูรูปถ่ายที่ 2-20 ประกอบ



ภาพที่ 2-20 แสดงตัวอย่าง QR Code แบบฝังลายน้ำ (Gararteguy et al., 2014)

Hung et al. (2019) นำเสนอ QR Code Micrography โดยการใช้เทคนิคในการแทนที่โมดูลด้วยรูปภาพแบบ Micrography ความสำคัญในกระบวนการปรับเปลี่ยนแบบ Micrography คือการรักษาพิกเซลตรงกลางของโมดูลไว้และให้ QR Code มีความเข้ากันได้กับภาพแบบ Micrography มากที่สุด ดูรูปถ่ายที่ 2-21 ประกอบ



ภาพที่ 2-21 แสดงตัวอย่าง QR Code Micrography (Hung et al., 2019)

งานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาจะเป็นการให้เทคนิคต่างๆในการปรับเปลี่ยน QR Code ในส่วนของการเข้ารหัสเองเท่านั้น แต่ไม่ได้มีการปรับเปลี่ยน QR Code ในส่วนของการถอดรหัส ดังนั้นจึงทำให้ QR Code ทั้งหมดสามารถถอดรหัสออกมาได้ด้วยเครื่องสแกน QR Code แบบมาตรฐาน นอกจากนี้ยังมีผลงานบางส่วนที่มีการปรับเปลี่ยน QR Code ซึ่งในส่วนของการเข้ารหัสและในส่วนของการถอดรหัส เช่น งานวิจัยเกี่ยวกับลายน้ำอินฟราเรด และ Picode แม้ว่าจะเป็นการปรับปรุง QR Code ที่มีความน่าสนใจยิ่งขึ้น แต่ผู้ใช้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือพิเศษที่สร้างขึ้นมาโดยเฉพาะในการถอดรหัส QR Code ชนิดนี้ ซึ่งในงานวิจัยของเรา เราสนใจในการแก้ไข QR Code ที่แก้ไขเฉพาะในส่วนของการเข้ารหัส เพื่อให้ QR Code ของเราสามารถถอดรหัสได้ด้วยเครื่องถอดรหัสแบบมาตรฐานเท่านั้น

2.3 การเพิ่มความจุของ QR Code

QR Code มีการพัฒนามาหลายรูปแบบทั้งรูปแบบสวยงามต่างๆ แต่ถึงจะมีความสวยงามเพิ่มขึ้น QR Code ก็ยังมีความสามารถในการเก็บความจุของข้อความที่มีความจำกัด ซึ่งเพื่อแก้ไขเกี่ยวกับความจุของ QR Code ที่มีความจำกัด ยังมีงานวิจัยที่สามารถเพิ่มความจุของ QR Code เช่น การทำให้ QR Code เก็บข้อมูลได้เพิ่มขึ้น การเพิ่มความสามารถในการจัดเก็บข้อความใน QR Code ให้เก็บได้หลายรูปแบบ

Galiyawala and Pandya (2014) ได้นำเสนอเทคนิคในการใช้สีในการเพิ่มความจุของ QR Code โดยจะใช้สีที่แตกต่างกันในการฝังข้อความใน QR Code ให้เพิ่มมากขึ้น โดยใน QR Code สามารถใช้สีได้มากถึง 3 เฉดสี และสามารถทำให้ QR Code สามารถจุข้อความได้ถึง 3 ข้อความ ซึ่งการถอดรหัส QR Code นั้นต้องใช้เครื่องมือถอดรหัสเฉพาะทางเท่านั้น รูปถ่ายที่ 2-22 ประกอบ



ภาพที่ 2-22 แสดงการเพิ่มความจุของ QR Code ที่ใช้ความแตกต่างของสี (Galiyawala and Pandya, 2014)

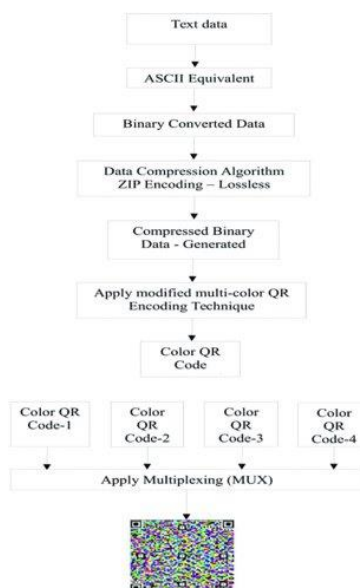
Tkachenko et al. (2015) เสนอการเพิ่มความจุของ QR Code ที่เรียกว่า Two Level QR Code ซึ่งเป็นการเข้ารหัสข้อความของ QR Code ที่เก็บข้อความได้ถึงสองระดับ ซึ่งสามารถเก็บความจุของข้อความได้ถึง 2 ข้อความ โดยการเข้ารหัสข้อความในการจัดเก็บข้อความแบบสาธารณะและข้อความแบบส่วนตัว หลักการคือระดับที่ 1 จะเป็น QR Code แบบทั่วไป ส่วนขั้นที่ 2 จะมีการแก้ไขในส่วนหนึ่งของโมดูล QR Code ในรูปแบบต่างๆ ในส่วนของการถอดรหัสข้อความในรูปแบบสาธารณะสามารถถอดรหัสด้วยเครื่องอ่าน QR Code แบบมาตรฐานได้ แต่ใน

ส่วนของข้อความในรูปแบบส่วนตัวต้องใช้เครื่องถอดรหัสแบบเฉพาะทางเท่านั้น โดยวิธีนี้ได้รับการออกแบบมา โดยเฉพาะสำหรับการแชร์ข้อความส่วนตัวและการตรวจสอบเอกสาร ดูรูปภาพที่ 2-23 ประกอบ



ภาพที่ 2-23 แสดงตัวอย่างของโมดูลใน Two Level QR Code (Tkachenko et al., 2015)

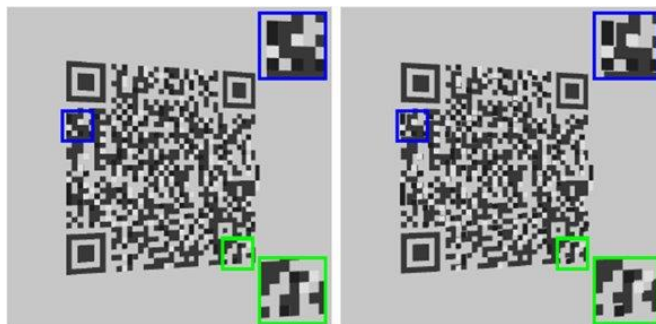
Arora et al. (2018) นำเสนอการเพิ่มความจุของ QR Code โดยใช้เทคนิคการใช้เฉดสีที่มีความเข้มข้นสูง โดยวิธีนี้สามารถใช้เฉดสีได้แตกต่างกันถึง 5 เฉดสี ในการเข้ารหัสข้อความได้แตกต่างกันถึง 5 ข้อความ ซึ่งการถอดรหัส QR Code นั้นต้องใช้เครื่องมือถอดรหัสเฉพาะทางเท่านั้น ดูรูปภาพที่ 2-24 ประกอบ



ภาพที่ 2-24 แสดงแผนภาพการเพิ่มความจุของ QR Code โดยใช้เทคนิคความแตกต่างของสี (Arora et al., 2018)

Yuan and Wang (2019) นำเสนอการเพิ่มความจุของ QR Code ที่เรียกว่า Two Layer QR Code หรือ QR Code แบบสองชั้น ซึ่งสามารถเข้ารหัสข้อความได้ถึงข้อความสองข้อความจะถูกจัดเก็บไว้และสามารถเรียกค้นแยกจากทิศทางการดูที่แตกต่างกัน เป็นโครงสร้างสองชั้นที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ โดยมีชั้นบนและชั้นล่าง แต่ละชั้นประกอบด้วย โมดูลชั้นล่างเป็นสีดำหรือสีขาว (โมดูลเป็น '0' หรือ '1') ในขณะที่โมดูลชั้นบนสุดเป็นสีดำหรือสีขาว

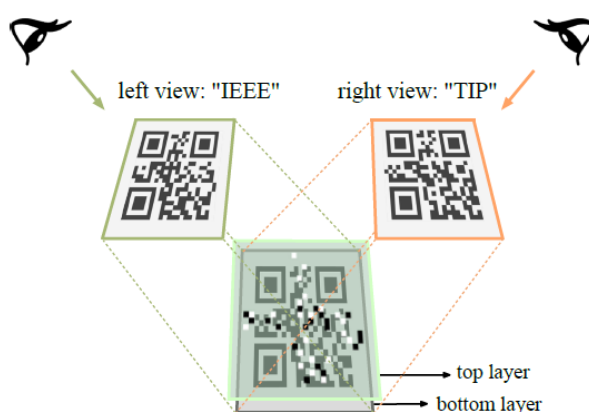
หรืออาจโปร่งใส(โมดูลเป็น '0', '1' หรือ 't') ชั้นบนของ QR Code จะอยู่ในรูปแบบการพิมพ์บนแผ่นอะคริลิกใส ทำให้เกิดข้อความทิศทางการดูที่ต่างกัน QR Code สองชั้นจึงสามารถแสดง QR Code ที่ถูกต้องได้ 2 QR Code โดยเข้ารหัสข้อความสองข้อความที่ต่างกันโดยเปลี่ยนมุมมอง ดูรูปภพที่ 2-25 ประกอบ



ภาพที่ 2-25 แสดงรูปแบบของ Two Layer QR Code (Yuan and Wang, 2019)

การสร้าง QR code แบบสองชั้น เป้าหมายแรกคือการสร้างรูปแบบชั้นบนและชั้นล่าง (L_t และ L_b) เพื่อให้เป้าหมายในการดูจากด้านซ้ายและด้านขวา (O_l และ O_r) สามารถเข้ารหัสข้อมูลได้ทั้งสองชั้น ชั้นแรกจะใช้ อัลกอริทึมการสร้างรหัส QR แบบธรรมดา เพื่อแปลงแต่ละข้อความเป็นรหัส QR มาตรฐาน ที่มีขนาดเวอร์ชันที่เท่ากัน แต่ระดับ EC อาจจะไม่เหมือนหรือแตกต่างกันก็ได้ในทั้งสองข้อความ โดยแต่ละข้อความจะเรียกว่า รูปแบบเป้าหมายด้านซ้ายและด้านขวา (T_l และ T_r) ตามลำดับ มีขั้นตอนดังนี้

2.3.1 การออกแบบ โดยชั้นล่างจะมีโมดูลแบบ $N \times N$ แต่ละโมดูลชั้นล่างจะมีสีขาวหรือสีดำ ส่วนโมดูลชั้นบนจะมีโมดูลแบบ $(N + 1) \times N$ แต่ละโมดูลอาจจะเป็นสีขาว (0) หรือสีดำ (1) หรือโปร่งใส (t) ตัวอย่างในภาพที่ 2-26

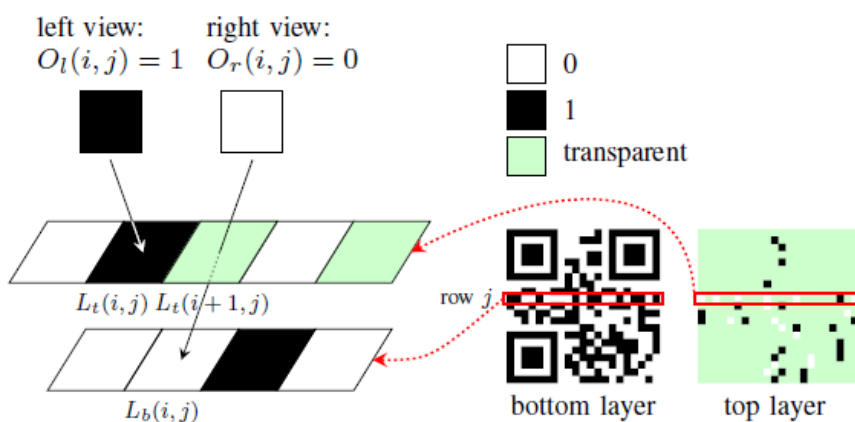


ภาพที่ 2-26 แสดงมุมมองของ Two Layer QR Code (Yuan and Wang, 2019)

2.3.2 เมื่อมองจากทิศทางที่เลือกจากด้านซ้าย ค่าชดเชยที่ฉายระหว่างชั้นบนและชั้นล่างจะเปลี่ยนเป็น 0 อย่างแน่นอน ในทำนองเดียวกัน เมื่อมองจากทิศทางเฉพาะจากด้านขวา ค่าชดเชยที่ฉายจะเปลี่ยนเป็น 1 อย่างแน่นอน ดูภาพที่ 2-26. ให้ $L_t(i, j)$ เป็นค่าของโมดูล (i, j) ในชั้นบนสุด ($1 \leq i \leq N+1, 1 \leq j \leq N$) และ $L_b(i, j)$ เป็น ค่าของโมดูล (i, j) ในชั้นล่าง ($1 \leq i, j \leq N$) รูปแบบการดูด้านซ้ายและขวา (O_l และ O_r) ตามลำดับ สามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ 2-7 และสมการที่ 2-8 (Yuan and Wang, 2019)

$$O_l(i, j) = \begin{cases} L_b(i, j) & \text{ถ้า } L_b(i, j) = t \text{ (รูปแบบโปร่งใส)} \\ L_t(i, j) & \text{ถ้าเป็นอย่างอื่น} \end{cases} \tag{2-7}$$

$$O_r(i, j) = \begin{cases} L_b(i, j) & \text{ถ้า } L_b(i+1, j) = t \text{ (รูปแบบโปร่งใส)} \\ L_t(i, j) & \text{ถ้าเป็นอย่างอื่น} \end{cases} \tag{2-8}$$



ภาพที่ 2-27 แสดงการจัดวางโมดูลของ Two Layer QR Code (Yuan and wang, 2019)

2.3.3 การกู้คืนประสิทธิภาพ: สำหรับขั้นตอนี้มีการกำหนดระดับ EC และรูปแบบการปิดบังข้อมูลให้เหมือนกัน ซึ่งในการจัดการกับกรณีต่างๆ เมื่อมีความแตกต่าง ข้อกำหนดนี้จะกำหนดให้รูปแบบการดูตรงตรงกับรูปแบบเป้าหมายทุกประการ (เช่น $O_l = T_l$ หรือ $O_r = T_r$) แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ แต่ในกรณีที่ต้องการให้ข้อความเดียวกันยังคงสามารถถอดรหัสจากรูปแบบการดูจากรูปแบบเป้าหมายได้ ในขณะที่เดียวกันควรเพิ่มความน่าเชื่อถือของรูปแบบการมองให้สูงสุด กล่าวคือ ความสามารถในการถอดรหัสได้อย่างถูกต้องจะเกิดเมื่อเกิดความเสียหาย ดังนั้นในการวัดความน่าเชื่อถือของ Two layer QR code กำหนดอัตราส่วนการกู้คืนที่มีประสิทธิภาพ E ให้เป็น ดังสมการที่ 2-9 (Yuan and Wang, 2019)

$$E = \min_{i,s} D(O_s^i, T_s^i) \quad (2-9)$$

โดยที่ O_s^i หมายถึงบล็อกที่ i ในรูปแบบเดียว O_s ($O_s \in \{O_l, O_r\}$) ไม่ว่าจะจะเป็นรูปแบบการดูด้านซ้าย O_l หรือรูปแบบการดูด้านขวา O_r , T_s^i หมายถึงบล็อกที่ i ในรูปแบบเป้าหมายที่สอดคล้องกัน (ซึ่งครอบคลุมเหมือนกัน พื้นที่เป็น O_s^i) และ $D(\cdot)$ คืออัตราส่วนการกู้คืนที่เหลืออยู่สำหรับแต่ละบล็อก อัตราส่วนการกู้คืนที่มีประสิทธิภาพ E จึงถูกคำนวณเป็นอัตราส่วนการฟื้นตัวขั้นต่ำที่เหลืออยู่ในทุกช่วงบล็อกของรูปแบบการดูทั้งสองแบบ อัตราส่วนการกู้คืนที่เหลือ D สำหรับบล็อก O_s^i ถูกกำหนดเป็น ดังสมการที่ 2-10 (Yuan and Wang, 2019)

$$D(O_s^i, T_s^i) = \left(\left[\frac{(p-k)}{2} \right] - \delta(O_s^i, T_s^i) \right) / p \quad (2-10)$$

โดยที่ p และ k ตามลำดับหมายถึง จำนวน codewords ทั้งหมด และ codeword ของข้อมูลในบล็อกนี้ ในที่นี้ $(p-k)/2$ คือ จำนวนโค้ดเวิร์ดที่ไม่ตรงกันสูงสุดที่อนุญาตซึ่งยังคงอนุญาตให้ถอดรหัสที่ถูกต้องจากโครงสร้างโค้ด QR ในขณะที่ (O_s^i, T_s^i) หมายถึง จำนวนโค้ดเวิร์ดในบล็อก O_s^i ซึ่งไม่ตรงกับโค้ดเวิร์ดในบล็อก T_s^i (โค้ดเวิร์ดประกอบด้วย 8 โมดูล: หากโมดูลใดไม่ตรงกัน คำรหัสจะไม่ตรงกัน) อัตราส่วนการกู้คืนที่เหลือ D แสดงถึงความจุข้อผิดพลาดที่เหลืออยู่ของบล็อก

ในขั้นตอนนี้ อาจพิจารณาการสร้างรหัส QR สองชั้นว่าเป็นปัญหาในการเพิ่มประสิทธิภาพ จากรูปแบบเป้าหมายสองรูปแบบ (T_l และ T_r) เป้าหมายคือการค้นหารูปแบบชั้นบนและล่าง (L_l และ L_b) โดยการลดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังสมการที่ 2-11 (Yuan and Wang, 2019)

$$\min_{L_l, L_b} E \quad (2-11)$$

โดยที่ E คืออัตราส่วนการกู้คืนที่มีประสิทธิภาพที่กำหนดไว้ในสมการที่ 2 ซึ่งคำนวณโดยการเปรียบเทียบค่าโมดูลในรูปแบบเป้าหมาย (T_l และ T_r) กับรูปแบบการ (O_l และ O_r) ซึ่งคำนวณจากรูปแบบชั้นบนและล่าง (L_l และ L_b) ตามสมการที่ 2-7 และ 2-8

2.3.4 ในการสร้าง Two Layer QR code จะเป็นการพิมพ์ลวดลายชั้นบนสุดลงบนพลาสติกใส และลวดลายชั้นล่างบนกระดาษ จากนั้นวางลวดลายทั้งสองลงบนแผ่นอะคริลิกใสทั้งสองด้านที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร และค่าความกว้างของโมดูลชั้นบนสุดเป็น 1.5 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 2-28



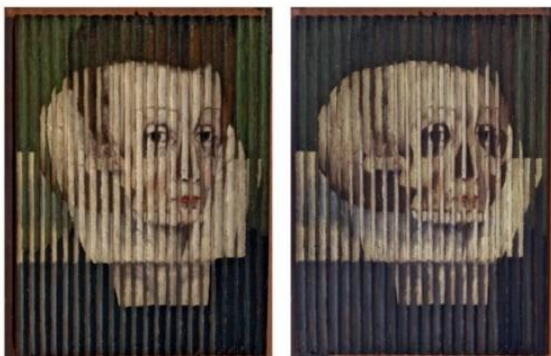
ภาพที่ 2-28 แสดงรูปแบบการออกแบบ Two Layer QR Code ดังสมการที่ 2-10 (Yuan and Wang, 2019)

เนื่องจากผู้ใช้งานมีความคุ้นเคยกับการใช้งาน QR code แบบมาตรฐาน ผู้ใช้อาจพยายามสแกน Two Layer QR code จากด้านหน้าในตอนแรก ดังนั้น จะมีการวางคำแนะนำที่ชัดเจนนอกเหนือจาก QR code ใหม่ดังกล่าวเพื่ออธิบายวิธีใช้งาน ตัวอย่างเช่น Two Layer QR code ที่อธิบายการดาวน์โหลดแอปพลิเคชันที่ใช้ในงานในผลิตภัณฑ์ต่างๆอาจมีป้ายข้อความและลูกศรที่ระบุว่า 'แอนดรอยด์ (สแกนทางนี้)' ที่ชี้จากด้านซ้าย และ 'IOS (สแกนทางนี้)' ที่ชี้จากทางขวา

2.4 ทฤษฎีการทำภาพแบบเลนติคูลาร์ (Lenticular Image)

การพิมพ์แบบ Lenticular (Lenticular Printing) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถสร้างภาพสามมิติในรูปแบบ 2D แบบเรียบได้ โดยการใช้เทคนิคนี้จะเป็นการสร้างภาพลวงตราของความลึกหรือการสร้างภาพเคลื่อนไหวสำหรับภาพพิมพ์ โดยตัวอย่าง จะเป็นภาพพิมพ์เป็นภาพเลนส์แบบหมุนและเอฟเฟกต์ภาพเคลื่อนไหว เช่น การขยับตา หรือ การเปลี่ยนมุมมองของภาพ

ภาพพิมพ์ Lenticular ถึงแม้จะดูมีความทันสมัย แต่ประวัติของภาพพิมพ์ Lenticular มีต้นกำเนิดมาตั้งแต่ปลายศตวรรษที่ 16 โดยจิตรกรในสมัยนั้นพยายามที่จะสร้างภาพที่มีเอฟเฟกต์ในงานภาพวาดของพวกเขา และในปี 1500 ศิลปินบางคนได้สร้างภาพที่ใช้หลักการของ ภาพทัศนียภาพ (Perspective Image) ซึ่งใช้เอฟเฟกต์การวาดภาพด้วยภาพสองภาพที่ถูกแบ่งออกเป็นแถบด้านต่างๆ ของกระดาษลูกฟูก เทคนิคนี้เรียกว่า Tabula Scalata ซึ่งแปลว่า “กระดานบันได” โดยการอ้างอิงถึงวิธีการการนี้สามารถพบในบทละครของเชคสเปียร์และวรรณกรรมอื่นๆ ในยุคนั้น

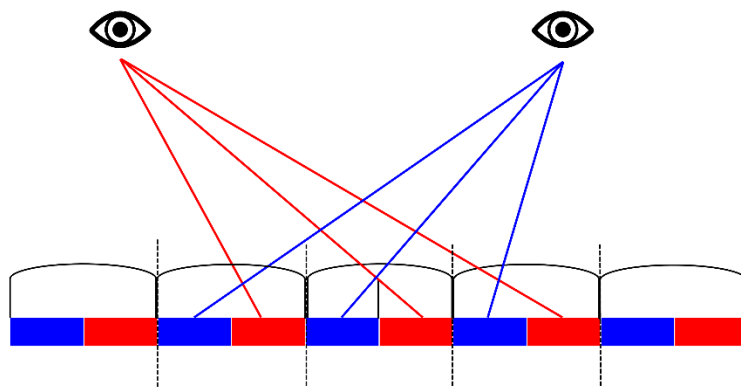


ภาพที่ 2-29 แสดงภาพวาดสีน้ำมัน Tabula Scalata จากปี 1580 (PCG, 2019)

2.4.1 กระบวนการพิมพ์ภาพ Lenticular

การพิมพ์ Lenticular เป็นกระบวนการหลายขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างภาพ Lenticular จากภาพกราฟิกอย่างน้อยสองภาพสอดประสานเข้าด้วยกัน และรวมเข้ากับเลนส์ Lenticular (Lenticular Lens) โดยเลนส์จะมีลักษณะเป็นพลาสติกที่มีลักษณะเฉพาะโดยเลนส์แต่ละชิ้นจะต้องจัดวางให้อยู่ในแนวเดียวกับภาพที่อยู่ด้านล่างเพื่อให้เอฟเฟกต์ทำงาน โดยหลักการคือจะช่วยให้แสงที่ตกกระทบสามารถสะท้อนออกไปได้ในทิศทางต่างๆ ภาพพิมพ์ Lenticular มีความสามารถในการแสดงการเคลื่อนไหวหรือการสร้างภาพสามมิติขึ้นมาได้ เนื่องจาก

สายตาของผู้ใช้สามารถมองเห็นภาพพิมพ์ Lenticular ได้อย่างแตกต่างกันจากมุมมองจากมุมมองที่ต่างกันไป ตัวอย่างในภาพที่ 2-30



ภาพที่ 2-30 แสดงมุมมองการฉายภาพเมื่อภาพพิมพ์อยู่ภายใต้ Lenticular Lens



ภาพที่ 2-31 แสดงมุมมองการฉายภาพ (Roberts, 2003)

2.4.2 เลนติคิวลาร์เลนส์ Lenticular Lenses

Lenticular Lens จะมีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกที่ด้านหนึ่งจะมีการขึ้นรูปลายนูนเล็กๆที่เรียกว่า lenticules โดย Lenticules จะมีขนาดที่เท่ากันและเว้นระยะห่างเท่าๆกัน ทว่าทั้งแผ่น อีกด้านหนึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบเพื่อให้สามารถแนบกับภาพพิมพ์ได้ ดังภาพที่ 2-32



ภาพที่ 2-32 แสดงตัวอย่างของ Lenticular Lenses (Lenstar Lenticular, 2008)

ความถี่ของเลนส์ จะมีหน่วยเป็น เส้นต่อนิ้ว (LPI : line per inch) สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 10 ถึง 200 LPI

ความโค้งหรือมุมของ Lenticules เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงในการเลือกใช้เลนส์ที่เหมาะสมสำหรับการทำภาพสามมิติที่ดีที่สุด โดยทั่วไปเลนส์มุมกว้างที่มีมุมมองระหว่าง 15-44 องศา จะทำงานได้ดีที่สุด และสำหรับทำภาพแอนิเมชัน โดยทั่วไปเลนส์มุมกว้างที่มีมุมมองระหว่าง 44-65 องศา จะทำงานได้ดีที่สุด

ขนาดของแผ่น Lenticular จะมีความหนาตั้งแต่ 0.008-0.385 นิ้ว โดยสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของงานพิมพ์ และขนาดจะมีหลายขนาดที่แตกต่างกัน โดยขนาดที่นิยมใช้มากที่สุดจะอยู่ที่ขนาด 20x28 นิ้ว และ 28x40 นิ้ว

2.4.3 การออกแบบภาพพิมพ์ Lenticular

การออกแบบสำหรับภาพพิมพ์ Lenticular คือการเลือกเอฟเฟกต์ต่างๆเพื่อมาใช้สำหรับภาพพิมพ์ โดยเอฟเฟกต์ของภาพพิมพ์ Lenticular จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ ภาพพิมพ์แบบแอนิเมชัน และภาพพิมพ์แบบสามมิติ ซึ่งภาพพิมพ์ แบบสามมิติก็จะประกอบไปด้วย ภาพแบบซูม ภาพแบบพลิก และภาพแบบมอร์ฟ (ภาพขยาย) โดยการออกแบบภาพพิมพ์ Lenticular จะมีหลักการสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ดังนี้

2.4.3.1 การใช้ภาพที่มีความละเอียดสูงอย่างน้อย 300 dpi ในงานภาพพิมพ์

2.4.3.2 การใช้สีพื้นหลัง เพื่อป้องกันการเกิดภาพซ้อนที่เกิดขึ้นในภาพพิมพ์ เช่น พื้นหลังสีขาว จะมีประสิทธิภาพน้อยที่สุดในการลดการเกิดภาพซ้อน

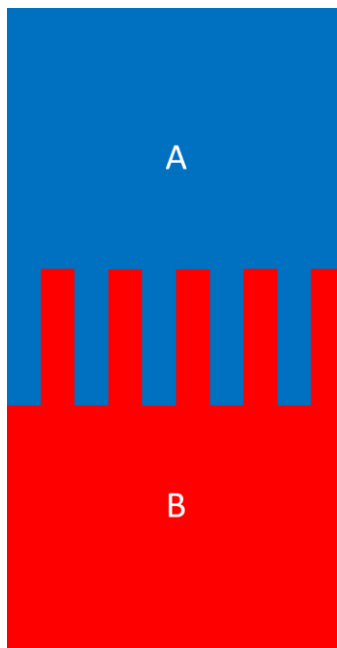
2.4.3.3 การใช้โครงร่างเส้นขอบจะสามารถช่วยลดการรั่วไหลของสีที่เกิดจากการขยายภาพด้วย Lenticular Lens ได้

2.4.3.4 การเลือกขนาดและรูปร่างของภาพให้เหมาะสมกับเอฟเฟกต์ที่ใช้ในภาพพิมพ์ เช่น การทำภาพพิมพ์แบบโปสเตอร์ หรือการแสดงผลภาพแบบมอร์ฟ ควรใช้ทิศทางของภาพในแนวตั้ง

2.4.3.5 การประสานภาพพิมพ์ให้เข้ากับ Lenticular มีกระบวนการสำคัญดังนี้

2.4.3.6 เลือกเอฟเฟกต์ที่วางแผนไว้ แอนิเมชัน พลิก ซูม มอร์ฟ หรือ 3 มิติ

2.4.3.7 สร้างภาพพิมพ์ที่เข้ากับภาพพิมพ์ Lenticular ด้วยการผสมภาพอย่างน้อยสองภาพเข้าด้วยกัน ดังภาพที่ 2-33



ภาพที่ 2-33 แสดงการผสมกันของภาพ 2 ภาพ

2.4.3.8 เลือก Lenticular Lens ที่เหมาะสมสำหรับเอฟเฟกต์ที่ใช้และชิ้นงานที่ใช้ และจัดวางตำแหน่งของชิ้นงานให้มีความถูกต้อง

2.4.3.9 ใช้เครื่องพิมพ์สีที่มีความละเอียดสูงเพื่อให้งานภาพพิมพ์มีความละเอียดที่ชัดเจน

2.4.3.10 นำภาพพิมพ์มาผสมเข้ากับแผ่น Lenticular Lens

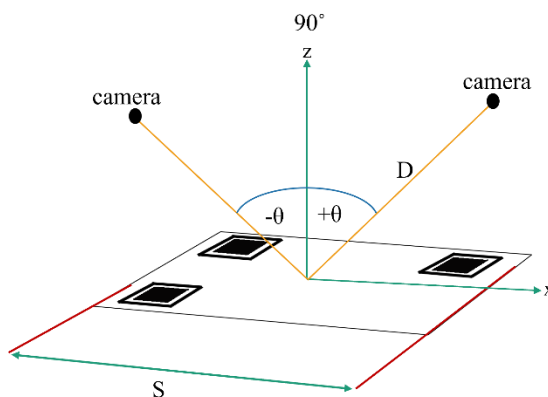
ในการวางแผนการทำภาพพิมพ์ Lenticular ควรมีการกำหนดรูปภาพที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การวางแผนภาพที่มีเอฟเฟกต์เป็นแบบแอนิเมชัน 5 เฟรม ใช้งานคู่กับเลนส์แบบ 60 LPI ที่มีระยะพิทช์พิสจันอักษรอยู่ที่ 60.15 LPI โดยจะทำการใช้ภาพจำนวน 5 ภาพ ภาพที่ 1 จะเป็นจุดเริ่มต้นของภาพแลภาพที่ 5 จะเป็นจุดสิ้นสุด ตัวอย่างการสร้างรูปแบบจะมีลักษณะเป็น (1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5,... เป็นต้น) เมื่อทำการผสมจนครบภาพสุดท้าย จะส่งผลให้ภาพมีขนาดอยู่ที่ 300.75 PPI (pixel per inch) โดยมีหลักการคำนวณดังนี้

$$\text{จำนวนเฟรม} \times \text{ระยะพิทช์พิสจันอักษร LPI ของเลนส์} = \text{PPI} \quad (2-12)$$

$$(\text{ตัวอย่างเช่น } 5 \text{ เฟรม} \times 60.15 \text{ LPI} = 300.75 \text{ PPI})$$

2.5 การวัดประสิทธิภาพ

การวัดประสิทธิภาพของ Dual Image QR Code จะเป็นการวัดเพื่อบันทึกความสำเร็จที่ Dual Image QR Code มีการสแกนติด ซึ่งจะมีการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ขนาด ระยะห่าง ทิศทาง และระยะเวลาในการสแกน Dual Image QR Code ดูภาพที่ 2-34 ประกอบ ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆมีดังนี้



ภาพที่ 2-34 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆในการวัดประสิทธิภาพของ Dual Image QR Code

2.5.1 ขนาดของ Dual Image QR Code

ขนาดของ Dual Image QR Code (S) ที่เหมาะสมที่ใช้ ซึ่งขนาดที่ใช้เรากำหนดให้เป็น QR Code 3 ขนาด คือ ขนาด 3x3 นิ้ว 4x4 นิ้ว และ 5x5 นิ้ว

2.5.2 ระยะทางของกล้อง

ระยะห่างของกล้อง (D) จะเป็นการวัดระยะทางระหว่างกล้องถึง Dual Image QR Code ซึ่งการกำหนดระยะห่างจะใช้ระยะห่างตั้งแต่ 10 เซนติเมตร – 30 เซนติเมตร โดยระยะห่างจะมีการเปลี่ยนแปลงไปช่วงละ 5 เซนติเมตร

2.5.3 จำนวนครั้งและระยะเวลาในการสแกน

ระยะเวลาในการสแกนจะเป็นการจับเวลาที่สแกน Dual Image QR Code ซึ่งจะวัดค่าความสำเร็จจากการสแกน โดยจะใช้ระยะเวลาในการสแกนอยู่ที่ไม่เกิน 10 วินาที ในการสแกน 1 ครั้ง แล้วบันทึกผลว่าในการสแกน 1 ครั้งจะใช้ระยะเวลากี่วินาที โดนจะใช้การสแกนทั้งหมด 10 ครั้ง ต่อ Dual Image QR Code 1 รูปแบบ

2.5.4 ทิศทางของกล้อง

ทิศทางของกล้อง (θ) จะเป็นการวัดผลมุมของกล้องที่ใช้ในการสแกน ซึ่งใน Dual Image QR Code ของเราจะเป็นการสแกนใน 2 ทิศทาง มุมที่ใช้สแกนจะใช้มุมใน 2 ทิศทาง โดยระยะห่างจากมุมที่ใช้จะเริ่มจากมุม 90° ซึ่งจะเป็นการวัดมุมที่เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางด้านซ้ายและด้านขวา 4 มุม เช่น วัดไปทางด้านขวาของ Dual Image QR Code โดยเริ่มจาก มุม $90^\circ (+\theta)$ คือ 20° , 30° , 40° และ 50° เช่น วัดไปทางด้านซ้ายของ Dual Image QR Code โดยเริ่มจาก มุม $90^\circ (-\theta)$ คือ -20° , -30° , -40° และ -50°

2.5.5 ค่าความสำเร็จในการสแกน

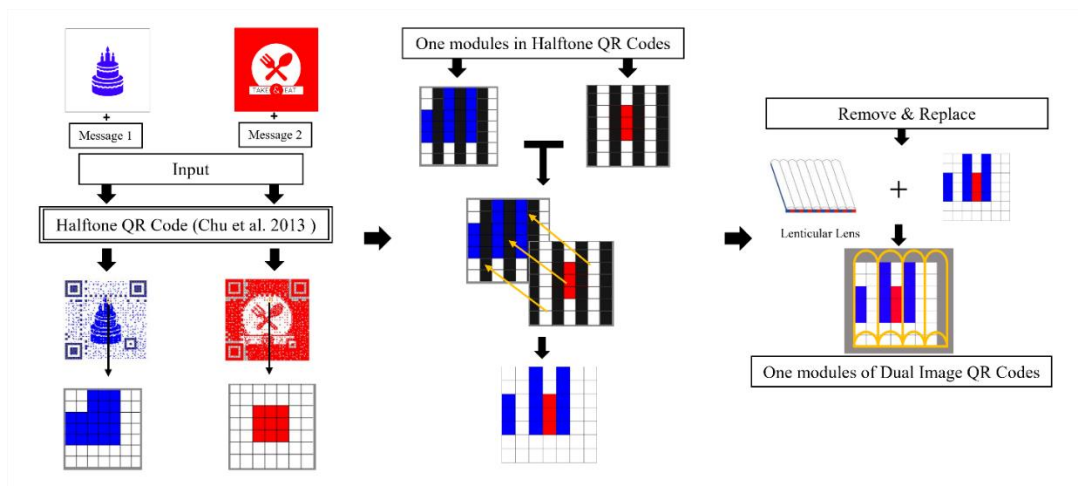
อัตราความสำเร็จในการสแกน จะเป็นค่าความสำเร็จในการสแกนในแต่ละรูปแบบ ตัวอย่างเช่น Dual Image QR Code ECH เวอร์ชัน 3 ที่มีขนาด 3x3 นิ้ว ระยะห่างจากกล้องที่สแกนอยู่ที่ 10 เซนติเมตร วัดที่มุม -20° ในการสแกนจะจับเวลา 10 วินาที ในการสแกน 10 ครั้ง มีการสแกนติดทั้งหมด 10 ครั้ง แต่ละครั้งไม่เกิน 10 วินาที จะบันทึกผลว่า Dual Image QR Code รูปแบบนี้มีการสแกนติด 10 ครั้ง หรือ Dual Image QR Code EC

เวอร์ชัน 3 ที่มีขนาด 3x3 นิ้ว ระยะห่างจากกล้องที่สแกนอยู่ที่ 10 เซนติเมตร วัตถุที่มุม 20° ในการสแกนจะจับเวลา 10 วินาที ในการสแกน 10 ครั้ง มีการสแกนติดทั้งหมด 8 ครั้ง แต่แต่ละครั้งไม่เกิน 10 วินาที จะบันทึกผลว่า Dual Image QR Code รูปแบบนี้มีการสแกนติด 8 ครั้ง

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การสร้างคิวอาร์โค้ดแบบทวิภาพ (Dual Image QR Code Generation)

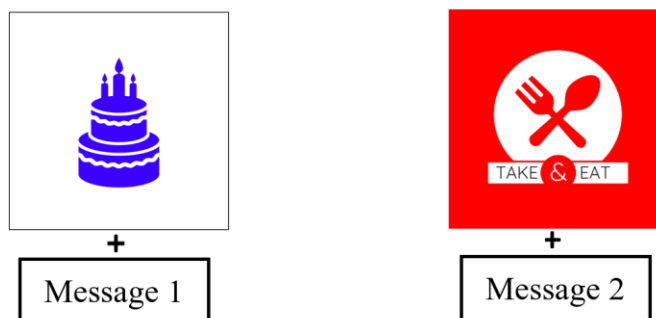
ในงานของเราเป้าหมาย ในการสร้าง Dual Image QR Code คือการจัดเรียงรูปแบบของรูปภาพ 2 รูปภาพขึ้นมาใหม่เพื่อเพิ่มความจุของข้อความในการเข้ารหัสข้อความให้แก่ QR Code และยังคงความสามารถในการสื่อความหมายให้แก่ผู้ใช้งานได้อีกด้วย ในด้านของความสวยงามและการสื่อความหมายให้แก่ผู้ใช้งานเราใช้วิธีการปรับเปลี่ยนรูปแบบรูปภาพที่สื่อความหมายกับข้อความทั้งหมด 2 รูปภาพ ให้กลายเป็น QR Code ด้วยเทคนิค Halftone QR Code (Chu et al., 2013) และในส่วนของ การเพิ่มความจุของข้อความในการเข้ารหัสข้อความของ QR Code เราจะใช้เทคนิคการทำภาพพิมพ์แบบเลนติคูลาร์เพื่อรวม Halftone QR Code ทั้งสองภาพ ให้กลายเป็นภาพเดียว ภาพรวมของกระบวนการแสดงใน ภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 แสดงแผนผังการสร้าง Dual Image QR Codes

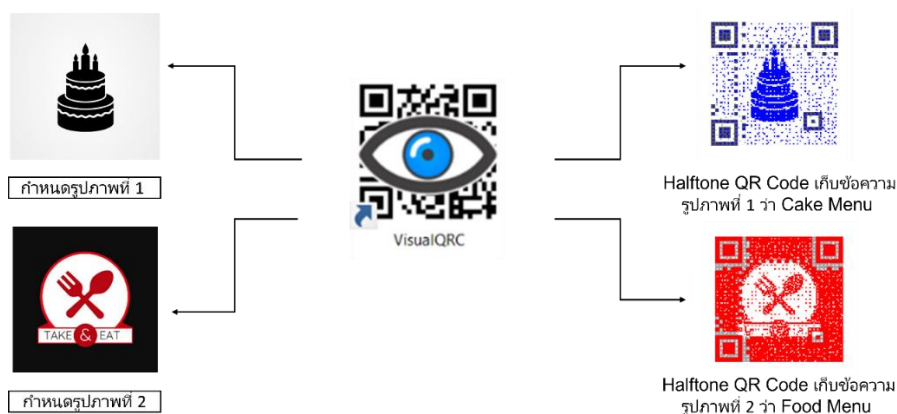
3.1.1 ขั้นตอนในการสร้างมี ดังนี้

3.1.1.1 ในขั้นตอนแรกจะมีการนำเข้าสู่ข้อมูล (Input) ประกอบด้วยข้อความทั้งหมด 2 ข้อความและรูปภาพที่สื่อความหมายเกี่ยวกับข้อความที่เข้ารหัสข้อความจำนวน 2 รูปภาพ ตัวอย่างเช่น ข้อความที่ 1 จะเก็บข้อความว่า “Cake Menu” ซึ่งจะเก็บลิงค์ในการสั่งเมนูของหวานไว้ และรูปภาพที่ 1 จะเลือกใช้ภาพขนมเค้ก ข้อความที่ 2 จะเก็บข้อความว่า “Food Menu” ซึ่งจะเก็บลิงค์ในการสั่งเมนูอาหารไว้ เพื่อสื่อความหมายเกี่ยวกับเมนูของหวาน และรูปภาพที่ 2 จะเลือกใช้ภาพช้อนส้อม เพื่อสื่อความหมายกับเมนูอาหาร รูปภาพที่ 3-2 ประกอบ



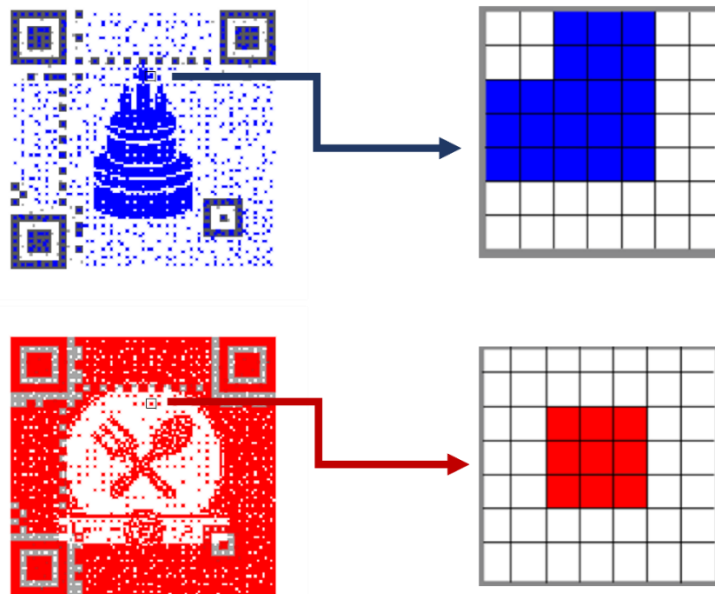
ภาพที่ 3-2 แสดงการเข้ารหัสรูปภาพ

3.1.1.2 ขั้นตอนต่อมาจะเริ่มสร้าง QR Code ด้วยการสร้าง QR Code แบบ Halftone ด้วยข้อความและรูปภาพที่จัดเตรียมไว้ โดย รูปภาพที่ 1, รูปภาพที่ 2, ข้อความที่ 1 และข้อความที่ 2 จะถูกนำไปแปลงเป็น QR Code ในรูปแบบ Halftone QR Code ด้วยวิธีการของ (Chu et al., 2013) โดยจะใช้โปรแกรมในการแปลงให้เป็น Halftone QR Code คือโปรแกรม VisualQRc หลังจากแปลงให้เป็น Halftone QR Code เสร็จแล้วจะได้ QR Code ในรูปแบบรูปภาพที่เก็บข้อมูลดังนี้ Halftone QR Code แบบที่ 1 ที่มีมุมมองรูปภาพเป็น “ขนมเค้ก” จะเก็บลิงค์ในการสั่งเมนูของหวานเอาไว้ Halftone QR Code แบบที่ 1 ที่มีมุมมองรูปภาพเป็น “ช้อนส้อม” จะเก็บลิงค์ในการสั่งเมนูอาหารเอาไว้ ดูรูปภาพที่ 3-3 ประกอบ



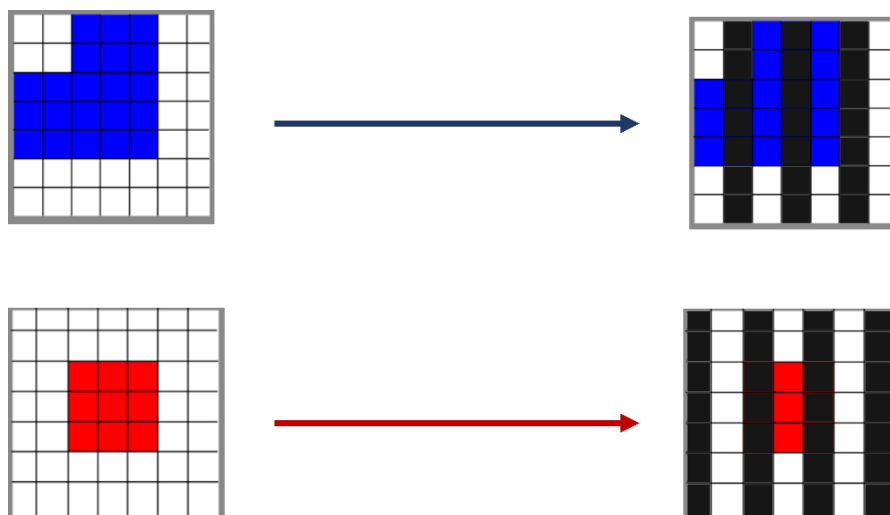
ภาพที่ 3-3 แสดงการแปลงรูปภาพให้เป็น QR Code แบบ Halftone

จากนั้นทำการปรับอัตราส่วนของ Halftone QR Code ให้เข้ากับขนาด 3x3, 4x4 และ 5x5 นิ้ว และตั้งค่าในส่วนของการละเอียด (Resolution) ให้เท่ากับ 100 PPI สำหรับการใช้งานคู่กับ Lenticular Lens ขนาด 50 LPI ตามสมการที่ 2-12 หลังจากนั้นคอลัมน์ในภาพจะถูกแทนที่ด้วยคอลัมน์ที่มีขนาดความกว้างเป็นหนึ่งพิกเซล ส่งผลให้ในหนึ่งคอลัมน์ของ Lenticular Lens จะครอบคลุมคอลัมน์ของ Halftone QR Code จำนวน 2 พิกเซล เมื่อสังเกตจะเห็นว่าใน หนึ่งโมดูลของ Halftone QR Code จะประกอบด้วยโมดูลขนาด 7x7 พิกเซล ดูรูปภาพที่ 3-4 ประกอบ



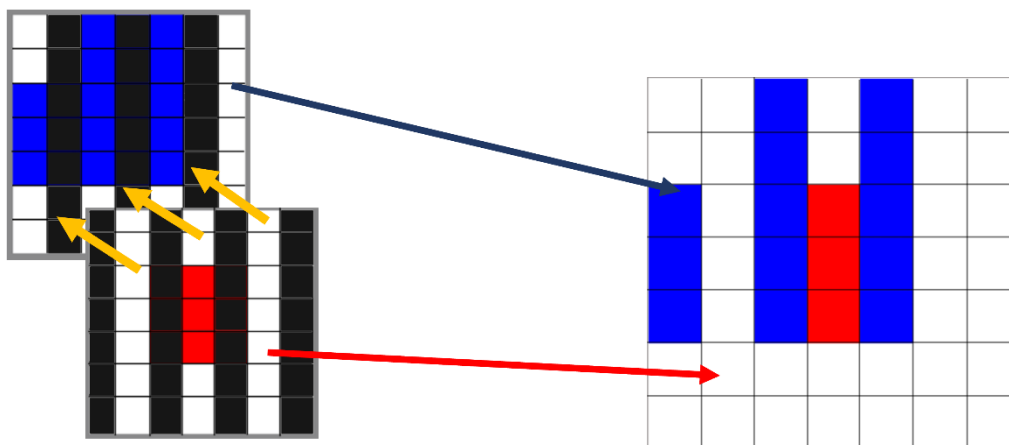
ภาพที่ 3-4 แสดงจำนวนพิกเซลใน 1 โมดูลของ QR Code

3.1.1.3 ขั้นตอนการทำภาพแบบ Lenticular ในส่วนของคอลัมน์ที่โดนครอบคลุมของ Halftone QR Code จำนวน 2 คอลัมน์ จะทำการลบคอลัมน์ออก 1 คอลัมน์ โดยภาพที่ 1 จะทำการลบคอลัมน์ทางด้านขวาออก จากทุกเซทคอลัมน์ที่ครอบคลุมด้วย 1 เส้นของ Lenticular Lens และภาพที่ 2 จะทำการลบคอลัมน์ทางด้านซ้ายออก จากทุกเซทคอลัมน์ที่ครอบคลุมด้วย 1 เส้นของ Lenticular Lens ดูภาพที่ 3-5 ประกอบ



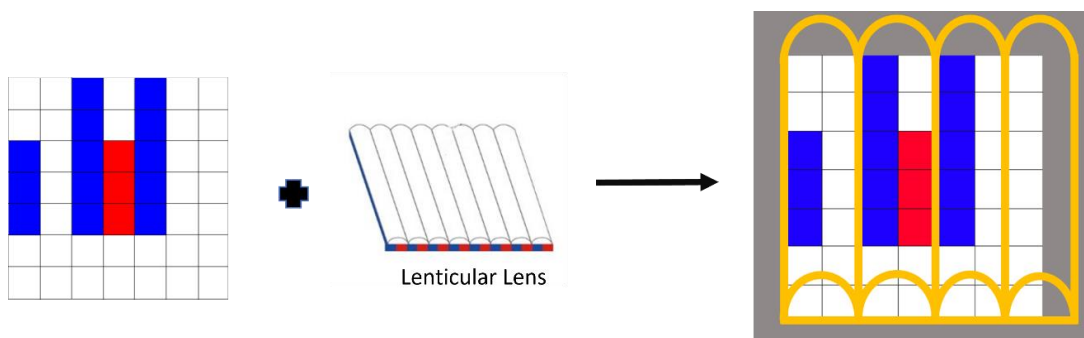
ภาพที่ 3-5 แสดงการตัดคอลัมน์ของโมดูล

จากนั้นแทนที่คอลัมน์ที่หายไปจากภาพที่ 1 ด้วยคอลัมน์ในส่วนที่เหลือจากคอลัมน์ในภาพที่ 2 หลังการแทนที่คอลัมน์ที่หายไปเรียบร้อยแล้ว จะสังเกตได้ว่า การเรียงตัวของคอลัมน์ที่แทนที่กันเสร็จแล้ว จะอยู่ในรูปแบบ (คอลัมน์ที่ 1, คอลัมน์ที่ 2, คอลัมน์ที่ 1, คอลัมน์ที่ 2, คอลัมน์ที่ 1, คอลัมน์ที่ 2) ดูภาพที่ 3-6 ประกอบ



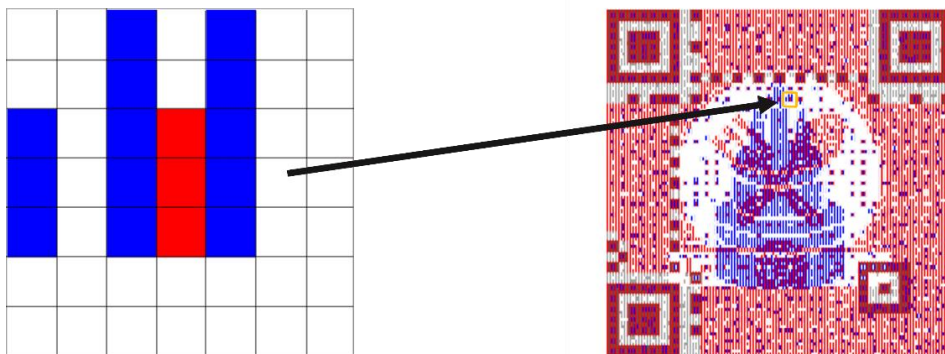
ภาพที่ 3-6 แสดงการแทรกระหว่างคอลัมน์ของ 2 โมดูลจาก ภาพ QR Code 2 รูปภาพ

3.1.1.4 ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการ วางแผ่น Lenticular Lens ที่มีขนาด 50 LPI โดยการวางแผ่น Lenticular Lens เข้ากับ QR Code ที่ทำการผสมกันทั้ง 2 QR Code เรียบร้อยแล้ว โดยสังเกตว่า 1 เส้นหรือ 1 คอลัมน์ ของแผ่น Lenticular Lens จะครอบคลุมทั้ง 1 คอลัมน์ของภาพทางด้านซ้าย และ 1 คอลัมน์ของภาพทางด้านขวา (ทั้งหมด 2 คอลัมน์ของ QR Code ที่ทำการผสมแล้ว) เพื่อสร้าง Dual Image QR Code ดูภาพที่ 3-7 ประกอบ



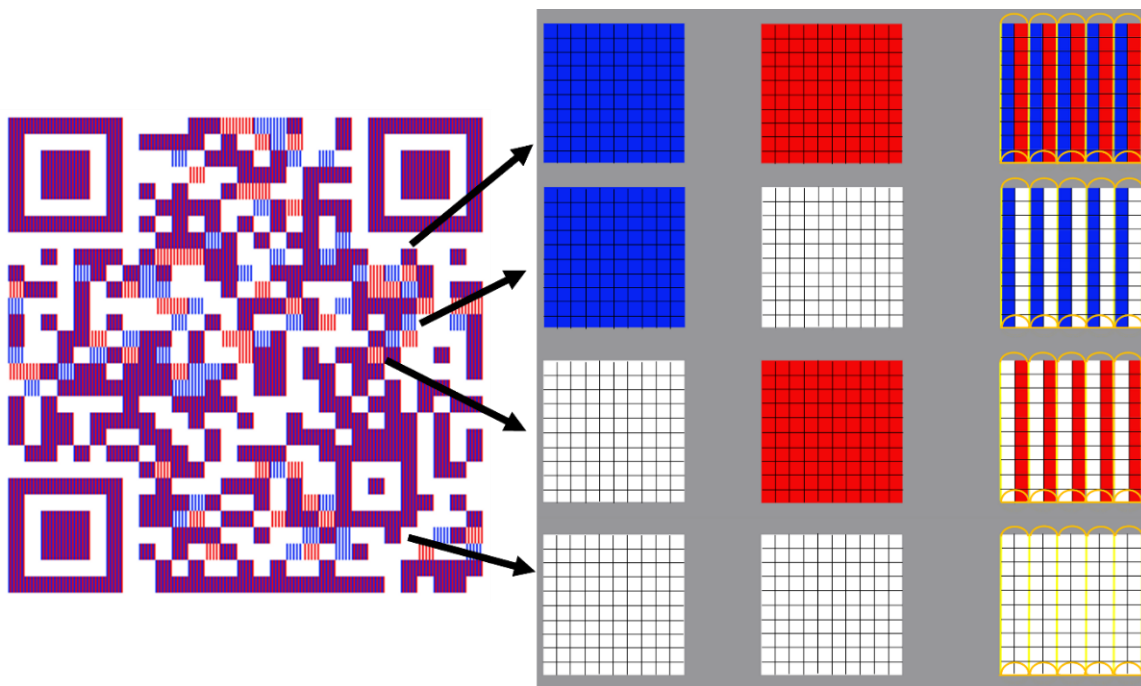
ภาพที่ 3-7 แสดงรูปแบบโมดูลเมื่อทำการวาง Lenticular Lens ทับบน QR Code

ตัวอย่างรูปแบบของโมดูลของ Dual Image QR Code ดูภาพที่ 3-8 ประกอบ



ภาพที่ 3-8 แสดงรูปแบบของโมดูลบน Dual Image QR Code

ตัวอย่างรูปแบบของโมดูลของ QR Code แบบทั่วไป ดูภาพที่ 3-9 ประกอบ



ภาพที่ 3-9 แสดงรูปแบบของโมดูลสำหรับ QR Code แบบทั่วไป

3.1.1.5 Pseudo-code สำหรับอธิบายการสร้าง Dual Image QR Code ด้วยการผสมผสาน Halftone QR Code อธิบายได้ในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 แสดง Pseudo-code อธิบายการสร้าง Dual Image QR Code

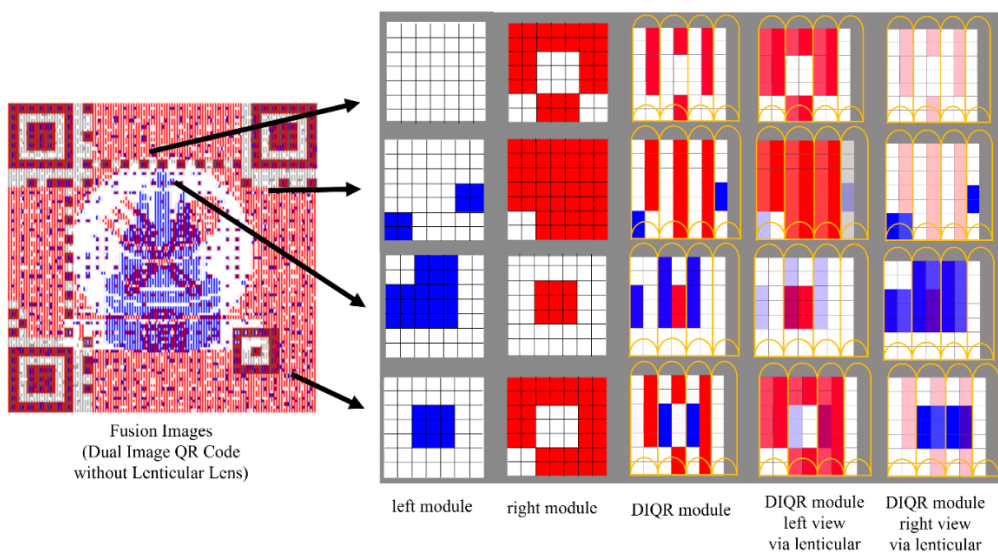
Algorithm 1 : Pseudo-code for generating the merged halftone QR codes (fusion image).	
Input : msg1, msg2, im1, im2, LPI	
Output : fusion_im	
hfqr 1 ← halftone_qr_generator(im1,msg1)	
hfqr 2 ← halftone_qr_generator(im2,msg2)	
hfqr 1 ← set_res(hfqr1,lpi) ▷ set img resolution with (1)	
hfqr 2 ← set_res(hfqr2,lpi) ▷ set img resolution with (1)	
w ← get_width(hfqr_r)	
for $i < - 0$ to $\frac{w}{2}-1$ do ▷interleave 2 images	
fusion_im[i]←hfqr_r[2 xi]	
fusion_im[i+1]←hfqr_l[(2 xi)+1]	
end for	

จำนวน	โดยที่	msg1	คือ ข้อความที่เข้ารหัส QR Code ข้อความที่ 1
		msg2	คือ ข้อความที่เข้ารหัส QR Code ข้อความที่ 2
		im1	คือ รูปภาพที่สื่อความหมายสำหรับข้อความที่ 1
		im2	คือ รูปภาพที่สื่อความหมายสำหรับข้อความที่ 2
		LPI	คือ ความละเอียดของแผ่น Lenticular Lens ที่ใช้ มีหน่วยเป็น
			เลนส์ต่อนิ้ว (เส้นต่อนิ้ว)
		w	คือ ขนาดของ QR Code
	i	คือ จำนวนของ Pixel	

3.2 การผสมผสานโมดูลสำหรับ Lenticular (Modules Fusion under Lenticular)

หลักการในการสร้าง Dual Image QR Code นั้นขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการถอดรหัสข้อความของเครื่องอ่าน QR Code แบบมาตรฐาน โดยหลังจากกระบวนการการจับตำแหน่งของ QR Code เครื่องอ่าน QR Code จะทำการถอดรหัสข้อความของ QR Code จากรูปภาพบน QR Code และทำการตรวจสอบในแต่ละโมดูล (บิต '0' และ '1') ภายใน QR Code โดยจะทำการตรวจสอบจากพิกเซลตรงกลางของ QR Code ด้วยเทคนิคแบบเดียวกับวิธีการของ Halftone QR Code วิธีนี้จะเป็นการรักษาพิกเซลตรงกลางของ QR Code ไว้เพื่อคงความสามารถในการสแกนของ QR Code ไว้ และทำการปรับพิกเซลโดยรอบให้มีความเหมาะสมกับรูปภาพที่นำเข้าไป โดยหลักการของ Dual Image QR Code เมื่อผู้สังเกตสังเกตเห็นโมดูลผ่านเลนส์จากมุมมองทางด้านซ้าย ผู้สังเกตจะมองเห็นคอลัมน์ทาง

ด้านขวาแบบอัตราส่วนขยายเพิ่มขึ้น และในทางกลับกันเมื่อผู้สังเกตสังเกตโมดูลผ่านเลนส์จากมุมมองทางด้านขวา ผู้สังเกตจะมองเห็นคอลัมน์ทางด้านซ้ายแบบอัตราส่วนขยายเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น เมื่อมอง Dual Image QR Code จากทางด้านซ้าย จะมองเห็นคอลัมน์ทางด้านขวาที่ทำการขยายไปด้านซ้ายเพิ่มอีก 1 คอลัมน์ และในกรณีเดียวกัน เมื่อมอง Dual Image QR Code จากทางด้านขวา จะมองเห็นคอลัมน์ทางด้านขวาที่ทำการขยายไปด้านขวาเพิ่มอีก 1 คอลัมน์ รูปภาพที่ 3-10 ประกอบ



ภาพที่ 3-10 แสดงรูปแบบการมองเห็นมุมมองต่างๆของโมดูลภายใน Dual Image QR Code

3.3 การทดลองในสำหรับวัดประสิทธิภาพ

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายการออกแบบการวัดประสิทธิภาพต่างๆภายในงานวิจัย ซึ่งเราได้การวัดประสิทธิภาพเพื่อประเมินความทนทานในการใช้งาน Dual Image QR Code โดยมีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อวัดอัตราความสำเร็จในการถอดรหัสข้อความของ Dual Image QR Code ซึ่งจะแบ่งออกเป็น การจัดเตรียมเงื่อนไขต่างๆในการตั้งค่าเพื่อสร้าง Dual Image QR Code และเงื่อนไขที่ทำให้ Dual Image QR Code สามารถถอดรหัสข้อความได้ และการทดสอบด้านการรับรู้

3.3.1 การตั้งค่าในการสร้าง Dual Image QR Code

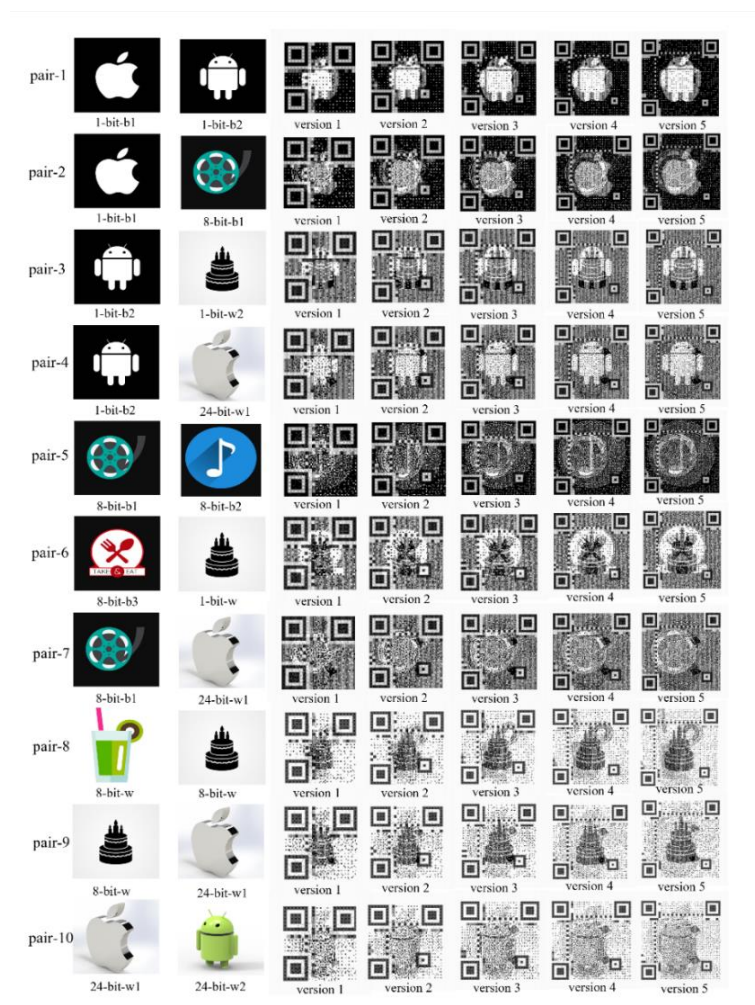
สำหรับการจัดเตรียมเงื่อนไขต่างๆในการตั้งค่าเพื่อสร้าง Dual Image QR Code พารามิเตอร์ที่เราใช้เพื่อการตั้งค่าประกอบด้วย ระดับการแก้ไขข้อผิดพลาดของ Dual Image QR Code (Error Correction : e) เวอร์ชันในการเข้ารหัส (Version : v) และรูปภาพคู่ที่สื่อความหมายกับข้อความใน Dual Image QR Code (i)

ระดับการแก้ไขข้อผิดพลาด (e) จะเป็นพารามิเตอร์ที่ระบุค่าเปอร์เซ็นต์ข้อมูลที่มีเมื่อมีการสูญเสียข้อมูลที่ไม่เกินกำหนดไว้จะสามารถกู้ข้อมูลนั้นกลับมาได้ หรือเมื่อเกิดสัญญาณรบกวนจะช่วยให้เครื่องถอดรหัสข้อความของ QR Code สามารถถอดรหัสข้อความออกมาได้ ในงานของเราจะกำหนดระดับการแก้ไขข้อผิดพลาดไว้ทั้งหมด 4 ระดับ ได้แก่ ECL หรือระดับข้อผิดพลาด 7% หรือน้อยกว่าจึงจะสามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้, ECM หรือ

ระดับข้อผิดพลาด 15% หรือน้อยกว่าจึงจะสามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้, ECQ หรือระดับข้อผิดพลาด 25% หรือน้อยกว่าจึงจะสามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้ และECH หรือระดับข้อผิดพลาด 30% หรือน้อยกว่าจึงจะสามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้

ในส่วนของเวอร์ชัน ของ QR Code (v) จะเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับระบุความจุของรหัส QR Code โดยที่ เมื่อ QR Code มีเวอร์ชันที่สูงขึ้น จะมีความจุที่เพิ่มมากขึ้นและมีความละเอียดของโมดูลที่เพิ่มมากขึ้น ในการทดลองเราจะทดลองที่ QR Code เวอร์ชัน 1 ถึง เวอร์ชัน 5

นอกจากนี้รูปภาพที่เราใช้ใน จะเป็นการใช้รูปภาพคู่ (i) ที่มีความหลากหลายและสามารถสื่อความหมายได้กับข้อความที่อยู่ใน QR Code ซึ่งเราจะใช้รูปภาพคู่จำนวน 10 คู่ (หรือรูปภาพที่แตกต่างกัน 20 ภาพ) ซึ่งความละเอียดของรูปภาพที่ใช้ในงานวิจัยจะกำหนดเป็น รูปภาพแบบ 1 บิต (ภาพขาว-ดำ) รูปภาพแบบ 8 บิต (รูปภาพแบบสีที่มีความละเอียดที่น้อย) และรูปภาพแบบ 24 บิต (รูปภาพที่มีความละเอียดสูง) รูปภาพที่ 3-11 ประกอบ



ภาพที่ 3-11 แสดงภาพคู่ทั้ง 10 คู่ สำหรับการัน้ Dual Image QR Code ใน Version ต่างๆ

3.3.2 เงื่อนไขในการถอดรหัสข้อความ

ในส่วนของเงื่อนไขในการถอดรหัสข้อความ พารามิเตอร์ที่เราใช้ในงานวิจัยจะประกอบไปด้วย ระยะห่างของกล้อง (D) ทิศทางของกล้องหรือมุมที่ใช้สแกน (θ) และขนาดของ Dual Image QR Code (S) ตัวอย่างรูปภาพที่ 2-31 ประกอบ

ในการทดลอง เราใช้ระยะห่างของกล้อง (D) ทั้งหมด 5 ระยะ ประกอบด้วย ระยะ 10 เซนติเมตร 15 เซนติเมตร 20 เซนติเมตร 25 เซนติเมตร และ 30 เซนติเมตร

ทิศทางของกล้องหรือมุมที่ใช้สแกน (θ) เราใช้มุมมองสำหรับทดสอบทั้งหมด 8 ทิศทาง ประกอบไปด้วย ทิศทางทางด้านซ้ายทั้งหมด 4 มุม และ ทิศทางทางด้านขวาทั้งหมด 4 มุม ทิศทางด้านซ้าย -50° , -40° , -30° , -20° ทิศทางด้านขวา 20° , 30° , 40° และ 50°

ขนาดของ Dual Image QR Code (S) เราใช้ขนาดของ QR Code เราใช้ขนาดที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด 3 ขนาด คือ 3 นิ้ว (3×3), 4 นิ้ว (4×4) และ 5 นิ้ว (5×5) รายละเอียดต่างๆแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับใช้ในการทดลอง

รูปภาพแบบที่	Error Correction	ขนาด	ระยะ	มุม	Version
i(x1)	ECL	S(x2)	D(x3)	$\theta(x4)$	v1
					v2
					v3
					v4
					v5
i(x1)	ECM	S(x2)	D(x3)	$\theta(x4)$	v1
					v2
					v3
					v4
					v5
i(x1)	ECQ	S(x2)	D(x3)	$\theta(x4)$	v1
					v2
					v3
					v4
					v5

ตารางที่ 3-2 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับใช้ในการทดลอง (ต่อ)

รูปภาพแบบที่	Error Correction	ขนาด	ระยะ	มุม	Version
i(x1)	ECH	S(x2)	D(x3)	$\theta(x4)$	v1
					v2
					v3
					v4
					V5

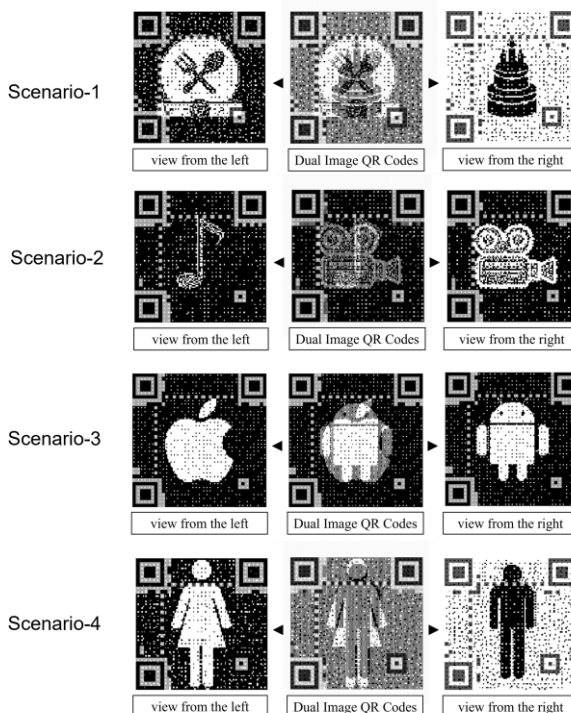
- โดยที่ x1 คือ รูปภาพคู่แบบที่ 1-10
 x2 คือ ขนาดของ Dual Image QR Code
 x3 คือ ระยะห่างของกล้อง
 x4 คือ มุมมองที่ใช้ในการทดสอบ Dual Image QR Code

3.3.3 การทดสอบด้านการรับรู้

ในการทดสอบด้านการรับรู้ของผู้ใช้งานต่อ QR Code โดยเราจะกำหนดสถานการณ์จำลอง ออกเป็น 4 สถานการณ์ ดังแสดงในภาพที่ 3-12 ภายใต้อาจารย์ผู้เข้าร่วมทดลองจำนวน 13 คน ในแต่ละสถานการณ์ ผู้เข้าร่วมจะได้รับฟังเกี่ยวกับสถานการณ์ต่างๆใน Dual Image QR Code แต่ละรูปแบบ และผู้เข้าร่วมทดลอง จะต้องตอบคำถามตามหัวข้อต่างๆที่เราได้กำหนดขึ้น ประกอบไปด้วย ให้อธิบายว่าผู้เข้าร่วมสามารถมองเห็นรูปภาพ เป็นรูปอะไรภายใต้ Dual Image QR Code แต่ละรูปแบบ และให้ผู้เข้าร่วมการทดลองทายว่าข้อความภายใต้ Dual Image QR Code คืออะไร โดย Dual QR Code ที่ใช้ทดลองจะถูกกำหนดเป็น Dual Image QR Code ขนาด 3 นิ้ว (3x3 นิ้ว) มีระดับการแก้ไขข้อผิดพลาดของ QR Code อยู่ในระดับ ECH และใช้ QR Code เวอร์ชัน 4 สำหรับสถานการณ์ในการทดลองต่างๆ 4 สถานการณ์มีดังนี้

- 1) สถานการณ์ที่ 1 เกี่ยวกับการใช้งานบนเมนูอาหารต่างๆในร้านอาหาร ตัวอย่าง สถานการณ์ คือ เมื่อผู้ใช้เข้าไปใช้บริการในด้านการให้บริการในร้านอาหาร ซึ่งทางร้านอาหารมีการสั่งอาหารโดยใช้ Dual Image QR Code โดยในการสั่งเมนู การสแกนแต่ละด้านจะเป็นการสั่งเมนูหรือของหวาน
- 2) สถานการณ์ที่ 2 เกี่ยวกับการใช้งานบนใบปลิวส่งเสริมการขายแพลตฟอร์มการให้ความบันเทิง ตัวอย่างสถานการณ์ คือ เมื่อผู้ใช้งานเข้าไปใช้บริการในร้านขายสื่อด้านความบันเทิง การนำ Dual Image QR Code ไปใช้จะเป็นการนำทางเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกซื้อสื่อบริการในด้านเพลงหรือภาพยนตร์ โดยการสแกนในแต่ละด้านจะบอกถึงตำแหน่งของสื่อชิ้นๆและข้อมูลต่างๆไม่ว่าจะเป็น สื่อยอดนิยม และราคา
- 3) สถานการณ์ที่ 3 เกี่ยวกับการใช้งานบนการ์ดโฆษณาแอปพลิเคชันแพลตฟอร์มต่างๆบนโทรศัพท์มือถือ ตัวอย่างสถานการณ์ คือ เมื่อผู้ใช้งานต้องการโปรโมตแอปพลิเคชันต่างๆ ผ่านแพลตฟอร์มบนโทรศัพท์มือถือ การนำ Dual Image QR Code ไปใช้จะเป็นการนำทางเพื่อให้ผู้ใช้งานดาวน์โหลดแอปพลิเคชันนั้นๆ โดยการสแกนในแต่ละด้านจะเป็นลิงค์ในการดาวน์โหลดแอปพลิเคชันผ่านทาง Apple store หรือ Play store

4) สถานการณ์ที่ 4 เกี่ยวกับการใช้งานบนป้ายบอกข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับแฟชั่นในร้านขายเสื้อผ้า ตัวอย่างสถานการณ์ คือ เมื่อผู้ใช้งานเข้ารับบริการในด้านร้านขายเสื้อผ้า การนำ Dual Image QR Code ไปใช้ผู้ใช้งานได้รับการบริการในด้านการเลือกซื้อเสื้อผ้า โดยเมื่อสแกน Dual Image ในแต่ละด้านจะเป็นการแนะนำเสื้อผ้าแฟชั่น ไม่ว่าจะเป็นแฟชั่นผู้ชายหรือแฟชั่นผู้หญิง โดยจะแนะนำในด้านตำแหน่งของชุดนั้นๆ ราคา ชุดยอदनนิยม และรายละเอียดข้อมูลต่างๆ



ภาพที่ 3-12 แสดง Dual Image QR Code ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองด้านผู้ใช้งาน

3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลอง เราได้ทดลองโดยวิธีการถอดรหัสข้อความผ่านเครื่องสแกน QR Code ตามเงื่อนไขต่างๆ ตามที่แสดงในตารางที่ 3-2 โดยเครื่องมือที่ใช้ในการถอดรหัสข้อความจะใช้ เครื่องสแกน QR Code ภายในระบบปฏิบัติการ iOS เครื่องมือที่เราใช้คือโทรศัพท์มือถือ iPhone 13 Pro Max ในเวอร์ชัน iOS 15.5 โดยเงื่อนไขในการสแกนคือ Dual Image QR Code แต่ละแบบจะถูกสแกนทั้งหมด 10 ครั้ง และในการสแกนแต่ละครั้ง จะใช้การจับเวลาไม่เกินครั้งละ 10 วินาที เมื่อการสแกนแต่ละครั้งทำตามเงื่อนไขถูกต้องจะกำหนดว่าการสแกนครั้งนั้นเป็นการสแกนที่สำเร็จ

แผ่น Lenticular Lens ที่เราใช้ในการทดลอง เราจะใช้ แผ่น Lenticular Lens ที่มีขนาดความละเอียด 50 เส้นสต่อนิ้ว (LPI) และความละเอียดของรูปภาพที่นำเข้า (input) หลังจากสร้าง QR Code แบบ Halftone เราจะตั้งค่าให้เป็น QR Code ในขนาดที่กำหนด และตั้งค่าความละเอียดของรูปภาพให้เป็น 100 พิกเซล

ตอนนี้ (PPI) ซึ่งในการตั้งค่าความละเอียดของรูปภาพที่ใช้คู่กับแผ่น Lenticular Lens ที่มีความแตกต่างออกไป เราสามารถตั้งค่าได้ด้วยสมการที่ 3-1

$$2xLPI = PPI \quad (3-1)$$

อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองเพิ่มเติม ประกอบด้วย ขาตั้งกล้อง ฟันที่ใช้ในการวัด และ ไมโครเมตร ดูรูปภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลจากการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสร้าง QR Code ในรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า Dual Image QR Code ซึ่งจากการทดลองเกี่ยวกับความสำเร็จในการสแกนของ Dual Image QR Code ในด้านต่างๆ จำนวน 24,000 รูปแบบ และรูปแบบในการทดสอบเกี่ยวกับผู้ใช้งาน จำนวน 4 รูปแบบ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลและทำการเสนอผลการวิเคราะห์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 ผลลัพธ์ด้านการสแกน

ส่วนที่ 2 ผลลัพธ์ด้านการรับรู้ของผู้ใช้งาน

4.1.1 ส่วนที่ 1 ผลลัพธ์ด้านการสแกน

โดยการทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถในการสแกน QR Code โดยในส่วนของผลลัพธ์การทดลองเราทำการรวบรวมเงื่อนไขต่างๆในการสแกน ทั้งหมด 24,000 เงื่อนไข ($e \times v \times i \times D \times \theta \times S$) โดยทำการทดสอบในแต่ละเงื่อนไขเงื่อนไขละ 10 ครั้ง รวมจำนวนครั้งในการสแกนทั้งหมด 240,000 ครั้ง ในการทดลองจะทดสอบความสามารถในการสแกนในแต่ละรูปแบบจะประกอบไปด้วย รูปแบบต่างๆของ Dual Image QR Code ขนาด มุม ระยะห่าง การกีดกันข้อผิดพลาด และเวอร์ชัน โดยตารางที่ 4-1 ถึง ตารางที่ 4-6 แสดงความสำเร็จและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนในแต่ละรูปแบบ

ตารางที่ 4-1 แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับภาพคู่ที่ใช้ในการทดลอง

รูปแบบของรูปภาพ	ผลรวมของความสำเร็จในการสแกนทั้งหมด (24000 ครั้ง)	ผลรวมของความสำเร็จในการสแกนทั้งหมด (10 ครั้ง)	เปอร์เซ็นต์ผลรวมของความสำเร็จในการสแกนทั้งหมด
Pair-1	7440	3.10	31%
Pair-2	0	0	0%
Pair-3	9000	3.75	37.5%
Pair-4	5196	2.15	21.5%
Pair-5	0	0	0%
Pair-6	12200	5.08	50.8%
Pair-7	2004	0.84	8.4%
Pair-8	2004	0.84	8.4%
Pair-9	2596	1.07	10.7%

ตารางที่ 4-1 แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับภาพคู่ที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

รูปแบบของ รูปภาพ	ผลรวมของความสำเร็จในการ สแกนทั้งหมด (24000 ครั้ง)	ผลรวมของความสำเร็จในการ สแกนทั้งหมด (10 ครั้ง)	เปอร์เซ็นต์ผลรวมของ ความสำเร็จในการสแกน ทั้งหมด
Pair-10	0	0	0%
รวม	40386	1.68	16.8%

จากตารางจะเห็นได้ว่า ในการสแกนภาพคู่แต่ละรูปแบบ ความสำเร็จในการสแกน 10 ครั้ง ของรูปภาพคู่แต่ละรูปแบบ 10 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบจะมีการสแกนทั้งหมด 24,000 ครั้ง จากการสแกนพบว่ามีการสแกนติดทั้งหมด 40,386 ครั้ง จากทั้งหมด 240,000 ครั้ง โดยรูปแบบที่ดีที่สุดคือรูปภาพคู่ที่ 6 (ภาพพื้นหลังสีขาวรวมกับภาพพื้นหลังสีดำ) พบว่ามีการสแกนติดทั้งสิ้น 12200 ครั้ง จากการสแกนทั้งหมด 24,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10 ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 5.08 หรือ ในการสแกน 10 ครั้ง จะสแกนติดทั้งหมด 5 ครั้ง หรือคิดเป็น 50.8% จากการสแกนทั้งหมด รองลงมาคือ ภาพคู่ที่ 3 (ภาพพื้นหลังสีขาวรวมกับภาพพื้นหลังสีดำ) พบว่ามีการสแกนติดทั้งสิ้น 9000 ครั้ง จากการสแกนทั้งหมด 24,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10 ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 3.75 หรือ ในการสแกน 10 ครั้ง จะสแกนติดทั้งหมด 3 ครั้ง หรือคิดเป็น 37.5% จากการสแกนทั้งหมด จะสังเกตได้ว่าภาพที่มีพื้นหลังที่มีสีที่แตกต่างกันและมีความละเอียดที่ไม่มากจะส่งผลให้มีการสแกนที่ดี และรูปแบบที่สแกนไม่ติดเลย คือ รูปภาพคู่ที่ 2, รูปภาพคู่ที่ 5 และรูปภาพคู่ที่ 10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในรูปภาพคู่ที่ 2 และรูปภาพคู่ที่ 5 ภาพที่เลือกใช้จะเป็นรูปภาพคู่ที่มีลักษณะเป็นพื้นหลังสีดำทั้งคู่ และมีรายละเอียดของภาพที่มากขึ้น ส่วนภาพคู่ที่ 10 จะเป็นภาพในรูปแบบที่มีความสมจริงมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการเลือกใช้ภาพที่มีสีพื้นหลังที่เหมือนกันและมีความละเอียดของรูปภาพที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้มีการสแกนติดที่ไม่ดีมากขึ้น

ตารางที่ 4-2 แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับ Error Correction Level ต่างๆ

Error correction	ผลรวมของความสำเร็จในการ สแกนทั้งหมด (24000 ครั้ง)	ผลรวมของความสำเร็จในการ สแกนทั้งหมด (10 ครั้ง)	เปอร์เซ็นต์ผลรวมของ ความสำเร็จในการสแกน ทั้งหมด
ECL	0	0.00	0%
ECM	4560	0.76	7.6%
ECQ	16512	2.75	27.5%
ECH	19314	3.22	32.2%
รวม	40386	1.68	16.8%

จากตารางจะเห็นได้ว่า จากระดับ Error correction ที่ใช้ ความสำเร็จในการสแกน 10 ครั้ง ของ Error correction แต่ละระดับ 4 ระดับ โดยใน Error correction แต่ละระดับจะมีการสแกนทั้งหมด 60,000 ครั้ง จากการสแกนพบว่าการสแกนติดทั้งหมด 40,386 ครั้ง จากทั้งหมด 240,000 ครั้ง โดยระดับ Error correction ที่ดีที่สุดคือ Error correction ระดับ H โดยพบว่าสแกนติดทั้งหมด 19,314 ครั้ง จากทั้งหมด 60,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 3.22 หรือคิดเป็น 32.2% จากการสแกนทั้งหมด รองลงมา คือ Error correction ระดับ Q โดยพบว่าสแกนติดทั้งหมด 16,512 ครั้ง จากทั้งหมด 60,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 2.75 หรือคิดเป็น 27.5% จากการสแกนทั้งหมด จะเห็นได้ว่า เมื่อ Error correction มีระดับที่สูงขึ้น อัตราความสำเร็จในการสแกนก็จะเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4-3 แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับขนาดของ Dual Image QR Code

ขนาด	ผลรวมของความสำเร็จในการสแกนทั้งหมด (24000 ครั้ง)	ผลรวมของความสำเร็จในการสแกนทั้งหมด (10 ครั้ง)	เปอร์เซ็นต์ผลรวมของความสำเร็จในการสแกนทั้งหมด
3	17878	2.23	22.3%
4	13512	1.69	16.9%
5	8996	1.12	11.2%
รวม	40386	1.68	16.8%

จากตารางจะเห็นได้ว่า จากขนาดของ Dual Image QR Code ที่ใช้ ความสำเร็จในการสแกน 10 ครั้ง ของขนาดแต่ละขนาดที่ใช้ทั้งหมด 3 ขนาด โดยในแต่ละขนาดจะมีการสแกนทั้งหมด 80,000 ครั้ง จากการสแกนพบว่าการสแกนติดทั้งหมด 40,386 ครั้ง จากทั้งหมด 240,000 ครั้ง โดยขนาดของ QR Code ที่ดีที่สุดที่เลือกใช้ คือ ขนาด 3 นิ้ว (3x3 นิ้ว) พบว่าสแกนติดทั้งหมด 17,878 ครั้ง จากทั้งหมด 80,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 2.23 คิดเป็น 22.3% จากการสแกนทั้งหมด รองลงมาคือ ขนาด 4 นิ้ว (4x4 นิ้ว) พบว่าสแกนติดทั้งหมด 13,512 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 1.69 คิดเป็น 16.9% จากการสแกนทั้งหมด และขนาด 5 นิ้ว (5x5 นิ้ว) พบว่าสแกนติดทั้งหมด 8,996 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 1.12 คิดเป็น 11.2% จากการสแกนทั้งหมด ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า เมื่อ QR Code มีขนาดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสแกนลดลง

ตารางที่ 4-4 แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับระยะห่างของกล้องที่สแกน

ระยะห่างของกล้อง	ผลรวมของความสำเร็จในการสแกนทั้งหมด (24000 ครั้ง)	ผลรวมของความสำเร็จในการสแกนทั้งหมด (10 ครั้ง)	เปอร์เซ็นต์ผลรวมของความสำเร็จในการสแกนทั้งหมด
10	7218	1.50	15%
15	7198	1.50	15%
20	7905	1.65	16.5%
25	9020	1.88	18.8%
30	9045	1.88	18.8%
รวม	40386	1.68	16.8%

จากตารางจะเห็นได้ว่า จากระยะห่างของกล้องกับ QR Code ในการสแกน ความสำเร็จในการสแกน 10 ครั้ง ของระยะห่างแต่ละระยะที่ใช้ทั้งหมด 5 ระยะ โดยในระยะห่างแต่ละระยะจะมีการสแกนทั้งหมด 48,000 ครั้ง จากการสแกนพบว่ามีการสแกนติดทั้งหมด 40,386 ครั้ง จากทั้งหมด 240,000 ครั้ง โดนระยะห่างที่ดีที่สุดคือ ระยะห่างที่ 25 และ 35 เซนติเมตร พบว่าสแกนติดทั้งหมด 9,020 และ 9,045 ครั้ง ตามลำดับ จากการสแกนทั้งหมดระยะห่างละ 48,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 2.23 คิดเป็น 22.3% จากการสแกนทั้งหมด รองลงมาคือ ระยะ 20 เซนติเมตร พบว่าสแกนติดทั้งหมด 7,905 ครั้ง จากการสแกนทั้งหมด 48,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 1.65 คิดเป็น 16.5% จากการสแกนทั้งหมด และระยะ 10 เซนติเมตร และ 25 เซนติเมตร พบว่าสแกนติดทั้งหมด 7,218 และ 7,198 ครั้ง ตามลำดับ จากการสแกนทั้งหมดระยะห่างละ 48,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 1.50 คิดเป็น 1.5% จากการสแกนทั้งหมด จะสังเกตได้ว่าเมื่อระยะห่างเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสแกนที่ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 4-5 แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับเวอร์ชันของ Dual Image QR Code

Version	ผลรวมของความสำเร็จในการสแกนทั้งหมด (24000 ครั้ง)	ผลรวมของความสำเร็จในการสแกนทั้งหมด (10 ครั้ง)	เปอร์เซ็นต์ผลรวมของความสำเร็จในการสแกนทั้งหมด
1	5289	1.10	11%
2	10230	2.13	21.3%
3	10267	2.14	21.4%
4	10360	2.16	21.6%
5	4240	0.88	8.8%
รวม	40386	1.68	16.8%

จากตารางจะเห็นได้ว่า จาก Version ของ QR Code ที่ใช้ ความสำเร็จในการสแกน 10 ครั้ง ของ Version ที่ใช้ทั้งหมด 5 Version โดยในแต่ละ Version จะมีการสแกนทั้งหมด 48,000 ครั้ง จากการสแกน พบว่ามีการสแกนติดทั้งหมด 40,386 ครั้ง จากทั้งหมด 240,000 ครั้ง โดย Version ที่ดีที่สุดคือ Version 4 พบว่า สแกนติดทั้งหมด 10,360 ครั้ง จากทั้งหมด 48,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมดคิดเป็นค่าเฉลี่ย 2.16 คิดเป็น 21.6% รองลงมาคือ Version 3 พบว่าสแกนติดทั้งหมด 10,267 ครั้ง จากทั้งหมด 48,000 ครั้ง โดยมีการสแกน ติดทั้งหมดคิดเป็นค่าเฉลี่ย 2.14 คิดเป็น 21.4% และ Version 2 พบว่าสแกนติดทั้งหมด 10230 ครั้ง จากทั้งหมด 48,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 2.13 คิดเป็น 21.3% จากการสแกนทั้งหมด ส่วน Version ที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสแกนที่ลดลงคือ Version 1 พบว่าสแกนติดทั้งหมด 5,289 ครั้ง จากทั้งหมด 48,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 1.10 คิดเป็น 11% จากการสแกนทั้งหมด และ Version พบว่าสแกนติดทั้งหมด 4,240 ครั้ง จากทั้งหมด 48,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10ครั้ง) คิดเป็น ค่าเฉลี่ย 0.88 คิดเป็น 8.8% จากการสแกนทั้งหมด จะสังเกตได้ว่า การเลือกใช้ QR Code ที่มี Version ที่ต่ำเกินไป (Version1) จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสแกนของ QR Code ที่ไม่ดีเพราะมีจำนวนโมดูลที่น้อยเกินไปและมี ขนาดของโมดูลที่ใหญ่เกินไป และการใช้ QR Code ที่มี Version มีสูงเกินไป (Version 5 หรือสูงกว่า) ก็จะมีผลต่อ ประสิทธิภาพในการสแกนของ QR Code ที่ไม่ดีเช่นกันเพราะเมื่อ QR Code มี Version ที่มากขึ้น ก็จะมีจำนวน โมดูลที่มากขึ้นจึงส่งผลให้ขนาดโมดูลมีขนาดที่เล็กลง ดังนั้นการเลือกใช้ QR Code version 3 - QR Code version 4 จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสแกนที่ดีที่สุด

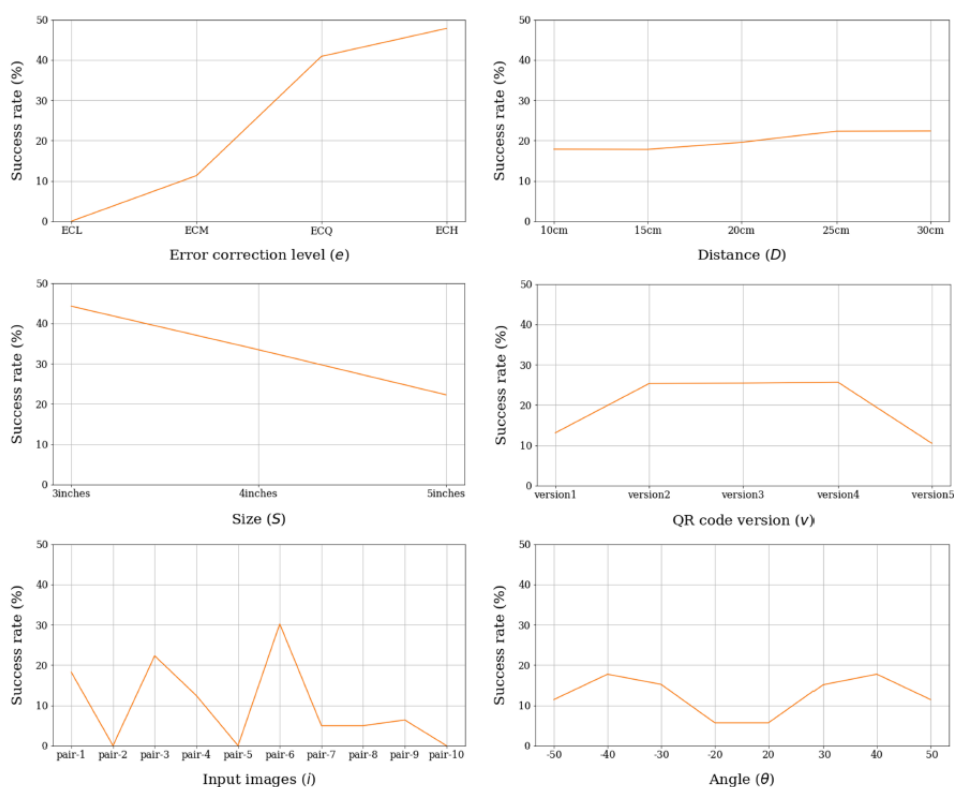
ตารางที่ 4-6 แสดงผลรวมและค่าเฉลี่ยของความสำเร็จในการสแกนสำหรับมุมมองต่างๆในการสแกน

มุม	ผลรวมของความสำเร็จในการ สแกนทั้งหมด (24000 ครั้ง)	ผลรวมของความสำเร็จในการ สแกนทั้งหมด (10 ครั้ง)	เปอร์เซ็นต์ผลรวมของ ความสำเร็จในการสแกน ทั้งหมด
-50°	4621	1.54	15.4%
-40°	7161	2.39	2.39%
-30°	6135	2.05	20.5%
-20°	2290	0.76	7.6%
20°	2288	0.76	7.6%
30°	6099	2.03	20.3%
40°	7166	2.39	23.9%
50°	4626	1.54	15.4%
รวม	40386	1.68	16.8%

จากตารางจะเห็นได้ว่า จากทิศทางการสแกน QR Code ในการทดสอบ ความสำเร็จในการ สแกน 10 ครั้ง ของมุมมองที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 8 มุมมอง ประกอบด้วยมุมมองทางด้านซ้าย 4 มุมมอง และ มุมมองทางด้านขวา 4 มุมมอง จากการสแกนพบว่ามีสแกนติดทั้งหมด 40,386 ครั้ง จากทั้งหมด 240,000 ครั้ง

โดยมุมมองที่ดีที่สุดในการสแกนคือ มุมมอง 40° และ -40° พบว่าสแกนติดทั้งหมด 7,166 และ 7,161 ครั้ง ตามลำดับ จากการสแกนทั้งหมดมุมมองละ 48,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10 ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 2.39 คิดเป็น 23.9% ของการสแกนทั้งหมด รองลงมาคือ มุมมอง 30° และ -30° พบว่าสแกนติดทั้งหมด 6,099 และ 6,135 ครั้ง ตามลำดับ จากการสแกนทั้งหมดมุมมองละ 48,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10 ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 2.03 และ 2.05 ตามลำดับ คิดเป็น 20.5% ของการสแกนทั้งหมด และมุมมอง 50° และ -50° พบว่าสแกนติดทั้งหมด 4626 และ 4621 ครั้ง ตามลำดับ จากการสแกนทั้งหมดมุมมองละ 48,000 ครั้ง โดยมีการสแกนติดทั้งหมด (10 ครั้ง) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 1.54 คิดเป็น 15.4% ของการสแกนทั้งหมด ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า เมื่อมุมมองมีระยะที่แคบเกินไปจะส่งผลให้มองเห็นภาพที่ไม่ชัดเจนและทำให้ประสิทธิภาพในการสแกนที่ลดลง และในกรณีเดียวกัน มุมมองที่กว้างเกินไปก็จะส่งผลให้การมองเห็นภาพมีการเปลี่ยนเป็นภาพใหม่จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสแกนลดลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นมุมมองที่เหมาะสมที่สุดในการสแกน จะอยู่ที่ 30° ถึง 40° และ -40° ถึง -30° ตามลำดับ

จากข้อมูลข้างต้นเราได้รวบรวมความสำเร็จของรูปแบบต่างๆจากพารามิเตอร์ต่างๆมาสรุปเป็นผลลัพธ์ในรูปแบบกราฟ ดังแสดงในภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 แสดงอัตราความสำเร็จสำหรับพารามิเตอร์รูปแบบต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

จากภาพที่ 4-1 จะเห็นได้ว่า เมื่อ Error Correction มีระดับที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพอัตราความสำเร็จมีค่าเพิ่มมากขึ้น ขนาดของ Dual Image QR Code ที่เหมาะสมคือขนาด 3x3 นิ้ว

รูปภาพที่เหมาะสมสำหรับการใช้สร้าง Dual Image QR Code คือ รูปภาพคู่ที่ 6 (ภาพพื้นหลังสีขาวรวมกับภาพพื้นหลังสีดำ) ระยะห่างที่เหมาะสมสำหรับการสแกนคือ ระยะห่างที่ 25 ถึง 30 เซนติเมตร Version ที่เหมาะสมที่ใช้ควรถือจะใช้ QR Code version 2 ถึง QR Code version 4 และมุมมองที่เหมาะสมในการสแกนคือ 30° ถึง 40° และ -40° ถึง -30° ตามลำดับ

Error correction level (e)	ECH 47%		ECQ 39%		ECM 12%			
QR code version (v)	version4 26%	version3 24%	version2 23%	version1 14%	version5 11%			
Input images (I)	pair-6 32%	pair-3 24%	pair-1 20%	pair-4 9%	pair-7 4%	pair-8 pair-9 4% 4%		
Distance (D)	30cm 26%	25cm 24%	20cm 23%	10cm 14%	15cm 11%			
Angles (θ)	40 17%	-40 17%	-30 15%	30 14%	50 11%	-50 11%	-20 5%	20 5%
Size (S)	3inches 44%		4inches 33%		5inches 22%			

ภาพที่ 4-2 แสดงเปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จที่มีการสแกนติดแบบ 100 % ของ Dual Image QR Code สำหรับพารามิเตอร์รูปแบบต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

จากภาพที่ 4-2 แสดงผลอัตราความสำเร็จที่มีการสแกนติดแบบ 100% จากการทดลองในพารามิเตอร์แต่ละแบบทั้งหมด 6 พารามิเตอร์ พบว่าจากตัวอย่างในการทดลองทั้งหมด 24,000 รูปแบบ รูปแบบที่มีอัตราความสำเร็จในการสแกนติดแบบ 100% มีทั้งหมด 3,714 รูปแบบ หรือ มีการสแกนติดทั้งหมด 37,140 ครั้งจากการสแกนในรูปแบบทั้งหมดรูปแบบละ 10 ครั้ง โดยชุดรูปแบบที่มีอัตราความสำเร็จในการสแกนที่ดีที่สุดคือ รูปภาพคู่ในรูปแบบภาพพื้นหลังสีขาว (2-bit) และสีดำ (8-bit) มีการใช้ Error correction ในระดับสูง (H) และใช้ Version 4 โดยการสแกนในระยะห่าง 30 เซนติเมตร สแกนจากมุมมอง 30° ถึง 40° และ -40° ถึง -30° ตามลำดับ และ Dual Image QR Code มีขนาด 3 x 3 นิ้ว

4.1.2 ส่วนที่ 2 ผลลัพธ์ด้านการรับรู้ของผู้ใช้งาน

การทดลองนี้จะเป็นการทดลองการรับรู้ของผู้ใช้งาน ในด้านการรับรู้รูปภาพที่สื่อความหมายต่อข้อความภายใต้ Dual Image QR Code และเพื่อทดสอบว่าภาพในรูปแบบใดเป็นภาพที่เหมาะสมในการสร้าง Dual Image QR Code รวมทั้งเป็นข้อเสนอแนะในการเลือกใช้ภาพที่เหมาะสม โดยในการทดลองนี้จะกำหนดสถานการณ์ที่แตกต่างกัน 4 สถานการณ์ โดยจะมีผู้เข้าร่วมการทดลองทั้งหมด 13 คน ผลการทดลองจะเป็นดังรูปภาพที่ 4-3 และตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 แสดงผลการทดลองของผู้ใช้งาน

สถานการณ์	รูปภาพที่ผู้ใช้งานมองเห็น	ข้อความที่ผู้ใช้งานบอก	จำนวนคนที่ตอบ	จำนวนคนที่ตอบ (%)
สถานการณ์ที่ 1	ข้อสอบถาม	เมนูอาหาร	10	76.92
		ขออุปกรณ์ในการกิน	1	7.69
		ทางไปร้านอาหาร	2	15.38
	เค้ก	เมนูของหวาน	11	84.62
		ทางไปร้านขายเค้ก	3	23.08
สถานการณ์ที่ 2	กล้องวิดีโอ	ดูหนัง	7	53.85
		เว็บบูหนัง	1	7.69
		แนะนำหนังที่ชอบ	4	30.77
		ดาวน์โหลดแอปพลิเคชันดูหนัง	1	7.69
	โน้ตเพลง	ฟังเพลง	8	61.54
		ดูหนังแบบ Soundtrack	1	7.69
		แนะนำเพลงที่ชอบ	2	15.38
		ดาวน์โหลดแอปพลิเคชันฟังเพลง	1	7.69
สถานการณ์ที่ 3	แอนดรอยด์	ติดตั้งแอปพลิเคชันบนแอนดรอยด์	11	84.62
		ติดต่อคอลเซนเตอร์แอนดรอยด์	1	7.69
		ข้อมูลมือถือนี้หือแอนดรอยด์	1	7.69
	iOS	ติดตั้งแอปพลิเคชันบน iOS	11	84.62
		ติดต่อคอลเซนเตอร์ iOS	1	7.69
		ข้อมูลมือถือนี้หือ iOS	1	7.69
สถานการณ์ที่ 4	ไอคอนผู้ชาย	เลือกซื้อเสื้อผ้าผู้ชาย	11	84.62
		ทางไปห้องน้ำผู้ชาย	2	15.38
	ไอคอนผู้หญิง	เลือกซื้อเสื้อผ้าผู้หญิง	11	84.62
		ทางไปห้องน้ำผู้หญิง	2	15.38





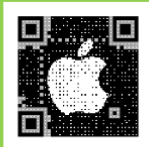
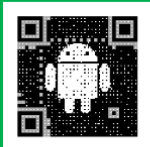


จากตารางพบว่าในสถานการณ์ที่ 1 เกี่ยวกับการใช้งานบนเมนูอาหารต่างๆในร้านอาหาร ผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่สามารถมองเห็นรูปภาพทางซ้ายเป็นรูป ข้อสอบถาม และผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่สามารถเดาข้อความที่ซ่อนอยู่ภายใต้ Dual Image QR Code คือ เมนูอาหาร จำนวน 10 คน คิดเป็น 76.92% ในรูปภาพทางด้านขวาเป็นรูป เค้ก และผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่สามารถเดาข้อความที่ซ่อนอยู่ภายใต้ Dual Image QR Code คือ เมนูของหวาน จำนวน 11 คน คิดเป็น 84.62%

ในสถานการณ์ที่ 2 ผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่สามารถมองเห็นรูปภาพทางซ้ายเป็นรูป ตัวโน้ต และผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่สามารถเดาข้อความที่ซ่อนอยู่ภายใต้ Dual Image QR Code คือ ฟังเพลง จำนวน 8

คน คิดเป็น 61.54% ในรูปภาพทางด้านขวาเป็นรูป กล้องวิดีโอ และผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่สามารถเดาข้อความที่ซ่อนอยู่ภายใต้ Dual Image QR Code คือ ดูหนัง จำนวน 7 คน คิดเป็น 53.85%

ในสถานการณ์ที่ 3 ผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่สามารถมองเห็นรูปภาพทางซ้ายเป็นรูป iOS และผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่สามารถเดาข้อความที่ซ่อนอยู่ภายใต้ Dual Image QR Code คือ ติดตั้งแอปพลิเคชันบน iOS จำนวน 11 คน คิดเป็น 84.62% ในรูปภาพทางด้านขวาเป็นรูป แอนดรอยด์ และผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่สามารถเดาข้อความที่ซ่อนอยู่ภายใต้ Dual Image QR Code คือ ติดตั้งแอปพลิเคชันบนแอนดรอยด์ จำนวน 11 คน คิดเป็น 84.62%

ในสถานการณ์ที่ 4 ผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่สามารถมองเห็นรูปภาพทางซ้ายเป็นรูป ไอคอนผู้หญิง และผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่สามารถเดาข้อความที่ซ่อนอยู่ภายใต้ Dual Image QR Code คือ เลือกซื้อเสื้อผ้าผู้หญิง จำนวน 11 คน คิดเป็น 84.62% ในรูปภาพทางด้านขวาเป็นรูปไอคอนผู้ชาย และผู้เข้าร่วมทดลองส่วนใหญ่สามารถเดาข้อความที่ซ่อนอยู่ภายใต้ Dual Image QR Code เลือกซื้อเสื้อผ้าผู้ชาย จำนวน 11 คน คิดเป็น 84.62%

Scenario-1 as a menu in the restaurant				Scenario-2 as an entertainment platform promotional flyer			
							
Food menu 76.92 %		Desert menu 84.62 %		Listen music 61.54 %		Watch movie 53.85 %	
Direct to restaurant 15.38 %	Cutlery 7.69 %	Direction to bakery shop 23.08 %		Music recommendation 15.38 %	Movie Soundtrack 7.69 %	Music download 7.69 %	Movie website 7.69 %
Scenario-3 as a mobile app advertisement card				Scenario-4 as an information signpost in a fashion shop			
							
Install iOS application 84.62 %		Install Android application 84.62 %		Shopping women clothes 84.62 %		Shopping men clothes 84.62 %	
Contact iOS call center 7.69 %	Apple phone 7.69 %	Contact Android call center 7.69 %	Android phone 7.69 %	Direction to women toilet 15.38 %		Direction to men toilet 15.38 %	

ภาพที่ 4-3 แสดงเปอร์เซ็นต์ของผลการทดลองผู้ใช้งาน

จากภาพที่ 4-3 แสดงเปอร์เซ็นต์ของผลการทดลองผู้ใช้งาน โดยผู้เข้าร่วมส่วนมากสามารถอธิบายภาพในสถานการณ์ที่ 1 ผู้เข้าร่วมการทดลองสามารถตอบคำถามว่าสแกนไปจะเจอกับข้อความอะไร ได้ถูกต้อง 80.77% สถานการณ์ที่ 2 ผู้เข้าร่วมการทดลองสามารถตอบคำถามว่าสแกนไปจะเจอกับข้อความอะไร ได้ถูกต้อง 57.69% สถานการณ์ที่ 3 พบว่า ผู้เข้าร่วมการทดลองสามารถตอบคำถามว่าสแกนไปจะเจอกับข้อความอะไร ได้ถูกต้อง 84.62% และสถานการณ์ที่ 4 พบว่า ผู้เข้าร่วมการทดลองสามารถตอบคำถามว่าสแกนไปจะเจอกับข้อความอะไร ได้ถูกต้อง 84.62% ได้อย่างถูกต้อง แต่ภาพโน้ตเพลงในสถานการณ์ที่ 2 ภาพโน้ตเพลงในสถานการณ์ที่ 2 นั้นมีรูปแบบการมองเห็นได้ที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งผู้เข้าร่วมการทดลองกว่า 15.39% พบว่ารูปภาพตัวโน้ต ในสถานการณ์ที่ 2 นั้นแทบจะมองไม่เห็นในกรณีของการทดลองด้านการบอกใบ้ภาพที่มองเห็นได้จากมุมมองต่างๆ จึงจะเห็นได้ว่าการเลือกใช้ภาพที่มีความเหมาะสม จะส่งผลต่อการรับรู้ของผู้ใช้งาน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปวิจัย ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะต่างๆเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา Dual Image QR Code ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อไปในอนาคต

5.1 บทสรุป

จากผลลัพธ์การทดลอง การกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อสร้าง Dual Image QR Code ส่งผลให้เห็นว่าการเลือกใช้พารามิเตอร์แบบต่างๆจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสแกนของ QR Code ซึ่งพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการสร้าง Dual Image QR Code ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสแกนที่ดีที่สุด ในการสร้าง Dual Image QR Code ขั้นตอนแรกเป็นการเลือกรูปภาพ ซึ่งในด้านรูปภาพคู่ที่ใช้ในงานวิจัย จะเห็นได้ว่า การเลือกรูปภาพในรูปแบบภาพที่มีพื้นหลังที่แตกต่างกันและมีลายละเอียดที่ไม่เยอะ (1-bit หรือ 8-bit พื้นหลังสีขาว รวมกับ 1-bit หรือ 8-bit พื้นหลังสีดำ) จะช่วยให้เมื่อนำไปสร้างเป็น Dual Image QR Code จะส่งผลให้ยังคงประสิทธิภาพในการสแกนไว้อยู่ ส่วนในด้านการเลือกใช้พารามิเตอร์ การเลือกใช้ Error Correction ในระดับสูง จะช่วยส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสแกนที่ดีกว่า การเลือกใช้ Error Correction ในระดับที่ต่ำ เพราะ เมื่อ Error correction มีระดับที่สูงขึ้น จะช่วยให้การทดแทนความเสียหายเมื่อโมดูลเกิดความเสียหายหรือโมดูลมีการขาดหายไปได้มากกว่า การใช้ Error correction ในระดับที่ต่ำกว่า และการเลือกใช้ Version ใน QR Code ควรเลือกใช้ Version ที่ระดับไม่สูงและไม่ต่ำจนเกินไป (Version 2 ถึง Version 4) เนื่องจาก QR Code ใน Version ที่ต่ำเกินไปเนื่องจาก QR Code Version ที่ต่ำจนเกินไป จะมีการเข้ารหัสข้อมูลมีจำนวนโมดูลที่น้อยส่งผลให้เมื่อมีข้อมูลขาดให้ Error Correction ไม่สามารถทดแทนส่วนที่เสียหายได้เพียงพอ ในกรณีเดียวกัน เมื่อ QR Code มี Version ที่สูงมากขึ้นจะส่งผลให้การเข้ารหัสข้อมูลมีจำนวนโมดูลที่มากขึ้น ส่งผลให้ขนาดของโมดูลมีขนาดที่เล็กลงส่งผลให้เมื่อทำการเข้าสู่กระบวนการผสมภาพด้วยเทคนิค Lenticular Image จะทำให้บางโมดูลอาจมีการสูญหายไปจนหมด ในส่วนของการสแกน

ในส่วนของการสแกน การกำหนดขนาดของ Dual Image QR Code ระยะห่างที่เหมาะสมในการสแกนคือ 25-30 เซนติเมตร จะเป็นระยะห่างที่เหมาะสมที่สุด Dual Image QR Code และ การสแกนที่มุมมอง 30° ถึง 40° และ -40° ถึง -30° ตามลำดับ เนื่องจากระยะห่างและมุมมองที่เหมาะสมจะช่วยส่งผลให้เห็นมุมมองของภาพที่เห็นจาก Dual Image QR Code ได้ชัดเจนที่สุดและสามารถสแกนได้ง่ายและรวดเร็วที่สุด

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการทดลองเกี่ยวกับผู้ใช้งาน โดยผลการทดลองเกี่ยวกับผู้ใช้งาน พบว่าผู้เข้าร่วมการทดลองสามารถตอบได้ว่ารูปภาพคู่ต่างๆที่ใช้ในการทดลองเป็นรูปภาพอะไรบ้าง โดยส่วนใหญ่ตอบได้ตรงกัน และผู้เข้าร่วมทดลองยังสามารถทายถึงข้อความที่ซ่อนอยู่ภายใต้ Dual Image QR Code ได้ตรงกันอีกด้วย แต่ก็ยังมีบางสถานการณ์ที่ผู้เข้าร่วมการทดลองไม่กล้ามารบอกรับได้ว่าภาพที่มองเห็นเป็นภาพอะไร เนื่องจากการเลือกรูปภาพที่ไม่เหมาะสมก็ส่งผลต่อการมองเห็นของผู้ใช้งาน ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ ขนาดของรูปภาพที่เลือกใช้มีขนาดที่ไม่เท่ากัน โดยในรูปภาพอาจมีการใช้รูปภาพที่มีขนาดของภาพที่มีขนาดเล็กพร้อมกับภาพที่

มีขนาดใหญ่ เมื่อนำไปเข้าสู่กระบวนการ Lenticular Image จะส่งผลให้ภาพที่มีขนาดเล็กโดนภาพที่มีขนาดใหญ่กว่าบดบังจนไม่สามารถรู้ได้ว่าภาพในอีกมุมมองคือภาพแบบไหน

การพัฒนาสำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นเป้าหมายในการพัฒนาการสร้าง Dual Image QR Code ให้สามารถแสดงผลได้โดยไม่ต้องใช้ Lenticular Lens และยังตั้งเป้าที่จะเพิ่มความจุของ Dual Image QR Code ด้วยการเพิ่มความจุของข้อความและเพิ่มจำนวนการใช้ภาพให้มากขึ้นอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- About iOS 11 updates.** (2019). Retrieved July 9, 2022, from [https://https://support.apple.com/enus/HT208067](https://support.apple.com/enus/HT208067).
- Arora, M. and Verma, A. K. (2018). Increase capacity of QR code using compression technique. In **2018 3rd International Conference and Workshops on Recent Advances and Innovations.** (pp. 1-5). India: IEEE.
- Brown, J. (2007). **Zbar bar code reader.** Retrieved July 9, 2022, from <http://zbar.sourceforge.net/>.
- Chen, C., Huang, W., Zhou, B., Liu, C. and Mow, W. H. (2016). Picode: A new picture-embedding 2d Barcode. **IEEE transactions on image processing, 25(8),** 3444–3458.
- Cox, R. (2012). **QArt Codes.** Retrieved July 9, 2022, from <https://research.swtch.com/qart>
- Garateguy, G. J., Arce, G. R., Lau, D. L. and Villarreal, O. P. (2014). Qr images:optimized image embedding in qr codes. **IEEE transactions on image processing, 23(7),** 2842–2853.
- Galiyawala, H. J. and Pandya, K. H. (2014, December). To increase data capacity of QR code using multiplexing with color coding: An example of embedding speech signal in QR code. In **2014 Annual IEEE India Conference (INDICON).** (pp. 1-6). India: IEEE.
- Hara, M. (1994). **DENSO WAVE qrcode.com.** Retrieved July 9, 2022, from <https://www.qrcode.com/en/index.html>.
- Hung, S.-H., Yao, C.-Y., Fang, Y.-J., Tan, P., Lee, R.-R., Sheffer, A. et al. (2019). Micrography qr codes. **IEEE transactions on visualization and computer graphics, 26(9),** 2834–2847.
- ISO/IEC 18004. (2006). **Information technology - Automatic identification and data capture techniques QR Code 2005 bar code symbology specification.** [n.p.].
- Liao, Y.-I., Wang, H.-C., Kuo, Y.-H. and Tsai, Y.-T. (2015). Lenticular display with infrared watermark by modified digital halftoning techniques. **Scientia Iranica, 22(6),** 2223–2228.
- QR code statistics 2022: Latest numbers and use-cases on global usage.** (2022). Retrieved July 9, 2022, from <https://www.qrcode-tiger.com/qr-code-statistics>
- David, R. E. (2003). History of Lenticular and Related Autostereoscopic Methods. **Leap Technologies, 16.**
- Sklar, B. (2001). **Reed-solomon codes.** Retrieved July 9, 2022, from <http://www.informit.com/content/images/art.sub.--sklar7.sub.--reed-solomon-elementLinks/art.sub.--sklar7.sub.--reed-solomon.pdf>, 1-33.

- Tkachenko, I., Puech, W., Destruel, C., Strauss, O., Gaudin, J.-M. and Guichard, C. (2015). Two-level qr code for private message sharing and document authentication. **IEEE Transactions on Information Forensics and Security**, **11**(3), 571–583.
- Yuan, T., Wang, Y., Xu, K., Martin, R. R. and Hu, S.-M. (2019). Two-layer qr codes. **IEEE Transactions on Image Processing**, **28**(9), 4413–4428.
- Žiljak, I., Vujić, P. J. Ž. and Pap, P. K. (2006). Flip flop and spatial (3d) graphics in lenticular technique. **Advances in Printing and Media Technology**, 1–9.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
แสดงภาพการทดลองเพิ่มเติม



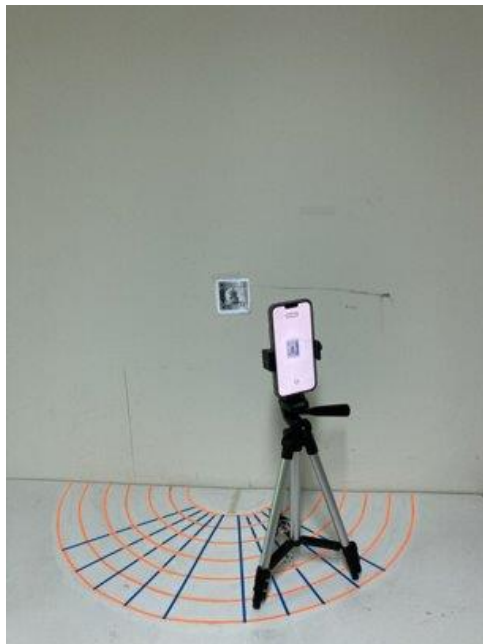
ภาพที่ ก-1 แสดงการทดลองสแกน Dual Image QR Code มุมมองด้านซ้าย



ภาพที่ ก-2 แสดงการทดลองสแกน Dual Image QR Code มุมมองด้านขวา



ภาพ ก-3 แสดงมุมมองการสแกน Dual Image QR Code ที่มีการปรับมุมมองและระยะห่าง



ภาพ ก-4 แสดงมุมมองการสแกน Dual Image QR Code ที่มีการปรับมุมมองและระยะห่าง - เพิ่มเติม



ภาพ ก-5 แสดงการสแกน Dual Image QR Code เมื่อสแกนสำเร็จ



ภาพ ก-6 แสดงมุมมอง Dual Image QR Code เมื่อมองจากมุมมองทางด้านขวา



ภาพ ก-7 แสดงมุมมอง Dual Image QR Code เมื่อมองจากมุมมองตรงกลาง



ภาพ ก-8 แสดงมุมมอง Dual Image QR Code เมื่อมองจากมุมมองด้านซ้าย



ภาพ ก-9 แสดงการทดลองของผู้ทำการทดลอง

ภาคผนวก ข

แสดงตาราง INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC 18004 เพิ่มเติม

ตาราง ข-1 Data capacity of all versions of QR Code

Version	No.of Modules/side (A)	Function pattern modules (B)	Format and Version Information modules (C)	Data modules except (C) ($D = A^2 - B - C$)	Data capacity [codewords]* (E)	Remainder Bits
1	21	202	31	208	26	0
2	25	235	31	389	44	7
3	29	243	31	567	70	7
4	33	251	31	807	100	7
5	37	259	31	1079	134	7
6	41	267	31	1383	172	7
7	45	390	67	1568	196	0
8	49	398	67	1936	242	0
9	53	406	67	2336	292	0
10	57	414	67	2768	346	0
11	61	422	67	3232	404	0
12	65	240	67	3728	466	0
13	69	438	67	4256	532	0
14	73	611	67	4651	581	3
15	77	619	67	5243	655	3
16	81	627	67	5867	733	3
17	85	635	67	6523	815	3
18	89	643	67	7211	901	3

ตาราง ข-1 Data capacity of all versions of QR Code (ต่อ)

Version	No.of Modules/side (A)	Function pattern modules (B)	Format and Version Information modules (C)	Data modules except (C) ($D = A^2 - B - C$)	Data capacity [codewords]* (E)	Remainder Bits
19	93	651	67	7931	991	3
20	97	659	67	8683	1082	3
21	101	882	67	9252	1156	4
22	105	890	67	10068	1258	4
23	109	898	67	11796	1364	4
24	113	906	67	12708	1474	4
25	117	914	67	13652	1588	4
26	121	922	67	14628	1706	4
27	125	930	67	15371	1828	4
28	129	1203	67	16411	1921	3
29	133	1211	67	17483	2051	3
30	137	1219	67	18587	2185	3
31	141	1227	67	19723	2323	3
32	145	1235	67	20891	2465	3
33	149	1243	67	22091	2611	3
34	153	1251	67	23008	2761	3
35	157	1574	67	24272	2876	0
36	161	1582	67	25568	3034	0
37	165	1590	67	26896	3196	0
38	169	1598	67	28256	3362	0
39	173	1606	67	28256	3532	0
40	177	1614	67	29648	3706	0
* All codewords shall be 8 bits in length.						

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*
M1	5	Error detection only	2	1	(5,3,0)
M2	10	L	7	1	(10,5,1)
		M	10	1	(10,4,2)
M3	17	L	6	1	(17,11,2)
		M	8		(17,9,4)
M4	24	L	8	1	(24,16,3)
		M	10	1	(24,14,5)
		Q	14	1	(24,10,7)
1	26	L	7	1	(26,19,2)
		M	10	1	(26,16,4)
		Q	13	1	(26,13,6)
		H	17	1	(26,9,8)
2	44	L	10	1	(44,34,4)
		M	16	1	(44,28,8)
		Q	22	1	(44,22,11)
		H	28	1	(44,16,14)

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 (ต่อ)

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*
3	70	L	15	1	(70,55,7)
		M	26	1	(70,44,13)
		Q	36	2	(35,17,9)
		H	44	2	(35,13,11)
4	100	L	20	1	(100,80,10)
		M	36	2	(50,32,9)
		Q	52	2	(50,24,13)
		H	64	4	(25,9,8)
5	134	L	26	1	(134,108,13)
		M	48	2	(67,43,12)
		Q	72	2	(33,15,9)
				2	(34,16,9)
				2	(33,11,11)
H	88	2	(34,12,11)		
6	172	L	36	2	(86,68,9)
		M	64	4	(43,27,8)
		Q	96	4	(43,19,12)
		H	112	4	(43,15,14)
7	196	L	40	2	(98,78,10)
		M	72	4	(49,31,9)
		Q	108	2	(32,14,9)
				4	(33,15,9)
				4	(39,13,13)
H	130	1	(40,14,13)		

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 (ต่อ)

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*
8	242	L	48	2	(121,97,12)
		M	88	2	(60,38,11)
		Q	132	2	(61,39,11)
				4	(40,18,11)
		H	156	2	(41,19,11)
4	(40,14,13)				
9	292	L	60	2	(146,116,15)
		M	110	3	(58,36,11)
		Q	160	2	(59,37,11)
				4	(36,16,10)
		H	192	4	(37,17,10)
4	(36,12,12)				
10	346	L	72	2	(86,68,9)
		2		(87,69,9)	
		M	130	4	(69,43,13)
		Q	192	1	(70,44,13)
				6	(43,19,12)
		H	224	2	(44,20,12)
6	(343,15,14)				
2	(44,16,14)				

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 (ต่อ)

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*
11	404	L	80	4	(101,81,10)
		M	150	1	(80,50,15)
		Q	224	4	(81,51,15)
				4	(50,22,14)
				4	(51,23,14)
H	264	3	(36,12,12)		
8	(37,13,12)				
12	466	L	96	2	(116,92,12)
				2	(117,93,12)
		M	176	6	(58,36,11)
				2	(59,37,11)
				4	(46,20,13)
Q	260	6	(47,21,13)		
		7	(42,14,14)		
H	308	4	(43,15,14)		
13	532	L	104	4	(133,107,13)
				8	(59,37,11)
		M	198	1	(60,38,11)
				8	(44,20,12)
				4	(45,21,12)
Q	288	12	(33,11,11)		
		4	(34,12,11)		

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 (ต่อ)

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*	
14	581	L	120	3	(145,115,15)	
				1	(146,116,15)	
		M	216	4	(64,40,12)	
				5	(65,41,12)	
		Q		11	(36,16,10)	
H	384		5	(37,17,10)		
			11	(36,12,12)		
			5	(37,13,12)		
15	655	L	132	5	(109,87,11)	
				1	(110,88,11)	
		M	240	5	(65,41,42)	
				5	(66,42,12)	
		Q		5	(54,24,15)	
		H	432		7	(55,25,15)
					11	(36,12,12)
			7	(37,13,12)		
16	733	L	144	5	(122,98,12)	
				1	(123,99,12)	
		M	280	7	(73,45,14)	
				3	(74,46,14)	
		Q		15	(43,19,12)	
		H	480		2	(44,20,12)
					3	(45,15,15)
			13	(46,16,15)		

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 (ต่อ)

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*
17	815	L	168	1	(135,107,14)
				5	(136,108,14)
		M	308	10	(74,46,14)
				1	(75,47,14)
				1	(50,22,14)
H	532	15	(51,23,14)		
		2	(42,14,14)		
17	17	(43,15,14)			
18	901	L	180	5	(150,20,15)
				1	(151,121,15)
		M	338	9	(69,43,13)
				4	(70,44,13)
				17	(50,22,14)
H	588	1	(51,23,14)		
		2	(42,14,14)		
18	19	(43,15,14)			
19	991	L	196	3	(141,113,14)
				4	(142,114,14)
		M	364	3	(70,44,13)
				11	(71,45,13)
				17	(47,21,13)
H	650	4	(48,22,13)		
		9	(39,13,13)		
19	16	(40,14,13)			

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 (ต่อ)

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*
20	1085	L	224	3	(135,107,14)
				5	(136,108,14)
		M	416	3	(67,41,13)
				13	(68,42,16)
		Q	600	15	(54,24,15)
				5	(55,25,15)
H	700	15	(43,15,14)		
10	(44,16,14)				
21	1156	L	224	4	(144,116,14)
				4	(145,117,14)
		M	442	17	(68,42,13)
				17	(50,22,14)
		Q	644	6	(51,23,14)
				19	(46,16,15)
H	750	6	(47,17,15)		
22	1156	L	252	2	(139,111,14)
				7	(140,112,14)
		M	476	17	(74,46,14)
				7	(54,24,15)
		Q	690	16	(55,25,15)
				34	(37,13,12)
H	816				

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 (ต่อ)

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*
23	1364	L	270	4	(151,121,15)
				5	(152,122,15)
		M	504	4	(75,47,14)
				14	(76,48,14)
		Q	750	11	(54,24,15)
				14	(55,25,15)
H	900	16	(45,15,15)		
14	(46,16,15)				
24	1474	L	300	6	(147,117,15)
				4	(148,118,15)
		M	560	6	(73,45,14)
				14	(74,46,14)
		Q	810	11	(54,24,15)
				16	(55,25,15)
H	960	30	(46,16,15)		
2	(47,17,15)				
25	1588	L	312	8	(132,106,13)
				4	(133,107,13)
		M	588	8	(75,47,14)
				13	(76,48,14)
		Q	870	7	(54,24,15)
				22	(55,25,15)
H	1050	22	(45,15,15)		
13	(46,15,15)				

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 (ต่อ)

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*
26	1706	L	336	10	(142,114,14)
				2	(143,115,14)
		M	644	19	(74,47,14)
				4	(75,47,14)
		Q	952	28	(50,22,14)
				6	(51,23,14)
H	1110	33	(46,16,15)		
			4	(47,17,15)	
27	1828	L	360	8	(152,122,15)
				4	(153,123,15)
		M	700	22	(73,45,14)
				3	(74,46,14)
		Q	1020	8	(53,23,15)
				26	(54,24,15)
H	1200	12	(45,15,15)		
			28	(46,16,15)	
28	1921	L	390	3	(147,46,14)
				10	(148,118,15)
		M	728	3	(73,45,14)
				23	(74,46,14)
		Q	1050	4	(54,24,15)
				31	(55,25,15)
H	1260	11	(45,15,15)		
			31	(46,16,15)	

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 (ต่อ)

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*
29	2051	L	420	7	(146,116,15)
				7	(147,117,15)
		M	784	21	(73,45,14)
				7	(74,46,14)
		Q	1140	1	(53,23,15)
				37	(54,24,15)
H	1350	19	(45,15,15)		
26	(46,16,15)				
30	2185	L	450	5	(145,115,15)
				10	(146,116,15)
		M	812	19	(75,47,14)
				10	(76,48,14)
		Q	1200	15	(54,24,15)
				25	(55,25,15)
H	1440	23	(45,15,15)		
25	(46,16,15)				
31	2323	L	480	13	(145,115,15)
				3	(146,116,15)
		M	868	2	(74,46,14)
				29	(75,47,14)
		Q	1290	42	(54,24,15)
				1	(55,25,15)
H	1530	23	(45,15,15)		
28	(46,16,15)				

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 (ต่อ)

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*
32	2465	L	510	17	(145,115,15)
		M	942	10	(74,46,14)
				23	(75,47,14)
		Q	1350	10	(54,24,15)
				35	(55,25,15)
		H	1620	19	(45,15,15)
35	(46,16,15)				
33	2611	L	540	17	(145,115,15)
				1	(146,116,15)
		M	980	14	(74,46,14)
				21	(75,47,14)
		Q	1440	29	(54,24,15)
				19	(55,25,15)
H	1710	11	(45,15,15)		
		46	(46,16,15)		
34	2761	L	570	13	(145,115,15)
				6	(146,116,15)
		M	1036	14	(74,46,14)
				23	(75,47,14)
		Q	1530	44	(54,24,15)
				7	(55,25,15)
H	1800	59	(46,16,15)		
		1	(47,17,15)		

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 (ต่อ)

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*
35	2876	L	570	12	(151,121,15)
				7	(152,122,15)
		M	1064	12	(75,47,14)
				26	(76,48,14)
				39	(54,24,15)
H	1890	14	(55,25,15)		
		22	(45,15,15)		
36	3034	L	600	41	(46,16,15)
				6	(151,121,15)
		M	1120	14	(152,122,15)
				6	(75,47,14)
				34	(76,48,14)
H	1980	46	(54,24,15)		
		10	(55,25,15)		
37	3196	L	630	2	(45,15,15)
				64	(46,16,15)
		M	1024	17	(152,122,15)
				4	(153,123,15)
				29	(74,46,14)
H	2100	14	(75,47,14)		
		49	(54,24,15)		
				10	(55,25,15)
				24	(45,15,15)
				46	(46,16,15)

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 (ต่อ)

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c,k,r)*
38	3362	L	660	4	(152,122,15)
				18	(153,123,15)
		M	1260	13	(74,46,14)
				32	(75,47,14)
		Q	1860	48	(54,24,15)
				14	(55,25,15)
H	2220	42	(45,15,15)		
			32	(46,16,15)	
39	3532	L	720	20	(147,117,15)
				4	(148,118,15)
		M	1316	40	(75,47,14)
				7	(76,48,14)
		Q	1950	43	(54,24,15)
				22	(55,25,15)
H	2310	10	(45,15,15)		
			67	(46,16,15)	
40	3706	L	750	19	(148,118,15)
				6	(149,119,15)
		M	1372	18	(75,47,14)
				31	(76,48,14)
		Q	2040	34	(54,24,15)
				34	(55,25,15)
H	2430	20	(45,15,15)		
			61	(46,16,15)	

* c = total number of codewords, k = number of data codewords, r = error correction capacity

ตาราง ข-3 Number of symbol characters and input data capacity for versions 1 to 40

Version	Error correction level	Number of data codewords*	Number of data bits**	Data capacity			
				Numeric	Alphanumeric	8-bit byte	Kanji
1	L	19	152	41	25	17	10
	M	16	128	34	20	14	8
	Q	13	104	27	16	11	7
	H	9	72	17	10	7	4
2	L	34	272	77	47	32	20
	M	28	224	63	38	26	16
	Q	22	176	48	29	20	12
	H	16	128	34	20	14	8
3	L	55	440	127	77	53	32
	M	44	352	101	61	42	26
	Q	34	272	77	47	32	20
	H	26	208	58	35	24	15
4	L	80	640	187	114	78	48
	M	64	512	149	90	62	38
	Q	48	384	111	67	46	28
	H	36	288	82	50	34	21
5	L	108	864	255	154	106	65
	M	86	688	202	122	84	52
	Q	62	496	144	87	60	37
	H	46	368	106	64	44	27
6	L	136	1088	322	195	134	82
	M	108	864	255	154	106	65
	Q	76	608	178	108	74	45
	H	60	480	139	84	58	36
7	L	156	1248	370	224	154	95
	M	124	992	293	178	122	75
	Q	88	704	207	125	86	53
	H	66	528	154	93	64	39

ตาราง ข-3 Number of symbol characters and input data capacity for versions 1 to 40 (ต่อ)

Version	Error correction level	Number of data codewords*	Number of data bits**	Data capacity			
				Numeric	Alphanumeric	8-bit byte	Kanji
8	L	194	1552	461	279	192	118
	M	154	1232	365	221	152	93
	Q	110	880	259	157	108	66
	H	86	688	202	122	84	52
9	L	232	1856	552	335	230	141
	M	182	1456	432	262	180	111
	Q	132	1056	312	189	130	80
	H	100	800	235	143	98	60
10	L	274	2192	652	395	271	167
	M	216	1728	513	311	213	131
	Q	154	1232	364	221	151	93
	H	122	976	288	174	119	74
11	L	324	2592	772	468	321	198
	M	254	2032	604	366	251	155
	Q	180	1440	427	259	177	109
	H	140	1120	331	200	137	85
12	L	370	2960	883	535	367	226
	M	290	2320	691	419	287	177
	Q	206	1648	489	296	203	125
	H	158	1264	374	227	155	96
13	L	428	3424	1022	619	425	262
	M	334	2672	796	483	331	204
	Q	244	1952	580	352	241	149
	H	180	1440	427	259	177	109
14	L	461	3688	1101	667	458	282
	M	365	2920	871	528	362	223
	Q	261	2088	621	376	258	159
	H	197	1576	468	283	194	120

ตาราง ข-3 Number of symbol characters and input data capacity for versions 1 to 40 (ต่อ)

Version	Error correction level	Number of data codewords*r	Number of data bits**	Data capacity			
				Numeric	Alphanumeric	8-bit byte	Kanji
15	L	523	4184	1250	758	520	320
	M	415	3320	991	600	412	254
	Q	295	2360	703	426	292	180
	H	223	1784	530	321	220	136
16	L	589	4712	1408	854	586	361
	M	453	3624	1082	656	450	277
	Q	325	2600	775	470	322	198
	H	253	2024	602	365	250	154
17	L	647	5176	1548	938	644	397
	M	507	4056	1212	734	504	310
	Q	367	2936	876	531	364	224
	H	283	2264	408	408	280	173
18	L	721	5768	1725	1046	718	442
	M	563	4504	1346	816	560	345
	Q	397	3176	948	574	394	246
	H	313	2504	746	452	310	191
19	L	795	6360	1903	1153	792	488
	M	627	5016	1500	909	624	348
	Q	445	3560	1063	644	442	272
	H	341	2728	813	493	338	208
20	L	861	688	2061	1249	858	528
	M	669	5352	1600	970	666	410
	Q	485	3088	1159	702	482	297
	H	385	3080	919	557	382	235
21	L	932	7456	2232	1352	929	572
	M	714	5712	1708	1035	711	438
	Q	512	4096	1224	742	509	314
	H	406	3248	969	587	403	248

ตาราง ข-3 Number of symbol characters and input data capacity for versions 1 to 40 (ต่อ)

Version	Error correction level	Number of data codewords*r	Number of data bits**	Data capacity			
				Numeric	Alphanumeric	8-bit byte	Kanji
22	L	1006	8048	2409	1460	1003	618
	M	782	6256	1872	1134	779	480
	Q	568	4544	1358	823	565	348
	H	442	3536	1056	640	439	270
23	L	1094	8752	2620	1588	1091	672
	M	860	6880	2059	1248	857	528
	Q	614	4912	1468	890	611	376
	H	464	3712	1108	672	461	284
24	L	1174	9392	2812	1704	1171	721
	M	914	7312	2188	1326	911	561
	Q	664	5312	1588	963	661	407
	H	514	4112	1228	744	511	315
25	L	1276	10208	3057	1853	1273	784
	M	1000	8000	2395	1451	997	614
	Q	718	5744	1718	1041	715	440
	H	538	4304	1286	779	535	330
26	L	1370	10960	3283	1990	1367	842
	M	1062	8496	2544	1542	1059	652
	Q	754	6032	1804	1094	751	462
	H	596	4768	1425	864	593	365
27	L	1468	11744	3517	2132	1465	902
	M	1128	9024	2701	1637	1125	692
	Q	808	6464	1933	1172	805	496
	H	628	5024	1501	910	625	385
28	L	1531	12248	3669	2223	1528	940
	M	1193	9544	2857	1732	1190	732
	Q	871	6968	2085	1263	868	534
	H	661	5288	1581	958	658	405

ตาราง ข-3 Number of symbol characters and input data capacity for versions 1 to 40 (ต่อ)

Version	Error correction level	Number of data codewords*r	Number of data bits**	Data capacity			
				Numeric	Alphanumeric	8-bit byte	Kanji
29	L	1631	13048	3909	2369	1628	1002
	M	1267	10136	3035	1839	1264	778
	Q	911	7288	2181	1322	908	559
	H	701	5608	1677	1016	698	430
30	L	1735	13880	4158	2520	1732	1066
	M	1373	10984	3289	1994	1370	843
	Q	985	7880	2358	1429	982	604
	H	745	5960	1782	1080	742	457
31	L	1843	14744	4417	2677	1840	1132
	M	1455	11640	3486	2113	1452	894
	Q	1033	8264	2473	1499	1030	634
	H	793	6344	1897	1150	790	486
32	L	1955	15640	4686	2840	1952	1201
	M	1541	12328	3693	2238	1538	947
	Q	1115	8920	2670	1618	1112	684
	H	845	6760	2022	1226	842	518
33	L	2071	16568	4965	3009	2068	1273
	M	1631	13048	3909	2369	1628	1002
	Q	1171	9368	2805	1700	1168	719
	H	901	7208	2157	1307	898	553
34	L	2191	17528	5253	3183	2188	1347
	M	1725	13800	4134	2506	1722	1060
	Q	1231	9848	2949	1787	1228	756
	H	961	7688	2301	1394	958	590
35	L	2306	18448	5529	3351	2303	1417
	M	1812	14496	4343	2632	1809	1113
	Q	1286	10288	3081	1867	1283	790
	H	986	7888	2361	1431	983	605

ตาราง ข-3 Number of symbol characters and input data capacity for versions 1 to 40 (ต่อ)

Version	Error correction level	Number of data codewords*r	Number of data bits**	Data capacity			
				Numeric	Alphanumeric	8-bit byte	Kanji
36	L	2434	19472	5836	3537	2431	1496
	M	1914	15312	4588	2780	1911	1176
	Q	1354	10832	3244	1966	1351	832
	H	1054	8432	2524	1530	1051	647
37	L	2566	20528	6153	3729	2563	1577
	M	1992	15936	4775	2894	1989	1224
	Q	1426	11408	3 417	2071	1423	876
	H	1096	8768	2 625	1591	1093	673
38	L	2702	21616	6479	3927	2699	1661
	M	2102	16816	5039	3054	2099	1292
	Q	1502	12016	3599	2181	1499	923
	H	1142	9136	2735	1658	1139	701
39	L	2812	22496	6743	4087	2809	1729
	M	2216	17728	5313	3220	2213	1362
	Q	1582	12656	3791	2298	1579	972
	H	1222	9776	2927	1774	1219	750
40	L	2956	23648	7089	4296	2953	1817
	M	2334	18672	5596	3391	2331	1435
	Q	1666	13328	3993	2420	1663	1024
	H	1276	10208	3057	1852	1273	784

* All codewords shall be 8 bits in length.

** The number of Data Bits includes bits for Mode Indicator and Character Count Indicator.

ตาราง ข-4 Encoding/decoding table for JIS8 character set

Char.	Hex	Char.	Hex	Char.	Hex	Char.	Hex	Char.	Hex	Char.	Hex	Char.	Hex	Char.	Hex
NUL	00	SP	20	@	40	`	60		80		A0	タ	C0		E0
SOH	01	!	21	A	41	a	61		81	。	A1	チ	C1		E1
STX	02	"	22	B	42	b	62		82	「	A2	ツ	C2		E2
ETX	03	#	23	C	43	c	63		83	」	A3	テ	C3		E3
EOT	04	\$	24	D	44	d	64		84	、	A4	ト	C4		E4
ENQ	05	%	25	E	45	e	65		85	・	A5	ナ	C5		E5
ACK	06	&	26	F	46	f	66		86	ヲ	A6	ニ	C6		E6
BEL	07	'	27	G	47	g	67		87	ア	A7	ヌ	C7		E7
BS	08	(	28	H	48	h	68		88	イ	A8	ネ	C8		E8
HT	09	)	29	I	49	i	69		89	ウ	A9	ノ	C9		E9
LF	0A	*	2A	J	4A	j	6A		8A	エ	AA	ハ	CA		EA
VT	0B	+	2B	K	4B	k	6B		8B	オ	AB	ヒ	CB		EB
FF	0C	,	2C	L	4C	l	6C		8C	ヤ	AC	フ	CC		EC
CR	0D	-	2D	M	4D	m	6D		8D	ユ	AD	ヘ	CD		ED
SO	0E	.	2E	N	4E	n	6E		8E	ヨ	AE	ホ	CE		EE
SI	0F	/	2F	O	4F	o	6F		8F	ツ	AF	マ	CF		EF
DLE	10	0	30	P	50	p	70		90	ー	B0	ミ	D0		F0
DC1	11	1	31	Q	51	q	71		91	ア	B1	ム	D1		F1
DC2	12	2	32	R	52	r	72		92	イ	B2	メ	D2		F2
DC3	13	3	33	S	53	s	73		93	ウ	B3	モ	D3		F3
DC4	14	4	34	T	54	t	74		94	エ	B4	ヤ	D4		F4
NAK	15	5	35	U	55	u	75		95	オ	B5	ユ	D5		F5
SYN	16	6	36	V	56	v	76		96	カ	B6	ヨ	D6		F6
ETB	17	7	37	W	57	w	77		97	キ	B7	ラ	D7		F7
CAN	18	8	38	X	58	x	78		98	ク	B8	リ	D8		F8
EM	19	9	39	Y	59	y	79		99	ケ	B9	ル	D9		F9
SUB	1A	:	3A	Z	5A	z	7A		9A	コ	BA	レ	DA		FA
ESC	1B	;	3B	[	5B	{	7B		9B	コ	BB	ロ	DB		FB
FS	1C	<	3C	¥	5C	|	7C		9C	シ	BC	ワ	DC		FC
GS	1D	=	3D	]	5D	}	7D		9D	ス	BD	ン	DD		FD
RS	1E	>	3E	^	5E	~	7E		9E	セ	BE	。	DE		FE
US	1F	?	3F	_	5F	DEL	7F		9F	ソ	BF	。	DF		FF

ตาราง ข-5 ตารางการแปลงค่าพหุนาม

Exponent of α	Integer	Integer	Exponent of α
0	1		
1	2	1	0
2	4	2	1
3	8	3	25
4	16	4	2
5	32	5	50
6	64	6	26
7	128	7	198
8	29	8	3
9	58	9	223
10	16	10	51
11	232	11	238
12	205	12	27
13	135	13	104
14	19	14	199
15	38	15	75
16	76	16	4
17	152	17	100
18	45	18	224
19	90	19	14
20	180	20	52
21	17	21	141
22	234	22	239
23	201	23	129
24	143	24	28
25	3	25	193
26	6	26	105
27	12	27	248

ตาราง ข-5 ตารางการแปลงค่าพหุนาม (ต่อ)

Exponent of α	Integer	Integer	Exponent of α
28	24	28	200
29	48	29	8
30	96	30	76
31	192	31	113
32	157	32	5
33	39	33	138
34	78	34	101
35	156	35	47
36	37	36	225
37	74	37	36
38	148	38	15
39	53	39	33
40	106	40	53
41	212	41	147
42	181	42	142
43	119	43	218
44	238	44	240
45	193	45	18
46	159	46	130
47	35	47	69
48	70	48	29
49	140	49	181
50	5	50	194
51	10	51	125
52	20	52	106
53	40	53	39
54	80	54	249
55	160	55	185
56	93	56	201

ตาราง ข-5 ตารางการแปลงค่าพหุนาม (ต่อ)

Exponent of α	Integer	Integer	Exponent of α
57	186	57	154
58	105	58	9
59	210	59	120
60	185	60	77
61	111	61	228
62	222	62	114
63	161	63	166
64	95	64	6
65	190	65	191
66	97	66	139
67	194	67	98
68	153	68	102
69	47	69	221
70	94	70	48
71	188	71	253
72	101	72	226
73	202	73	152
74	137	74	37
75	15	75	179
76	30	76	16
77	60	77	145
78	120	78	34
79	240	79	136
80	253	80	54
81	231	81	208
82	211	82	148
83	187	83	206
84	107	84	143
85	214	85	150

ตาราง ข-5 ตารางการแปลงค่าพหุนาม (ต่อ)

Exponent of α	Integer	Integer	Exponent of α
86	177	86	219
87	127	87	189
88	254	88	541
89	225	89	210
90	223	90	19
91	163	91	92
92	91	92	131
93	182	93	56
94	113	94	70
95	226	95	64
96	217	96	30
97	175	97	66
98	67	98	182
99	134	99	163
100	17	100	195
101	34	101	72
102	68	102	126
103	136	103	110
104	13	104	107
105	26	105	58
106	52	106	40
107	104	107	84
108	208	108	250
109	189	109	133
110	103	110	186
111	206	111	61
112	129	112	202
113	31	113	94
114	62	114	155

ตาราง ข-5 ตารางการแปลงค่าพหุนาม (ต่อ)

Exponent of α	Integer	Integer	Exponent of α
115	124	115	159
116	248	116	10
117	237	117	21
118	199	118	121
119	147	119	43
120	59	120	78
121	118	121	212
122	236	122	229
123	197	123	172
124	151	124	115
125	51	125	243
126	102	126	167
127	204	127	87
128	133	128	7
129	23	129	112
130	46	130	192
131	92	131	247
132	184	132	140
133	109	133	128
134	218	134	99
135	169	135	13
136	79	136	103
137	158	137	74
138	33	138	222
139	66	139	237
140	132	140	49
141	21	141	197
142	42	142	254
143	84	143	24

ตาราง ข-5 ตารางการแปลงค่าพหุนาม (ต่อ)

Exponent of α	Integer	Integer	Exponent of α
144	168	144	227
145	77	145	165
146	154	146	153
147	41	147	119
148	82	148	38
149	164	149	184
150	85	150	180
151	170	151	124
152	73	152	17
153	146	153	68
154	57	154	146
155	114	155	217
156	228	156	35
157	213	157	32
158	183	158	137
159	115	159	46
160	230	160	55
161	209	161	63
162	191	162	209
163	99	163	91
164	198	164	149
165	145	165	188
166	63	166	207
167	126	167	205
168	252	168	144
169	229	169	135
170	215	170	151
171	179	171	178
172	123	172	220

ตาราง ข-5 ตารางการแปลงค่าพหุนาม (ต่อ)

Exponent of α	Integer	Integer	Exponent of α
173	246	173	252
174	241	174	190
175	255	175	97
176	227	176	242
177	219	177	86
178	171	178	211
179	75	179	171
180	150	180	20
181	49	181	42
182	98	182	93
183	196	183	158
184	149	184	132
185	55	185	60
186	110	186	57
187	220	187	83
188	165	188	71
189	87	189	109
190	174	190	65
191	65	191	162
192	130	192	31
193	25	193	45
194	50	194	67
195	100	195	216
196	200	196	183
197	141	197	123
198	7	198	164
199	14	199	118
200	28	200	196
201	56	201	23

ตาราง ข-5 ตารางการแปลงค่าพหุนาม (ต่อ)

Exponent of α	Integer	Integer	Exponent of α
202	112	202	73
203	224	203	236
204	221	204	127
205	167	205	12
206	83	206	111
207	166	207	246
208	81	208	108
209	162	209	161
210	89	210	59
211	178	211	82
212	121	212	41
213	142	213	157
214	149	214	85
215	239	215	170
216	195	216	251
217	155	217	96
218	43	218	134
219	86	219	177
220	172	220	187
221	69	221	204
222	138	222	62
223	9	223	90
224	18	224	203
225	36	225	89
226	72	226	95
227	144	227	176
228	61	228	156
229	122	229	169
230	244	230	160

ตาราง ข-5 ตารางการแปลงค่าพหุนาม (ต่อ)

Exponent of α	Integer	Integer	Exponent of α
231	245	231	81
232	247	232	11
233	243	233	245
234	251	234	22
235	235	235	235
236	203	236	122
237	139	237	117
238	11	238	44
239	22	239	215
240	44	240	79
241	88	241	174
242	176	242	213
243	125	243	233
244	250	244	230
245	233	245	231
246	207	246	173
247	131	247	232
248	27	248	116
249	54	249	214
250	108	250	244
251	216	251	234
252	173	252	168
253	71	253	80
254	142	254	88
255	1	255	175

ประวัติผู้เขียน

นายชาคริต คำมะสอน เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤศจิกายน พ.ศ. 2539 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาสารสนเทศสถิติ จากคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2562 เข้าศึกษาบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปีการศึกษา 2562