

การถอดรหัสภาพบาร์โค้ดบนพื้นผิวมิติรูป



นายปุณณะ ยศปัญญา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

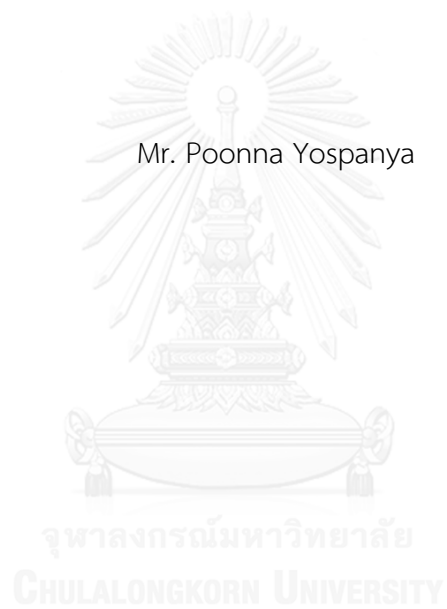
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Decoding Barcode Images on Deformed Surfaces

Mr. Poonna Yospanya



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Computer Science

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การถอดรหัสภาพบาร์โค้ดบนพื้นผิวผิวดรูป

โดย

นายปุณณะ ยศปัญญา

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ญาใจ ลิมปิยะภรณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. บุญเสริม กิจศิริกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ญาใจ ลิมปิยะภรณ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร. ภาสกร อภิรักษ์วรพินิต)

ปुณณะ ยศปัญญา : การถอดรหัสภาพบาร์โค้ดบนพื้นผิวผิดรูป (Decoding Barcode Images on Deformed Surfaces) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ญาใจ ลีมีปิยะกรณ, 47 หน้า.

การถอดรหัสบาร์โค้ดจากภาพเป็นประเด็นวิจัยที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง แนวทางที่งานวิจัยส่วนใหญ่นำเสนอจะอยู่บนพื้นฐานการกำหนดเส้นกราดตรวจที่ตัดผ่านบาร์โค้ดในภาพ แล้วถอดรหัสจากค่าระดับความเข้มที่อ่านได้ตามแนวเส้นกราดตรวจ วิธีการดังกล่าวอาจไม่มีประสิทธิภาพเมื่อใช้กับภาพบาร์โค้ดที่ผิดรูปอย่างมาก เนื่องจากบาร์โค้ดลักษณะนั้นมักประสบปัญหาการถอดรหัสซึ่งเกิดจากความผิดเพี้ยนของมุมมอง แสงสะท้อน หรือเงาจากความผิดรูปของพื้นผิว เห็นได้ว่าการหาเส้นกราดตรวจผ่านบาร์โค้ดดังกล่าวโดยไม่ตัดผ่านบริเวณที่มีปัญหาเลยเป็นสิ่งที่กระทำได้ยากและเป็นไปไม่ได้ในบางกรณี วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอแนวทางใหม่โดยใช้วิถีกราดตรวจที่ไม่เป็นเส้นตรงเพื่อให้สามารถอ่านค่าระดับความเข้มโดยเลี่ยงบริเวณที่มีปัญหาได้ ในการหาวิถีกราดตรวจนี้ ค่าส่วนเบี่ยงเบนทิศทางการวางตัวฐานนิยมถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อใช้วัดความเป็นทิศทางเดียวกันของการวางตัวของบริเวณต่าง ๆ ในภาพบาร์โค้ด และเป็นข้อมูลในการสร้างวิถีกราดตรวจที่มีคุณภาพ ค่าระดับความเข้มที่อ่านได้จากวิถีกราดตรวจจะถูกนำไปจับคู่กับแม่แบบพลวัตในลำดับขั้นตอนถัดไปของการถอดรหัสผลลัพธ์ ประสิทธิภาพของวิธีการที่เสนอได้ถูกอภิปราย ทั้งนี้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่นำเสนอสามารถถอดรหัสภาพบาร์โค้ดผิดรูปสูงที่เลือกมาเป็นกรณีทดสอบได้อย่างถูกต้อง



ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5571022321 : MAJOR COMPUTER SCIENCE

KEYWORDS: IMAGE PROCESSING / BARCODE / DEFORMED SURFACE / SCANPATH /  
MODAL ORIENTATION DEVIATION

POONNA YOSPANYA: Decoding Barcode Images on Deformed Surfaces.

ADVISOR: ASSOC. PROF. YACHAI LIMPIYAKORN, 47 pp.

Image-based barcode decoding is a research problem that has been extensively studied. Approaches presented by most of the previous work are based on determining a scanline that passes through the barcode in the image and decoding with the intensity values derived along the scanline. When dealing with highly deformed barcode images, these approaches are likely to be ineffective, as they are often subject to decoding problems owing to perspective distortion, reflections, or shadows from deformed surfaces. Finding a scanline that passes through the barcode without crossing over problematic regions becomes a hard problem, if not impossible in some cases. This thesis thus proposes a novel approach using a non-linear scanpath attempting to avoid problematic regions so that the intensity values could be collected. In finding a scanpath, the measure of local orientedness, called Modal Orientation Deviation (MOD), is introduced and used to determine barcode regions that will produce a quality scanpath. The values of intensity levels sampled from the resulting scanpath are then matched with dynamic templates in the subsequent decoding step. The effectiveness of the proposed method is also discussed. The experimental results show that challenging deformed barcode images selected as test cases can be correctly decoded with the presented technique.

Department: Computer Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Computer Science      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมไปถึงกระบวนการวิจัยที่นำมาสู่ผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร.ญาใจ ลีมีปิยะภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษาแนะนำ คอยติดตามความก้าวหน้า ช่วยตรวจสอบแก้ไขงานตีพิมพ์ในวารสารและการประชุมวิชาการ และให้การสนับสนุนอื่น ๆ อย่างเต็มที่ ทำให้งานวิจัยดำเนินไปจนสำเร็จลุล่วงได้ในกรอบเวลาที่จำกัดแม้จะมีปัญหาอุปสรรคมากมาย

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.บุญเสริม กิจศิริกุล และอาจารย์ ดร.ภาสกร อภิรักษ์วรพินิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำ เสนอแนวทาง ตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ท้ายที่สุด ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้กำลังใจและการสนับสนุนในด้านต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ในที่สุด ขอขอบพระคุณผู้บังคับบัญชา เพื่อนร่วมงาน และเพื่อนร่วมเรียนที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือในเวลาที่ย่ำแย่ และขอขอบคุณคุณนันทพร เจริญพงศ์ ที่เป็นกำลังใจให้มาโดยตลอดแม้ในเวลาที่มีปัญหาที่สุด งานวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้ลุล่วงได้จากความช่วยเหลือจากผู้คนมากมาย หากข้าพเจ้ามิได้กล่าวถึงผู้ใด ข้าพเจ้าขออภัยและขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 ผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์ .....	4
1.8 ลำดับการจัดเรียงเนื้อหาในวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1.1 บาร์โค้ด .....	5
2.1.2 แบบแผนสัญลักษณ์ EAN-13.....	7
2.1.3 เกรเดียนต์ .....	9
2.1.4 ฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์.....	10
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12

บทที่ 3 แนวคิดและวิธีการ .....	17
3.1 แนวคิดในการพัฒนา .....	17
3.2 ภาพรวมของงานวิจัย .....	18
3.3 การเตรียมภาพนำเข้า.....	19
3.4 การคำนวณตัวบอกลีโธแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ .....	19
3.5 การจำแนกบล็อกที่ถอดรหัสได้.....	21
3.6 การหาวิถีการตรวจ.....	25
3.7 การเก็บตัวอย่างตามแนววิถีการตรวจ .....	26
3.8 การถอดรหัสด้วยการจับคู่กับแม่แบบพลวัต.....	28
บทที่ 4 การประเมินและการวัดผล.....	31
4.1 ระบบที่ใช้ทดสอบ .....	31
4.2 ผลการทดสอบกับชุดภาพบาร์โค้ดที่ถ่ายเอง .....	31
4.3 ผลการทดสอบกับชุดภาพจากงานอื่น.....	34
4.4 ผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้การแบ่งทวิภาคในการหาวิถีการตรวจ .....	36
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	37
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	37
5.2 ข้อจำกัด.....	37
5.3 แนวทางการวิจัยต่อ.....	37
รายการอ้างอิง .....	39
ภาคผนวก.....	40
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	47



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การแบ่งส่วนความกว้างของบาร์โค้ดแบบ EAN-13.....	7
ตารางที่ 2.2 รูปแบบการเข้ารหัสเลขหลักต่าง ๆ ของบาร์โค้ดแบบ EAN-13.....	8



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 บาร์โค้ดที่มีลักษณะผิดรูป .....	2
ภาพที่ 2.1 บาร์โค้ดแบบมิติเดียว .....	5
ภาพที่ 2.2 บาร์โค้ด 2 มิติ.....	6
ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างการแบ่งส่วนและถอดรหัสบาร์โค้ด EAN-13.....	8
ภาพที่ 2.4 ทิศของเกรเดียนต์ ในที่นี้สีที่มีค่ามากกว่าแสดงถึงค่าที่มากกว่า .....	9
ภาพที่ 2.5 ภาพเกรเดียนต์ในแนวแกน X และในแนวแกน Y.....	10
ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนการคำนวณตัวบอก HOG .....	12
ภาพที่ 2.7 ขั้นตอนการตรวจหาตำแหน่งบาร์โค้ด .....	13
ภาพที่ 2.8 การแบ่งทวีภาคจากค่าความเข้มที่อ่านได้จากเส้นกราดตรวจ .....	13
ภาพที่ 2.9 ค่าความเข้มของรหัสหนึ่งหลักตามแนวเส้นกราดตรวจ.....	14
ภาพที่ 2.10 การถอดรหัสโดยการเปรียบเทียบกับแม่แบบผิดรูปได้.....	15
ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างวิธีการตรวจบนภาพบาร์โค้ดผิดรูป .....	15
ภาพที่ 2.12 วิธีการตรวจที่ผิดพลาดเนื่องจากปัญหาการแบ่งทวีภาค.....	16
ภาพที่ 3.1 ทิศทางของเกรเดียนต์ในบริเวณเฉพาะของบาร์โค้ด .....	17
ภาพที่ 3.2 ภาพบาร์โค้ดนำเข้า .....	21
ภาพที่ 3.3 ผังแสดง HOG แบ่งเป็นช่อง.....	21
ภาพที่ 3.4 ขนาดของเกรเดียนต์แยกตามอันตรภาคชั้น .....	22
ภาพที่ 3.5 ผังของค่า MOD ที่คำนวณได้สำหรับแต่ละบล็อก.....	23
ภาพที่ 3.6 ฮิสโทแกรมของ MOD.....	24
ภาพที่ 3.7 บล็อกที่ถูกกรองออกด้วยค่าขีดแบ่งจาก MOD.....	24
ภาพที่ 3.8 ทิศทางของ FLOW และส่วนของวิธีการตรวจที่ตัดผ่านบล็อก .....	26
ภาพที่ 3.9 ตัวอย่างวิธีการตรวจที่ได้เป็นผลลัพธ์ .....	26

ภาพที่ 3.10 ลำดับตัวอย่างที่เก็บได้จากวิถีการตรวจและตัดขอบซ้ายขวาแล้ว .....	28
ภาพที่ 3.11 ลำดับตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานเฉพาะที่เพื่อใช้หาจุดตัดศูนย์.....	29
ภาพที่ 3.12 เปรียบเทียบลำดับตัวอย่างของรหัสหนึ่งกับแม่แบบที่คู่กัน .....	30
ภาพที่ 4.1 ภาพทดสอบกรณีปกติ .....	31
ภาพที่ 4.2 ภาพทดสอบกรณีมีแสงสะท้อนทั่วไป .....	32
ภาพที่ 4.3 ภาพทดสอบกรณีมีรูปร่างสูงและมีแสงสะท้อน .....	32
ภาพที่ 4.4 ภาพทดสอบกรณีมีรูปร่างสูงและความสว่างไม่เสมอกัน .....	33
ภาพที่ 4.5 ภาพทดสอบกรณีมีรูปร่างสูงทั่วไป.....	33
ภาพที่ 4.6 ชุดภาพทดสอบจากแหล่งอื่น .....	35
ภาพที่ 4.7 ฮิสโทแกรมจากค่า MOD ของบาร์โค้ดในภาพที่ 4.6(ค).....	36
ภาพที่ ผ.1 แม่แบบเลข 0 ภาวะคี่.....	41
ภาพที่ ผ.2 แม่แบบเลข 1 ภาวะคี่.....	41
ภาพที่ ผ.3 แม่แบบเลข 2 ภาวะคี่.....	41
ภาพที่ ผ.4 แม่แบบเลข 3 ภาวะคี่.....	41
ภาพที่ ผ.5 แม่แบบเลข 4 ภาวะคี่.....	42
ภาพที่ ผ.6 แม่แบบเลข 5 ภาวะคี่.....	42
ภาพที่ ผ.7 แม่แบบเลข 6 ภาวะคี่.....	42
ภาพที่ ผ.8 แม่แบบเลข 7 ภาวะคี่.....	42
ภาพที่ ผ.9 แม่แบบเลข 8 ภาวะคี่.....	42
ภาพที่ ผ.10 แม่แบบเลข 9 ภาวะคี่.....	42
ภาพที่ ผ.11 แม่แบบเลข 0 ภาวะคู่.....	43
ภาพที่ ผ.12 แม่แบบเลข 1 ภาวะคู่.....	43
ภาพที่ ผ.13 แม่แบบเลข 2 ภาวะคู่.....	43
ภาพที่ ผ.14 แม่แบบเลข 3 ภาวะคู่.....	43

ภาพที่ ผ.15 แม่แบบเลข 4 ภาวะคู่.....	43
ภาพที่ ผ.16 แม่แบบเลข 5 ภาวะคู่.....	43
ภาพที่ ผ.17 แม่แบบเลข 6 ภาวะคู่.....	44
ภาพที่ ผ.18 แม่แบบเลข 7 ภาวะคู่.....	44
ภาพที่ ผ.19 แม่แบบเลข 8 ภาวะคู่.....	44
ภาพที่ ผ.20 แม่แบบเลข 9 ภาวะคู่.....	44
ภาพที่ ผ.21 แม่แบบเลข 0 หลักด้านขวา .....	44
ภาพที่ ผ.22 แม่แบบเลข 1 หลักด้านขวา .....	44
ภาพที่ ผ.23 แม่แบบเลข 2 หลักด้านขวา .....	45
ภาพที่ ผ.24 แม่แบบเลข 3 หลักด้านขวา .....	45
ภาพที่ ผ.25 แม่แบบเลข 4 หลักด้านขวา .....	45
ภาพที่ ผ.26 แม่แบบเลข 5 หลักด้านขวา .....	45
ภาพที่ ผ.27 แม่แบบเลข 6 หลักด้านขวา .....	45
ภาพที่ ผ.28 แม่แบบเลข 7 หลักด้านขวา .....	45
ภาพที่ ผ.29 แม่แบบเลข 8 หลักด้านขวา .....	46
ภาพที่ ผ.30 แม่แบบเลข 9 หลักด้านขวา .....	46

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเลือกซื้อสินค้าในร้านค้าเป็นปัญหาที่ยากสำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการมองเห็น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในร้านค้าไม่ได้ออกแบบมาให้สามารถระบุหรือจำแนกได้โดยใช้สัมผัสอื่น นอกเหนือจากการมองเห็น เครื่องมือช่วยเหลือสำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการมองเห็นได้ถูกพัฒนาขึ้นหลายรูปแบบ ทั้งชั้นวางที่สามารถส่งเสียงได้ การตรวจหาวัตถุเพื่อค้นหาสินค้าที่ต้องการ การตรวจจับและอ่านบาร์โค้ดด้วยกล้อง เป็นต้น

การตรวจหาและอ่านบาร์โค้ดด้วยกล้องสำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการมองเห็นเป็นปัญหาที่มีประเด็นแตกต่างจากการตรวจจับและอ่านบาร์โค้ดในกรณีปกติ เนื่องจากผู้ใช้ไม่สามารถทราบได้ว่าตำแหน่งของบาร์โค้ดสำหรับผลิตภัณฑ์นั้น ๆ อยู่ตำแหน่งใดบนบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้ภาพบาร์โค้ดที่บันทึกได้อาจจะอยู่ในลักษณะที่ไม่สมบูรณ์โดยที่ผู้ใช้ไม่ทราบได้เนื่องจากผู้ชมองไม่เห็นภาพบาร์โค้ด ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาในการอ่านและถอดรหัสบาร์โค้ดนั้น

ประเด็นปัญหาข้างต้นสามารถแยกออกได้เป็นสองปัญหาย่อย คือ ปัญหาในการค้นหาตำแหน่งของบาร์โค้ดในภาพถ่าย และปัญหาการอ่านบาร์โค้ดจากภาพถ่ายนั้นเมื่อทราบตำแหน่งของบาร์โค้ดแล้ว

การค้นหาตำแหน่งของบาร์โค้ดจะเกี่ยวข้องกับการค้นหาบริเวณในภาพถ่ายที่ปรากฏลักษณะเฉพาะของบาร์โค้ดซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรงคู่ขนานกันเป็นจำนวนมาก บางเทคนิคจะใช้การหาเกรเดียนต์ (gradient) ในสองแกนหลักซึ่งเหมาะกับกรณีที่บาร์โค้ดเป็นระเบียบและวางตัวในแนวนอน บางเทคนิคใช้การแปลงฮัฟ (Hough transform) ค้นหาบริเวณที่ปรากฏส่วนของเส้นตรงอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งช่วยแก้ปัญหาข้อจำกัดในการวางตัวของบาร์โค้ดในภาพถ่ายจากเทคนิคแรกได้

การอ่านบาร์โค้ดเมื่อทราบตำแหน่งแล้วก็มีปัญหาที่เป็นอุปสรรคในการอ่านได้เช่นกัน เช่น การเบลอของภาพบาร์โค้ด การโค้งงอของบาร์โค้ดซึ่งอาจเกิดจากการโค้งงอของบรรจุภัณฑ์เอง การบิดโค้งเล็กน้อยที่เกิดจากการบิดเบือนของเลนส์ (lens distortion) การบิดเบือนเชิงมุมมอง (perspective distortion) หรือแสงสะท้อนบนบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการถอดรหัสภาพบาร์โค้ดที่มีลักษณะผิดปกติในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเกิดจากการผิดรูปของบรรจุภัณฑ์ที่บาร์โค้ดนั้นปรากฏอยู่ ลักษณะการผิดรูปแบบนี้ประกอบด้วยการโค้งงอ การพับ และการบุบของพื้นผิวบรรจุภัณฑ์ ดังตัวอย่างในภาพที่ 1.1 โดยอาศัยการสร้างวิถีการตรวจ (scanpath) จากเกรเดียนต์ ฮิสโทแกรมทิศทางของการวางตัวของเกรเดียนต์ (Histogram of

Oriented Gradients— HOG) ถูกนำมาใช้เป็นตัวบอกลักษณะเฉพาะตั้งต้นเพื่อวัดการกระจายตัวของทิศทางการวางตัวภายในกรอบจำกัด และนำไปหาส่วนเบี่ยงเบนทิศทางการวางตัวฐานนิยม (Modal Orientation Deviation— MOD) ซึ่งนิยามขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้เพื่อใช้เป็นเครื่องมือวัดความเป็นทิศทางเดียวกันของการวางตัว และนำไปใช้จำแนกบริเวณที่เกิดปัญหาในบาร์โค้ดเพื่อสร้างวิธีการตรวจต่อไป



ภาพที่ 1.1 บาร์โค้ดที่มีลักษณะผิดรูป

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

พัฒนาวิธีการถอดรหัสภาพบาร์โค้ดที่มีลักษณะการผิดรูปสูง เพื่อแก้ปัญหาในกรณีพื้นผิวที่บาร์โค้ดปรากฏอยู่มีลักษณะหักงอหรือบิดตัว เช่น บนหีบห่อบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ และเพื่อใช้ประกอบเป็นส่วนหนึ่งของระบบอ่านบาร์โค้ดที่สามารถรองรับการผิดรูปของบาร์โค้ดได้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. พัฒนาการถอดรหัสบาร์โค้ดที่ผิดรูป โดยรองรับบาร์โค้ดที่มีลักษณะดังต่อไปนี้
  - 1.1. เป็นบาร์โค้ดแบบมิติเดียวแบบ EAN-13 และ UPC-A เท่านั้น
  - 1.2. เส้นบาร์โค้ดในภาพแต่ละเส้นต้องมีบางส่วนที่สามารถมองเห็นแยกจากเส้นอื่นได้อย่างชัดเจน

- 1.3. ยอมให้ภาพบาร์โค้ดมีแสงสะท้อนได้เป็นบางส่วน โดยที่ตลอดแนวของบาร์โค้ดทุกเส้น ต้องมีส่วนที่ยังมองเห็นได้และแยกจากเส้นอื่น
- 1.4. ยอมรับการผิดรูปซึ่งเกิดจากบาร์โค้ดที่อยู่บนแนวโค้งมนของบรรจุภัณฑ์ หรือบนบรรจุภัณฑ์ที่หักงอได้ เช่น ซองซองขบเคี้ยวหรืออาหาร ทั้งนี้ หากการผิดรูปต้องทำให้เกิดการบิดบังขึ้น เส้นบาร์โค้ดต้องมีส่วนที่ยังมองเห็นได้และแยกจากเส้นอื่นปรากฏอยู่
2. ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมเป็นรหัสของบาร์โค้ด
3. การประเมินผลงานวิจัยจะทดสอบกับฐานข้อมูลบาร์โค้ดมาตรฐานที่ใช้ในงานอื่นที่อ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องกับงานอื่น ร่วมกับภาพบาร์โค้ดที่ผิดรูปที่เก็บตัวอย่างมาเองเพื่อวัดความถูกต้องเฉพาะสำหรับงานนี้

#### 1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการอ่านและถอดรหัสภาพบาร์โค้ด
2. ศึกษาแนวคิดและวิธีการที่เกี่ยวข้องกับการหาลักษณะเฉพาะต่าง ๆ จากภาพบาร์โค้ด
3. พัฒนาแนวทางการหาลักษณะเฉพาะและวิธีการถอดรหัสที่เหมาะสมกับปัญหาที่เกิดจากภาพบาร์โค้ดที่ผิดรูป
4. พัฒนาโปรแกรมเพื่อทดสอบตามแนวทางในข้อ 3
5. ทดสอบโปรแกรมกับภาพบาร์โค้ดผิดรูปแบบต่าง ๆ และภาพบาร์โค้ดจากแหล่งอื่นเพื่อประเมินประสิทธิผลของวิธีการ
6. ตีพิมพ์ผลงานวิชาการ
7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ และจัดทำวิทยานิพนธ์

#### 1.5 ข้อตกลงเบื้องต้น

เพื่อความสะดวกในการบรรยายวิธีการสร้างวิธีการตรวจ ภาพบาร์โค้ดที่ใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นภาพบาร์โค้ดที่มีลักษณะการวางตัวในแนวนอนเป็นหลัก การวางตัวอยู่ในลักษณะที่ทำให้สามารถอ่านบาร์โค้ดโดยการกราดตรวจจากซ้ายไปขวาได้ ทั้งนี้ในการใช้งานจริง วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้สามารถประยุกต์ให้ตรวจสอบทิศทางวางตัวของภาพบาร์โค้ดและปรับแนวการสร้างวิธีการกราดตรวจให้สอดคล้องได้

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการอ่านบาร์โค้ดที่มีการผิดรูป และสามารถนำไปใช้ประกอบกับงานอื่นที่ต้องอ่านบาร์โค้ดและจำเป็นต้องมีความทนทานต่อภาพบาร์โค้ดที่ผิดรูปได้สูง เช่น การพัฒนาเครื่องมืออ่านบาร์โค้ดโดยใช้สมาร์ทโฟนซึ่งมีกำลังประมวลผลต่ำเพื่อให้ผู้ที่มีความบกพร่องทางการมองเห็นสามารถเลือกหรือค้นหาสินค้าได้ด้วยตนเอง

## 1.7 ผลงานที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตีพิมพ์เป็นบทความวิชาการเรื่อง “Decoding Deformed Barcode Images with Scanpath Walkthrough” ใน International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering (IJMUE), Vol. 10 No. 1, January 2015

## 1.8 ลำดับการจัดเรียงเนื้อหาในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทดังต่อไปนี้ บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและผลงานตีพิมพ์ บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 กล่าวถึงแนวคิดและวิธีการที่นำเสนอ บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการประเมินและวัดผล และผลการทดสอบแนวคิด และบทที่ 5 สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไปในอนาคต



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ต้องอาศัยความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับบาร์โค้ด และเทคนิคทางด้านการประมวลผลภาพดิจิทัล ได้แก่ แนวคิดเรื่องเกรเดียนต์ และตัวบอกฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ (HOG Descriptor)

##### 2.1.1 บาร์โค้ด

บาร์โค้ดเป็นสัญลักษณ์แทนข้อมูลซึ่งออกแบบมาให้เหมาะสมกับการอ่านด้วยเครื่องอ่านด้วยแสง (optical reader) บาร์โค้ดมักจะใช้ติดกับวัตถุ เช่น สินค้าต่าง ๆ เพื่อแสดงรหัสแทนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัตถุนั้น ๆ และสามารถนำรหัสดังกล่าวไปค้นคืนข้อมูลของวัตถุนั้นจากฐานข้อมูลได้

แรกเริ่มนั้น บาร์โค้ดจะมีลักษณะเป็นแถวของเส้นตรงที่ขนานกันจำนวนหนึ่งโดยที่แต่ละเส้นมีความกว้างของเส้นและช่องว่างระหว่างเส้นแตกต่างกันไป (ภาพที่ 2.1) ความกว้างของเส้นและช่องว่างเหล่านี้เป็นตัวเข้ารหัสข้อมูลที่สัญลักษณ์บาร์โค้ดนี้แทน แต่ในปัจจุบัน มีรูปแบบการเข้ารหัสข้อมูลที่ใช้สัญลักษณ์อื่นแทนเส้นตรงและมีการจัดเรียงตัวในสองแกนแทนที่จะเป็นตามแนวเดียว จึงได้มีการแบ่งแยกรูปแบบของบาร์โค้ดออกเป็นแบบมิติเดียว (1D) และแบบสองมิติ (2D)



ภาพที่ 2.1 บาร์โค้ดแบบมิติเดียว (ที่มา: <http://www.gs1.org/>)

บาร์โค้ดแบบสองมิติสามารถแทนข้อมูลได้มากกว่าบาร์โค้ดแบบมิติเดียวในพื้นที่ที่เท่ากันมาก หรือพูดอีกอย่างได้ว่ามีความหนาแน่นของข้อมูลสูงมาก ปัจจุบันเริ่มมีการใช้งานแพร่หลายในบางประเทศและในบางส่วนของอุตสาหกรรม นอกจากนี้ ยังนิยมนำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลบนสมาร์ทโฟนอีกด้วย ภาพที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของบาร์โค้ดแบบสองมิติ



(01)07612345678900(17)100503

(10)AC3453G3

(ก) Data Matrix



(ข) QR Code

ภาพที่ 2.2 บาร์โค้ด 2 มิติ (ที่มา: <http://www.gs1.org/>)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาที่บาร์โค้ดแบบมิติเดียวเท่านั้น เนื่องจากเป็นรูปแบบบาร์โค้ดที่ถูกกำหนดให้เป็นมาตรฐานสำหรับการแสดงรหัสสินค้าและผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ

แบบแผนสัญลักษณ์ (symbology) ของบาร์โค้ดแบบมิติเดียว (ต่อไปนี้จะเรียกสั้น ๆ ว่า บาร์โค้ด) มีอยู่หลายแบบ โดยที่แต่ละแบบถูกกำหนดขึ้นโดยองค์กรหรือหน่วยงานที่ต่างกัน เพื่อใช้ในลักษณะงานที่แตกต่างกัน ข้อกำหนดของแบบแผนสัญลักษณ์แต่ละแบบจะประกอบด้วยรูปแบบการเข้ารหัสอักขระหรือตัวเลขเดี่ยวแต่ละตัว รวมไปถึงเครื่องหมายเริ่มต้นและสิ้นสุดให้เป็นเส้นและช่องว่าง ขนาดของพื้นที่ว่างก่อนและหลังบาร์โค้ด และวิธีการคำนวณค่าผลรวมตรวจสอบ (checksum)

การจำแนกประเภทของแบบแผนสัญลักษณ์มักจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติสองประการ คือ

- ความต่อเนื่อง ในแบบแผนสัญลักษณ์แบบต่อเนื่อง (continuous) อักขระที่จบด้วยช่องว่างจะต่อกับอักขระที่ขึ้นต้นด้วยเส้นต่อไป และอักขระที่จบด้วยเส้นก็จะต่อกับอักขระที่ขึ้นต้นด้วยช่องว่างทันที ในขณะที่แบบแผนสัญลักษณ์แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) อักขระแต่ละตัวจะขึ้นต้นและจบด้วยเส้น ช่องว่างระหว่างอักขระจะกว้างเท่าใดก็ได้ตราบเท่าที่ยังไม่เกินข้อกำหนด
- จำนวนรูปแบบความกว้าง แบ่งเป็นประเภทสองรูปแบบความกว้างและประเภทหลายรูปแบบความกว้าง ในกรณีของแบบแผนสัญลักษณ์ที่มีสองรูปแบบความกว้าง เส้นจะมีสองลักษณะ คือ แบบกว้างกับแบบแคบ โดยที่แบบกว้างอาจจะกว้างกว่าแบบแคบ 2-3 เท่าตัว ส่วนกรณีของประเภทหลายรูปแบบความกว้าง ความกว้างของเส้นจะสัมพันธ์กับความกว้างพื้นฐานที่เรียกว่ามอดูล ที่พบมากคือ ประเภทมีสี่รูปแบบความกว้าง กล่าวคือ มีความกว้างเป็น 1, 2, 3, และ 4 เท่าของมอดูล

แบบแผนสัญลักษณ์บางแบบ เช่น Interleaved 2 of 5 ใช้การเรียงแทรก โดยอักขระตัวแรกเข้ารหัสด้วยเส้น ในขณะที่ตัวที่สองเข้ารหัสด้วยช่องว่างที่แทรกอยู่ระหว่างเส้นของอักขระตัวแรก และคู่อักขระคู่ต่อ ๆ ไปก็ทำซ้ำเช่นนี้

วิทยานิพนธ์นี้จำกัดแบบแผนสัญลักษณ์ที่รองรับได้ไว้สองแบบคือ EAN-13 และ UPC-A ซึ่งเป็นแบบแผนสัญลักษณ์ที่ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการติดฉลากผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ UPC-A เป็นแบบแผนสัญลักษณ์ที่ใช้มากในประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา สหราชอาณาจักร ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ มีขนาดของเลขรหัส 12 หลัก ในขณะที่ EAN-13 ซึ่งพัฒนาขึ้นมาภายหลังและใช้อย่างแพร่หลายทั่วไปมีขนาดของเลขรหัส 13 หลัก ทั้งนี้ การเข้ารหัสของ EAN-13 จะมีลักษณะเข้ากันได้กับ UPC-A โดยบาร์โค้ดแบบ UPC-A ที่นำไปอ่านด้วยเครื่องอ่านสำหรับ EAN-13 จะอ่านค่าหลักแรกได้เป็นเลข 0 และ 12 หลักที่เหลือจะเหมือนกับรหัส UPC-A เดิมทุกประการ

ในที่นี้จะอธิบายลักษณะการเข้ารหัสเฉพาะแบบ EAN-13 เนื่องจากการเข้ารหัสแบบ UPC-A จะมีลักษณะเหมือน EAN-13 ที่มีหลักแรกเป็นเลข 0

### 2.1.2 แบบแผนสัญลักษณ์ EAN-13

บาร์โค้ดแบบ EAN-13 จะมีลักษณะเป็นบาร์โค้ดแบบต่อเนื่องและหลายรูปแบบความกว้างในแต่ละหลักของเลขรหัสจะประกอบขึ้นด้วยเส้นขาวและดำสลับกันสี่เส้น เป็นเส้นขาวสองเส้นและเส้นดำสองเส้น แต่ละเส้นจะมีความกว้างได้สี่ระดับ ระดับที่แคบที่สุดเรียกว่าความกว้างมอดูล ความกว้างระดับอื่น ๆ จะเป็นสอง สาม และสี่เท่าของความกว้างมอดูล ทั้งนี้ ทั้งสี่เส้นซึ่งประกอบกันเป็นเลขรหัสหนึ่งหลักจะต้องมีความกว้างรวมกันเท่ากับเจ็ดเท่าของความกว้างมอดูลพอดี

ความกว้างของบาร์โค้ดทั้งหมดจะเท่ากับ 95 เท่าของความกว้างมอดูล โดยมีลักษณะการแบ่งส่วนความกว้างดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งส่วนความกว้างของบาร์โค้ดแบบ EAN-13

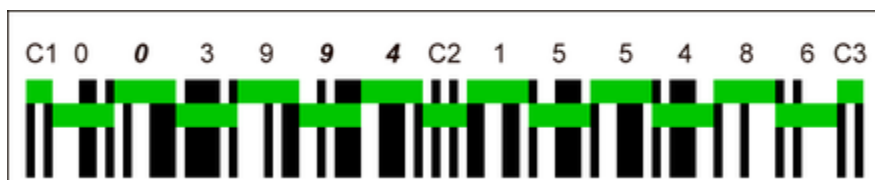
ส่วนที่	ความกว้างมอดูล (เท่า)	ความหมาย
1	3	ส่วนป้องกันด้านซ้าย จำนวน 3 เส้น
2	6x7 (42)	เลขรหัส 6 หลักกลุ่มซ้าย (หลักที่ 2-7)
3	5	ส่วนป้องกันกลาง จำนวน 5 เส้น
4	6x7 (42)	เลขรหัส 6 หลักกลุ่มขวา (หลักที่ 8-13)
5	3	ส่วนป้องกันด้านขวา จำนวน 3 เส้น

เลขรหัสหลักที่ 2-13 สามารถหาได้โดยตรงจากเส้นบาร์โค้ด ส่วนหลักที่ 1 คำนวณจากการอ่านภาวะ (parity) คู่และคี่ของหลักที่ 2-7 แล้วนำไปเทียบกับค่าในตารางที่ 2.2 ในส่วนของการเข้ารหัสหลักที่ 1 เพื่อหาเลขรหัสที่ถูกต้อง

ตารางที่ 2.2 รูปแบบการเข้ารหัสเลขหลักต่าง ๆ ของบาร์โค้ดแบบ EAN-13

เลข	รูปแบบ			ความกว้างของเส้นในหลัก		การเข้ารหัสหลักที่ 1
	ซ้าย		ขวา	ภาวะคี่	ภาวะคู่	
	ภาวะคี่	ภาวะคู่				
0	0001101	0100111	1110010	3211	1123	000000
1	0011001	0110011	1100110	2221	1222	00E0EE
2	0010011	0011011	1101100	2122	2212	00EEOE
3	0111101	0100001	1000010	1411	1141	00EEEE
4	0100011	0011101	1011100	1132	2311	0E00EE
5	0110001	0111001	1001110	1231	1321	0EE00E
6	0101111	0000101	1010000	1114	4111	0EEEE0
7	0111011	0010001	1000100	1312	2131	0EOEOE
8	0110111	0001001	1001000	1213	3121	0EOEEO
9	0001011	0010111	1110100	3112	2113	0EEOEO

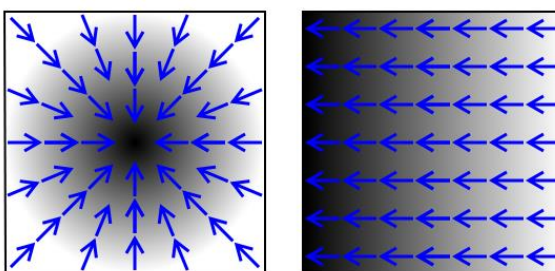
ภาพที่ 2.3 แสดงตัวอย่างการแบ่งส่วนของบาร์โค้ดตามรูปแบบที่กำหนดในตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 แถบสีเขียวในภาพแสดงถึงขอบเขตของการแบ่งกลุ่มเส้นบาร์โค้ด C1, C2 และ C3 เป็นบริเวณส่วนป้องกันซึ่งเป็นเครื่องหมายระบุถึงจุดเริ่มต้น จุดกลาง และจุดสิ้นสุดของบาร์โค้ด ในแต่ละหลักของเลขรหัสกลุ่มซ้าย จะต้องอ่านค่าภาวะคู่หรือคี่ของแต่ละหลักแล้วนำมาเรียงกันเพื่อเทียบกับค่าในตารางที่ 2.2 ในที่นี้ค่าภาวะที่อ่านได้เป็น คี่ คู่ คี่ คี่ คู่ คู่ (odd even odd odd even even: OE00EE) ซึ่งเมื่อเทียบกับตารางแล้ว ค่าหลักที่ 1 ที่ได้คือเลข 4 และเลขรหัสที่ได้เป็นผลลัพธ์คือ 4003994155486



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างการแบ่งส่วนและถอดรหัสบาร์โค้ด EAN-13 (ที่มา: Wikipedia)

### 2.1.3 เกรเดียนต์

ในทางคณิตศาสตร์ เกรเดียนต์ หมายถึง อนุพันธ์ของฟังก์ชันหลายตัวแปร มีลักษณะเป็นเวกเตอร์ของอนุพันธ์ย่อยของแต่ละตัวแปร เกรเดียนต์ของฟังก์ชันจะเป็นฟังก์ชันที่มีค่าเป็นเวกเตอร์ ถ้านำฟังก์ชันมาเขียนเป็นกราฟหลายมิติ เกรเดียนต์จะแสดงถึงความชันหรือแนวสัมผัสของกราฟ ณ แต่ละจุดของพื้นผิวของกราฟ เป็นเวกเตอร์ที่แสดงถึงทิศทางและขนาดของการลาดชันบนพื้นผิวนั้น โดยเกรเดียนต์จะพุ่งจากจุดที่มีค่าต่ำกว่าเข้าหาจุดที่มีค่าสูงกว่า ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ทิศของเกรเดียนต์ ในที่นี้สีที่มืดกว่าแสดงถึงค่าที่มากกว่า (ที่มา: Wikipedia)

ในการประมวลผลภาพดิจิทัล เกรเดียนต์ถูกนำมาใช้ในการหาทิศทางและขนาดของความเปลี่ยนแปลงความเข้มของจุดสี ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการหาเส้นขอบและความต่อเนื่องของพื้นผิววัตถุในภาพได้

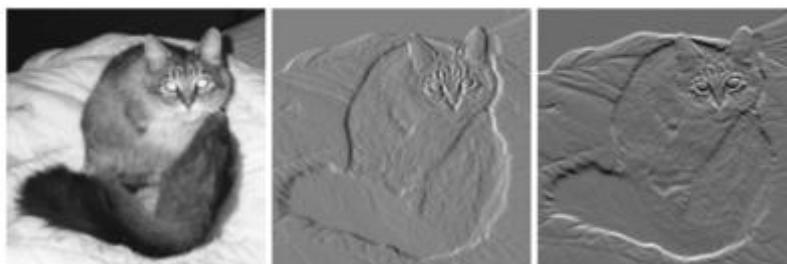
การหาเกรเดียนต์ในมุมมองของการประมวลผลภาพดิจิทัล จะแยกเป็นการหาเกรเดียนต์ในแนวแกน X และเกรเดียนต์ในแนวแกน Y ดังสมการด้านล่าง

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{y}$$

โดย  $\frac{\partial f}{\partial x}$  เป็นเกรเดียนต์ในแนวแกน X และ  $\frac{\partial f}{\partial y}$  เป็นเกรเดียนต์ในแนวแกน Y

ในทางปฏิบัติ การหาค่าเกรเดียนต์จะใช้วิธีการนำจุดภาพที่อยู่ติดกันหรือใกล้เคียงกันมาลบกันในแนวตั้งหรือแนวนอน ซึ่งทำได้ด้วยการทำคอนโวลูชันด้วยตัวดำเนินการแบบต่าง ๆ เช่น ตัวดำเนินการโซเบล (Sobel operator) หรือตัวดำเนินการมิติเดียวแบบง่าย  $[-1,0,1]$  และ  $[-1,0,1]^T$

ภาพที่ 2.5 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์จากการทำคอนโวลูชันด้วยตัวดำเนินการแนวนอน (แกน X) และแนวตั้ง (แกน Y) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปของระดับเทา บริเวณที่สว่างแสดงถึงอนุพันธ์ที่มีค่าสูง และมักจะแสดงถึงเส้นขอบแบ่งของวัตถุในภาพ



ภาพที่ 2.5 ภาพเกรเดียนต์ในแนวแกน X และในแนวแกน Y (ที่มา: Wikipedia)

#### 2.1.4 ฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์

ฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ (Histogram of Oriented Gradients— HOG) เป็นตัวบอกลักษณะเฉพาะที่ใช้ในการตรวจหาวัตถุในภาพ เริ่มนำมาใช้ครั้งแรกโดย Dalal และ Triggs [1] เพื่อตรวจหาผู้คนในภาพถ่าย และต่อมาได้ประยุกต์ใช้ในการตรวจหาวัตถุอื่น ๆ ด้วย

แนวคิดหลักของตัวบอกลักษณะฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ (HOG Descriptor) ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ลักษณะหรือรูปร่างของวัตถุเฉพาะสามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะการกระจายตัวของเกรเดียนต์ของความเข้มของภาพ โดยทำเป็นหน่วยเล็ก ๆ จากการแบ่งภาพออกเป็นส่วนขนาดเท่า ๆ กันเรียกว่าช่อง (cell)

การหาค่าตัวบอกลักษณะฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ เริ่มจากการหาเกรเดียนต์สำหรับทุกจุดภาพในภาพ โดยใช้ตัวดำเนินการมิติเดียวแบบง่าย  $[-1,0,1]$  และ  $[-1,0,1]^T$  ภาพเกรเดียนต์ที่ได้จะถูกแบ่งส่วนเป็นช่องสี่เหลี่ยมหรือช่องวงกลม ในแต่ละช่อง เกรเดียนต์ของจุดภาพภายในช่องจะถูกแบ่งแยกเป็นอันตรภาคชั้น (Histogram Bin) ตามทิศทางการวางตัว ความกว้างของแต่ละอันตรภาคชั้นแบ่งเท่า ๆ กันจากช่วง  $[0, \pi)$  หรือ  $[0, 2\pi)$  ขึ้นอยู่กับความต้องการพิจารณาเครื่องหมายของเกรเดียนต์ด้วยหรือไม่ โดยแต่ละจุดภาพให้น้ำหนักในอันตรภาคชั้นของตัวเองเท่ากับขนาดของเกรเดียนต์ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการนี้ ฮิสโทแกรมที่ได้จะมีค่าในแต่ละอันตรภาคชั้นเท่ากับผลรวมของขนาดของเกรเดียนต์ทั้งหมดที่มีทิศทางวางตัวอยู่ในช่วงของอันตรภาคชั้นนั้น ๆ

กลุ่มของช่องจะถูกรวมเป็นบล็อก (block) และทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalize) ร่วมกัน เฉพาะภายในบล็อกเพื่อลดปัญหาความลำเอียงอันเนื่องมาจากความสว่าง (illumination) และความต่างของส่วนมืดและสว่าง (contrast) เฉพาะที่ต่างกันในแต่ละบล็อก บล็อกสามารถซ้อนทับกันได้ ดังนั้น ช่องแต่ละช่องจะสามารถเป็นส่วนหนึ่งของบล็อกได้มากกว่าหนึ่งบล็อก องค์กรใด การทำให้เป็นบรรทัดฐานจะกระทำในระดับบล็อก ดังนั้น ค่าฮิสโทแกรมของช่องหนึ่งๆ ภายใต้บล็อกหนึ่ง หลังจากทำให้เป็นบรรทัดฐานอาจจะแตกต่างจากค่าฮิสโทแกรมของช่องเดียวกันซึ่งอยู่ภายใต้อีก

บล็อกหนึ่งได้ ตัวบอกฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์จะเป็นเวกเตอร์ซึ่งรวมเอาฮิสโทแกรมที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้วจากทุกช่องภายในบล็อก

Dalal และ Triggs เสนอวิธีการทำให้เป็นบรรทัดฐานสำหรับบล็อกเอาไว้สี่วิธี กำหนดให้  $v$  เป็นเวกเตอร์ของฮิสโทแกรมที่ยังไม่ได้ทำให้เป็นบรรทัดฐานทั้งหมดในบล็อก  $\|v\|_k$  เป็น  $k$ -norm ของเวกเตอร์  $v$  และ  $\epsilon$  เป็นค่าคงที่ค่าน้อย ๆ การทำให้เป็นบรรทัดฐานทั้งสี่วิธีเป็นดังนี้

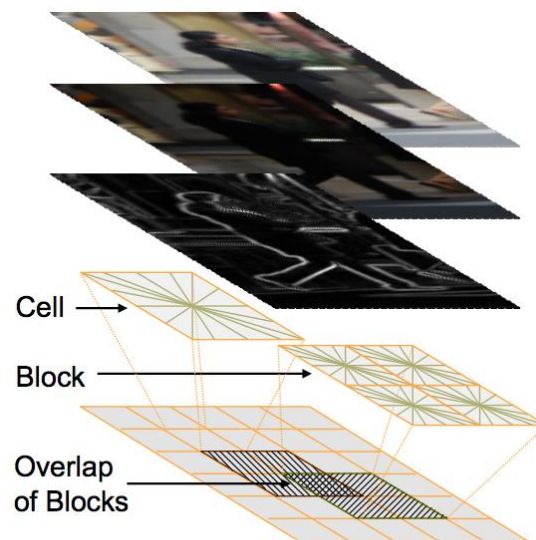
$$\text{L2-norm: } f = \frac{v}{\sqrt{\|v\|_2^2 + \epsilon^2}}$$

L2-hys: หา L2-norm แล้วจำกัดค่าสูงสุดของ  $v$  และทำให้เป็นบรรทัดฐานอีกครั้ง

$$\text{L1-norm: } f = \frac{v}{\|v\|_1 + \epsilon}$$

$$\text{L1-sqrt: } f = \sqrt{\frac{v}{\|v\|_1 + \epsilon}}$$

ภาพที่ 2.6 แสดงขั้นตอนและลักษณะการกำหนดช่องและบล็อกในการคำนวณหาตัวบอกฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์จากภาพถ่าย สังเกตว่า การกำหนดบล็อกสามารถกำหนดให้ซ้อนทับกันได้ การทำให้เป็นบรรทัดฐานจะทำแต่ละบล็อกแยกกันไป ช่องเดียวอาจจะเป็นส่วนหนึ่งของหลาย ๆ บล็อก และถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานแยกกันและแตกต่างกันไปได้ ฮิสโทแกรมที่ได้จากทุกช่องในบล็อกจะรวมเป็นเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะหรือตัวบอกฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์



Feature vector  $f = [ \dots, \dots, \dots ]$

ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนการคำนวณตัวบอกลักษณะของภาพของเกรเดียนต์  
(ที่มา: <https://lear.inrialpes.fr/pubs/2006/Dal06/Dalal-phd-slides.pdf>)

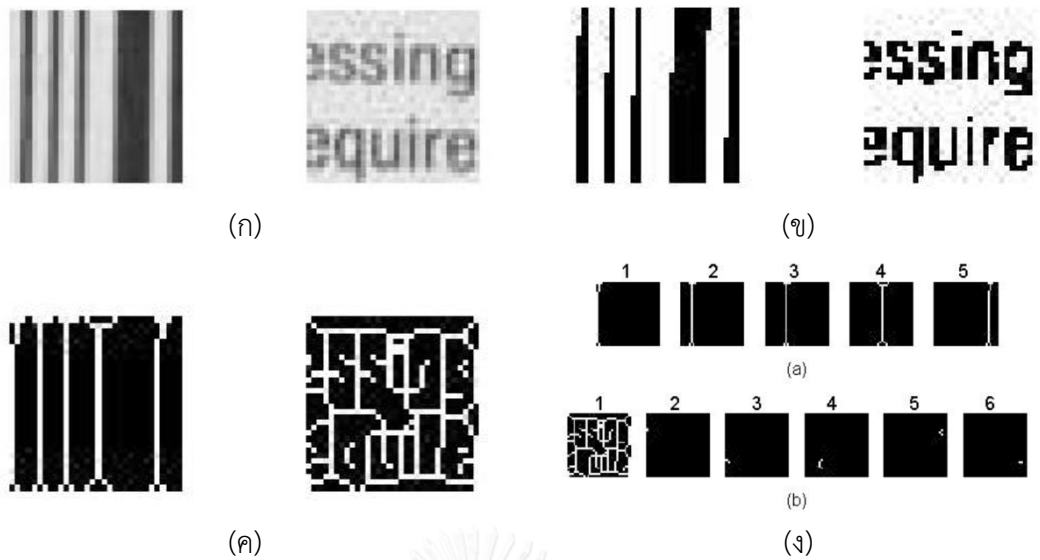
## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยด้านการถอดรหัสบาร์โค้ดจากภาพถ่ายส่วนใหญ่ตั้งสมมติฐานว่า บาร์โค้ดที่อ่านอยู่บนพื้นผิวที่มีลักษณะเรียบหรือลักษณะโค้งอย่างง่าย ๆ เช่น บนขวด เทคนิคในงานแรกๆ จะอิงการแบ่งทวิภาค (binarization) หรือการตรวจหาเส้นขอบ (edge detection) เพื่อที่จะแยกส่วนเส้นดำและขาวออกมาวิเคราะห์และถอดรหัสในขั้นตอนต่อไป

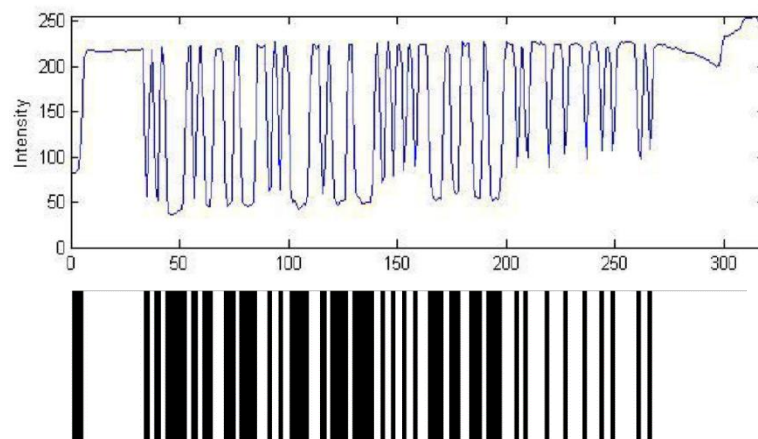
Chai และ Hock [2] เสนอวิธีการตรวจหาและถอดรหัสบาร์โค้ด โดยในขั้นตรวจหาจะใช้การแบ่งทวิภาคจากภาพระดับเทา ดังภาพที่ 2.7(ก)-(ข) และหาโครงของวัตถุแยกชิ้นในภาพ แล้วจึงเทียบทิศทางของโครงวัตถุแต่ละอันดังภาพที่ 2.7(ค)-(ง) เพื่อหาบริเวณที่มีทิศทางสอดคล้องกัน

ในขั้นตอนถอดรหัสจะใช้เส้นกราดตรวจ (scanline) เพื่ออ่านค่าความเข้มจากในภาพและแบ่งทวิภาคตามแนวเส้นกราดตรวจโดยใช้ค่าเฉลี่ยความเข้มเป็นเกณฑ์ (ภาพที่ 2.8) ค่าที่ได้จากการแบ่งทวิภาคเป็น 0 หรือ 1 และจะนำมาเรียงต่อกันและเข้ารหัสแบบระยะวิ่ง (run-length encoding) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแม่แบบ (template)





ภาพที่ 2.7 ขั้นตอนการตรวจหาตำแหน่งบาร์โค้ด [2]



ภาพที่ 2.8 การแบ่งทวีภาคจากค่าความเข้มที่อ่านได้จากเส้นกราฟตรวจ [2]

Adelmann และคณะ [3] ใช้เส้นกราฟตรวจหลายเส้นในการถอดรหัส โดยแต่ละเส้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์และขีดแบ่งทวีภาคที่ต่างกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละเส้นกราฟตรวจจะถูกเลือกโดยการลงมติจากแต่ละเส้นกราฟตรวจ ในขณะที่บางงานวิจัยจะมีการใช้แนวทางการทำนายจะเป็น เช่น แบบจำลองมาร์คอฟแบบซ่อนเร้น [4] และอัลกอริทึมเบย์ส์ [5] เพื่อคาดเดาตัวเลขตามค่าขอบภาพที่ตรวจหาได้

โดยทั่วไปแล้ว เทคนิคที่อิงการแบ่งทวีภาคหรือการตรวจหาเส้นขอบจะไวต่อสิ่งรบกวนและความพร่ามัว คุณภาพของผลลัพธ์จะขึ้นอยู่กับค่าขีดแบ่ง (threshold) ที่เลือก การเลือกค่าที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลให้เส้นบาร์โค้ดที่บางแตกออกเป็นหลายเส้น หรือเส้นที่อยู่ใกล้กันมารวมกัน

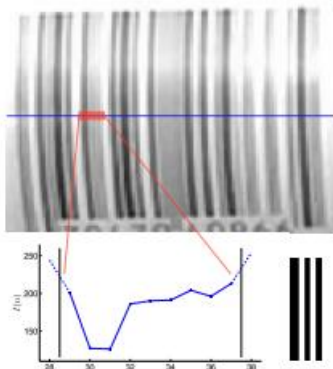
เนื่องจากการแบ่งทำให้เส้นหนาขึ้น งานวิจัยในช่วงหลังจึงพยายามแก้ปัญหานี้ โดยการอ่านเส้นกราฟตรวจเป็นค่าระดับเทาและไม่ทำการแบ่งทวิภาค

Gallo และ Manduchi [6] เสนอวิธีการที่อิงการใช้แม่แบบทวิภาคที่ผิดรูปได้ ค่าความเข้มที่อ่านได้จะไม่ถูกแบ่งทวิภาค (ภาพที่ 2.9) แต่จะนำไปใช้เปรียบเทียบในรูปของระดับเทาเลย และเนื่องจากความเป็นไปได้ที่ตำแหน่งของเลขแต่ละหลักจะมีความคลาดเคลื่อนบ้าง แม่แบบจะเคลื่อนที่หรือปรับขนาดได้ตามความเหมาะสมเพื่อให้จับคู่กับค่าตัวอย่างที่ได้จากเส้นกราฟตรวจได้ดีที่สุด ภาพที่ 2.10(ก) แสดงตัวอย่างของแม่แบบซึ่งจะถูกนำไปเทียบกับค่าตัวอย่างจากเส้นกราฟตรวจดังในภาพที่ 2.10(ข)

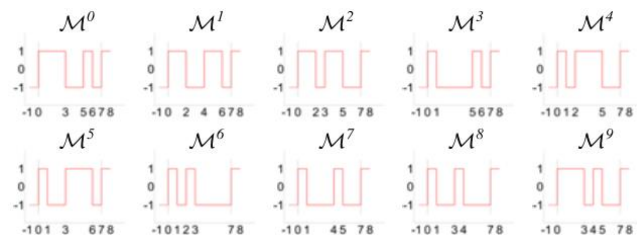
ต่อมา Chen และคณะ [7] ได้ปรับปรุงแนวทางดังกล่าวโดยการสร้างแม่แบบที่ผสมผสานกันในระดับความพร่ามัวต่าง ๆ เพื่อให้ประมาณค่าบาร์โค้ดในสภาวะพร่ามัวอย่างมากได้ใกล้เคียงที่สุด

ในขณะที่ปัญหาการถอดรหัสบาร์โค้ดทั่วไปจากภาพถ่ายได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง กรณีการถอดรหัสบาร์โค้ดที่มีลักษณะผิดรูปสูงกลับไม่มีการศึกษามาก่อน ผู้วิจัยจึงได้เสนอแนวทางการใช้วิธีการตรวจเพื่อแก้ปัญหาการถอดรหัสบาร์โค้ดที่ผิดรูปสูงใน [8] และเท่าที่ทราบเป็นงานแรกที่ศึกษาปัญหานี้โดยเฉพาะ วิธีการที่เสนอในงานวิจัย [8] อิงการแบ่งทวิภาคเพื่อแยกส่วนของเส้นบาร์โค้ดออกจากพื้นหลัง เส้นบาร์โค้ดที่ได้จะถูกแบ่งส่วนเป็นตอนสั้น ๆ เพื่อสร้างวิถีทางเลือกที่ตัดผ่านบาร์โค้ดที่ระดับความสูงต่าง ๆ กัน จุดตัดเหล่านั้นจะถูกนำมาสร้างเป็นกราฟกราฟตรวจ การหาวิธีการตรวจจะทำไปพร้อมกับการจับคู่กับแม่แบบเพื่อเลือกแนวสร้างวิถีกราฟตรวจส่วนต่อไป ภาพที่ 2.11 แสดงตัวอย่างของวิถีกราฟตรวจที่ได้เป็นผลลัพธ์

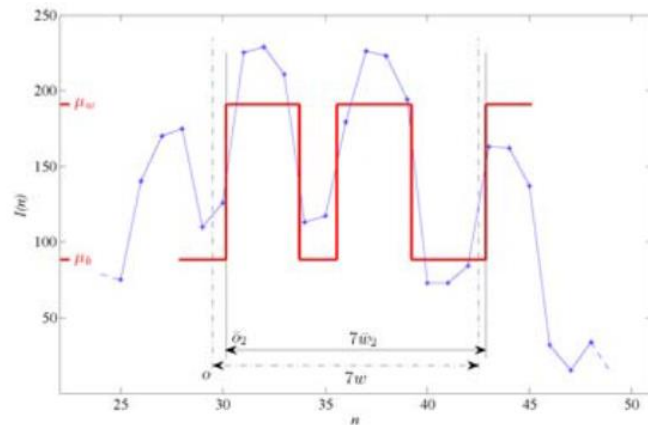
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 2.9 ค่าความเข้มของรหัสหนึ่งหลักตามแนวเส้นกราฟตรวจ [6]

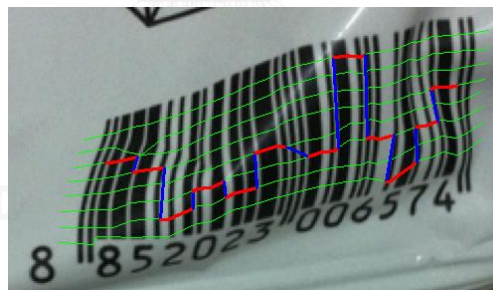


(ก)



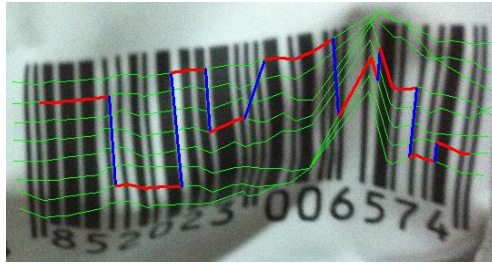
(ข)

ภาพที่ 2.10 การถอดรหัสโดยการเปรียบเทียบกับแม่แบบผิดรูปได้ [6]



ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างวิธีการตรวจจบบนภาพบาร์โค้ดผิดรูป

วิธีการดังกล่าวมีปัญหาหลักที่การอิงการแบ่งทวิภาค ซึ่งมีแนวโน้มที่จะผิดพลาดจากการที่ภาพมีความสว่างไม่สม่ำเสมอหรือมีความต่างของส่วนมืดและสว่างต่ำ ส่งผลให้มองข้ามส่วนของบาร์โค้ดบางส่วนไป ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องหรือไม่ได้รับผลลัพธ์เลย ดังในภาพที่ 2.12 ปัญหาลักษณะนี้ได้รับการปรับปรุงแก้ไขในระดับหนึ่งและได้นำเสนอเป็นวิธีการใหม่ในวิทยานิพนธ์ ดังจะได้ อธิบายรายละเอียดในบทต่อไป



ภาพที่ 2.12 วิธีกราดตรวจที่ผิดพลาดเนื่องจากปัญหาการแบ่งทวิภาค



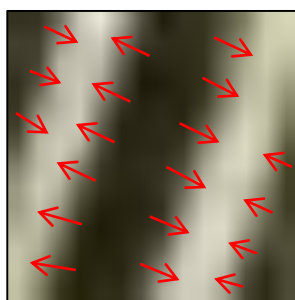
### บทที่ 3

#### แนวคิดและวิธีการ

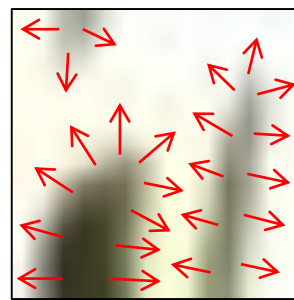
##### 3.1 แนวคิดในการพัฒนา

แนวคิดหลักที่นำมาสู่วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้อยู่บนฐานของข้อสังเกตที่ว่า ภาพบาร์โค้ดที่มีลักษณะผิดรูปสูงจะมีปัญหาจากแสงสะท้อนและการบิดโค้ง ซึ่งในบางกรณี บริเวณที่เกิดปัญหาอาจมีลักษณะการกระจายตัวบดบังจนไม่สามารถวาดเส้นกราดตรวจ (scanline) แนวตรงปกติให้ตัดผ่านบาร์โค้ดโดยไม่ผ่านบริเวณที่เกิดปัญหาได้ ทางออกที่เป็นไปได้ทางหนึ่งก็คือการกราดตรวจบาร์โค้ดในลักษณะของวิถีที่พยายามเดินตามแนวการบิดโค้งของบาร์โค้ด ในขณะที่หลีกเลี่ยงการตัดผ่านบริเวณที่เกิดปัญหาไปด้วย

การหาวิถีกราดตรวจ (scanpath) ต้องอาศัยการจำแนกบริเวณที่เกิดปัญหา เช่น แสงสะท้อน ออกจากบริเวณบาร์โค้ดปกติ และต้องสามารถหาแนวการบิดโค้งของบาร์โค้ดได้ ในประเด็นแรก การจำแนกบริเวณที่เกิดปัญหาอาศัยแนวคิดที่บริเวณพื้นที่บาร์โค้ดจะมีลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นบาร์โค้ดที่เป็นระเบียบไปในทิศทางเดียวกัน ถึงแม้ภาพบาร์โค้ดโดยรวมจะผิดรูป แต่ในบริเวณกรอบจำกัด เส้นบาร์โค้ดก็ยังมีลักษณะการวางตัวไปในทิศทางเดียวกันสูง ภาพที่ 3.1(ก) แสดงภาพขยายของส่วนของเส้นบาร์โค้ด ลูกศรสีแดงคือทิศทางของเกรเดียนต์ซึ่งเป็นไปในแนวเดียวกัน ในทางกลับกัน บริเวณที่เกิดปัญหาแสงสะท้อน ขอบวงของแสงสะท้อนจะมีลักษณะที่ไม่เป็นเอกรูป ลักษณะทิศทางการวางตัวจึงเป็นแบบสุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 3.1(ข) ดังนั้น ถ้าสามารถประเมินค่าทิศทางการวางตัวในกรอบจำกัดได้ ก็สามารถนำข้อมูลนั้นมาใช้จำแนกบริเวณที่เป็นบาร์โค้ดปกติได้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.1 ทิศทางของเกรเดียนต์ในบริเวณเฉพาะของบาร์โค้ด

การวัดทิศทางการวางตัวนี้ อาศัยเกรเดียนต์ซึ่งเป็นเวกเตอร์ของอนุพันธ์ความเข้มของภาพ และแสดงให้เห็นถึงทิศทางของการเปลี่ยนแปลงความเข้ม ฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ (Histogram of Oriented Gradients— HOG) ถูกนำมาใช้เป็นตัวบอกลักษณะเฉพาะตั้งต้น เพื่อวัดการกระจายตัวของทิศทางการวางตัวภายในกรอบจำกัด และนำไปหาส่วนเบี่ยงเบนทิศทางการวางตัวฐานนิยม (Modal Orientation Deviation— MOD) ซึ่งนิยามขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้เพื่อใช้เป็นกลไกวัดความเป็นทิศทางเดียวกันของการวางตัว ซึ่งสามารถนำไปใช้จำแนกบริเวณที่เกิดปัญหาในบาร์โค้ดได้ต่อไป

ในแง่ของการสร้างวิถีการตรวจที่อิงตามแนวบิดโค้งนั้น ตัวบอกลักษณะเฉพาะฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ (HOG Feature Descriptor) [1] ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อวัดการไหลในทิศทางการวางตัวหลักของเกรเดียนต์ วิถีการตรวจจะถูกเลือกให้สอดคล้องกับแนวการไหล โดยการคิดมูลค่าวิถี (path cost) เพิ่มตามทิศทางของวิถีที่เบนออกไปจากแนวการไหล

### 3.2 ภาพรวมของงานวิจัย

การถอดรหัสภาพบาร์โค้ดในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งได้เป็นสองงานหลัก คือ การสร้างวิถีการตรวจ และการถอดรหัสตามแนววิถีการตรวจ

การสร้างวิถีการตรวจเป็นขั้นตอนที่จะวิเคราะห์ภาพบาร์โค้ดและสร้างวิถีการตรวจที่เหมาะสมสำหรับการถอดรหัสในขั้นตอนต่อไป ประกอบด้วยกระบวนการย่อย ดังนี้

1. การเตรียมภาพนำเข้า
2. การคำนวณตัวบอกลักษณะเฉพาะฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์
3. การจำแนกบล็อกที่ถอดรหัสได้
4. การหาวิถีการตรวจ

การถอดรหัสตามแนววิถีการตรวจเป็นขั้นตอนการอ่านค่าความเข้มจากภาพบาร์โค้ดตามแนววิถีการตรวจ และถอดรหัสจากลำดับค่าความเข้มที่อ่านได้ ประกอบด้วยกระบวนการย่อย ดังนี้

1. การเก็บตัวอย่างตามแนววิถีการตรวจ
2. การถอดรหัสด้วยการจับคู่กับแม่แบบพลวัต

### 3.3 การเตรียมภาพนำเข้า

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้จำกัดอยู่ที่การถอดรหัสบาร์โค้ด และไม่รวมขั้นตอนการหาตำแหน่งของบาร์โค้ดในภาพถ่าย ดังนั้น ภาพบาร์โค้ดที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าจะเป็นภาพถ่ายที่ตัดมาเฉพาะส่วนที่เป็นบาร์โค้ดและบริเวณรอบ ๆ โดยพื้นที่ส่วนที่เป็นบาร์โค้ดมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 70 ของพื้นที่ภาพทั้งหมด

ภาพที่นำเข้ามาจะถูกแปลงจากปริภูมิสีแบบ RGB ไปสู่รูปแบบระดับเทา (grayscale) และปรับขนาดของภาพด้วยการย่อหรือขยายให้ความกว้างของภาพอยู่ในช่วง 300-600 จุดภาพ และให้ความสูงของภาพอยู่ในอัตราส่วนเดิมเมื่อเทียบกับความกว้าง

เงื่อนไขหนึ่งที่กำหนดในงานนี้คือ ภาพบาร์โค้ดที่นำเข้าต้องมีลักษณะการวางตัวในแนวนอนเป็นหลัก ทั้งนี้ ไม่จำเป็นต้องเป็นแนวนอนขนานกับพื้น แต่เป็นการวางตัวโดยรวมในแนวนอน โดยตัวบาร์โค้ดต้องสามารถอ่านได้จากซ้ายไปขวา

### 3.4 การคำนวณตัวบอกลิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์

การหาค่าตัวบอกลิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ เป็นไปตามขั้นตอนในหัวข้อ 2.1.4 โดยเริ่มจากการหาเกรเดียนต์สำหรับทุกจุดภาพในภาพ ตัวดำเนินการที่ใช้สำหรับหาเกรเดียนต์ได้ทดลองใช้ทั้งตัวดำเนินการมิติเดียวแบบง่าย ตัวดำเนินการโซเบล (Sobel operator) และตัวดำเนินการชาร์ (Schar operator) พบว่าให้ผลไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในที่นี้จึงเลือกใช้ตัวดำเนินการมิติเดียวแบบง่ายดังนี้

$$G_x = [-1, 0, 1] * I$$

$$G_y = [-1, 0, 1]^T * I$$

โดย  $I$  เป็นค่าความเข้มของภาพบาร์โค้ด ค่าขนาดของเกรเดียนต์สามารถหาได้จากอนุพันธ์แนวนอน  $G_x$  และอนุพันธ์แนวตั้ง  $G_y$  ดังนี้

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

และสามารถคำนวณหาทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ได้ดังนี้

$$O = \text{atan2}(G_x, G_y) \bmod \pi$$

ฟังก์ชัน  $\text{atan2}$  เป็นฟังก์ชันอาร์กแทนเจนต์สองอาร์กิวเมนต์ที่ให้ผลลัพธ์เป็นมุมในจตุภาค (quadrant) ที่ถูกต้อง ค่าทิศทางการวางตัวที่ได้จะอยู่ในช่วง  $[0, \pi)$  เนื่องจากเราไม่สนใจเครื่องหมายของทิศทาง ในที่นี้ตัวดำเนินการมอดุโลแบบจำนวนจริงจะถูกใช้เพื่อปรับค่าทิศทางการวางตัวที่อยู่ในจตุภาคที่สามและสี่ให้มาอยู่ในจตุภาคที่หนึ่งและสองตามลำดับ

ภาพเกรเดียนต์ที่ได้จะถูกแบ่งส่วนเป็นช่องขนาด  $16 \times 16$  จุดภาพ ในแต่ละช่องเกรเดียนต์ของจุดภาพภายในช่องจะถูกแบ่งแยกเป็น 9 อันตรภาคชั้นตามทิศทางการวางตัว ความกว้างของแต่ละอันตรภาคชั้นแบ่งเท่า ๆ กันจากช่วง  $[0, \pi)$  โดยแต่ละจุดภาพให้น้ำหนักในอันตรภาคชั้นของตัวเองเท่ากับขนาดของเกรเดียนต์ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการนี้ ฮิสโทแกรมที่ได้จะมีค่าในแต่ละอันตรภาคชั้นเท่ากับผลรวมของขนาดของเกรเดียนต์ทั้งหมดที่มีทิศทางการวางตัวอยู่ในช่วงของอันตรภาคชั้นนั้น ๆ

ในกระบวนการหา HOG โดยทั่วไปแล้ว กลุ่มของช่องจะถูกรวมเป็นบล็อกและทำให้เป็นบรรทัดฐานร่วมกัน แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้ขนาดของบล็อกที่ใช้คือหนึ่งช่อง ในกรณีนี้จึงถือว่าบล็อกและช่องคือสิ่งเดียวกัน และต่อไปนี้จะขอใช้คำว่าบล็อกเพียงอย่างเดียว

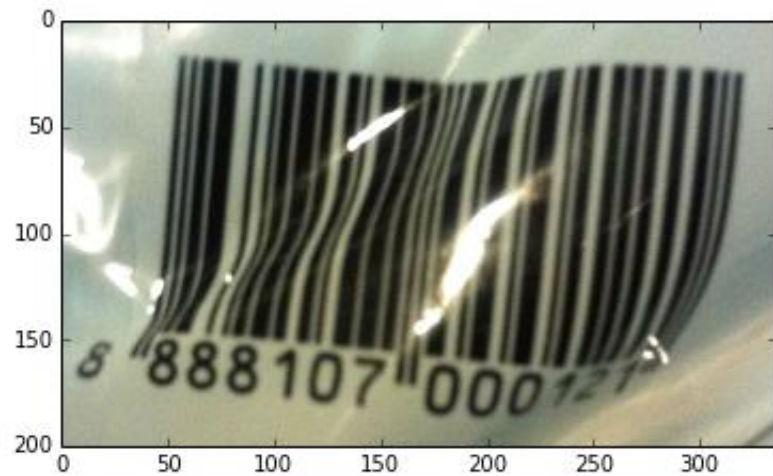
ค่าฮิสโทแกรมที่ได้ของแต่ละบล็อกอาจมีความลำเอียงอันเนื่องมาจากความสว่าง (illumination) และความต่างของส่วนมืดและสว่าง (contrast) เฉพาะที่ต่างกันในแต่ละบล็อก การทำให้เป็นบรรทัดฐาน L1-sqrt จะถูกใช้กับทุกบล็อกเพื่อปรับลดความต่างนั้น โดยกำหนด L1-sqrt ดังนี้

$$\text{L1-sqrt: } f = \sqrt{\frac{v}{\|v\|_1 + \epsilon}}$$

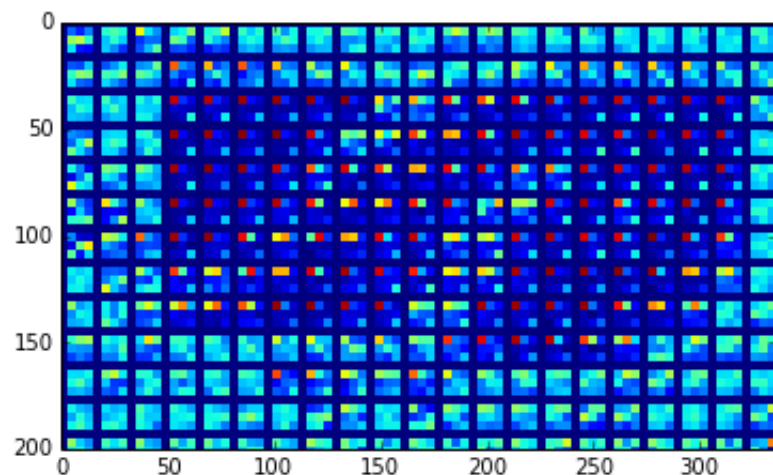
โดยที่  $v$  เป็นเวกเตอร์ของอันตรภาคชั้นของฮิสโทแกรมที่ยังไม่ได้ทำให้เป็นบรรทัดฐาน  $\|v\|_1$  เป็น L1-norm ของเวกเตอร์  $v$  และ  $\epsilon$  เป็นค่าคงที่ขนาดเล็ก ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้คือตัวบอกฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ ซึ่งจะนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

ภาพที่ 3.2 แสดงให้เห็นภาพบาร์โค้ดก่อนการประมวลผล และภาพที่ 3.3 แสดงภาพฝั่งของฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ที่ได้จากภาพที่ 3.2 สังเกตว่าบล็อกที่มีลักษณะเป็นบาร์โค้ดสมบูรณ์จะมีฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ ที่โดดเด่นเพียงหนึ่งหรือสองอันตรภาคชั้น ในขณะที่บล็อกที่เป็นแสงสะท้อนและบล็อกนอกบริเวณบาร์โค้ดจะมีการกระจายตัวของอันตรภาคชั้นที่โดดเด่นมาก





ภาพที่ 3.2 ภาพบาร์โค้ดนำเข้า



ภาพที่ 3.3 ผังแสดงฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์แบ่งเป็นช่อง ในแต่ละช่องแสดงอันตรภาคชั้นทั้ง 9 ในรูปของตารางสีเล็กขนาด  $3 \times 3$  แต่ละช่องเล็กแทนผลรวมของขนาดของเกรเดียนต์ที่มีทิศทางวางตัวตกอยู่ในอันตรภาคชั้นนั้นๆ โดยสีน้ำเงินแสดงถึงค่าน้อยและสีแดงแสดงถึงค่ามาก

### 3.5 การจำแนกบล็อกที่ถูกรหัสได้

แต่ละบล็อกในส่วนที่เป็นบาร์โค้ดในภาพบาร์โค้ดจะมีความเป็นทิศทางเดียวกันของการวางตัวสูง เนื่องจากขนาดของบล็อกที่ไม่ใหญ่ ทำให้ส่วนของบาร์โค้ดภายในบล็อกมีทิศทางวางตัวไม่แตกต่างกันมากนัก การวัดความเป็นทิศทางเดียวกันของการวางตัวกระทำโดยการนิยามตัววัดใหม่ขึ้นมาเรียกว่า ส่วนเบี่ยงเบนทิศทางวางตัวฐานนิยม (Modal Orientation Deviation—MOD) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การกระจายตัวของทิศทางวางตัวของเกรเดียนต์ในบล็อกออกจากทิศทาง

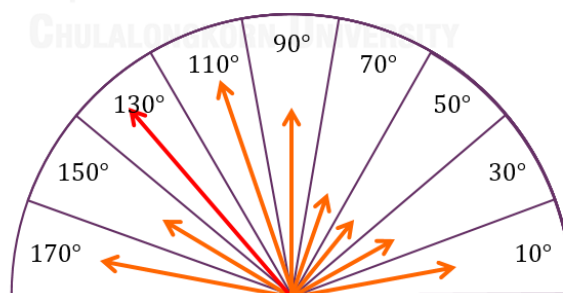
วางตัวหลัก (principal orientation) ของบล็อกนั้น กำหนดให้ทิศทางการวางตัวของอันตรภาคชั้นที่เป็นฐานนิยมของฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ของบล็อก  $B_i$  เป็นทิศทางการวางตัวหลัก ให้  $N$  เป็นจำนวนของอันตรภาคชั้นทั้งหมดซึ่งก็คือ 9 ในที่นี้ และ  $w_j^i$  เป็นขนาดของอันตรภาคชั้นที่  $j$  ของฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ของ  $B_i$  ฟังก์ชัน  $MOD(i)$  ของ  $B_i$  สามารถนิยามได้ดังนี้

$$MOD(i) = \frac{\sum_{j=1}^N w_j^i D(i, j)}{\epsilon + \sum_{j=1}^N w_j^i}$$

โดยมี  $D(i, j)$  เป็นผลต่างเชิงมุมระหว่างทิศทางการวางตัวหลักและทิศทางการวางตัวของอันตรภาคชั้นที่  $j$  ของ  $B_i$  ทั้งนี้ ทิศทางการวางตัวของอันตรภาคชั้นจะยึดค่ากลางของช่วงของอันตรภาคชั้นนั้นเป็นหลัก และเนื่องจากทิศทางการวางตัวมีลักษณะเป็นคาบในช่วง  $[0, \pi)$  ผลต่างเชิงมุมสามารถมองได้จากทั้งสองทิศ ในที่นี้จะยึดทิศที่ให้ค่าผลต่างเชิงมุมที่น้อยที่สุด ดังนั้น  $D(i, j)$  จะนิยามได้ดังนี้

$$D(i, j) = \min(|\phi_j^i - \phi_{Mo(i)}^i|, \pi - |\phi_j^i - \phi_{Mo(i)}^i|)$$

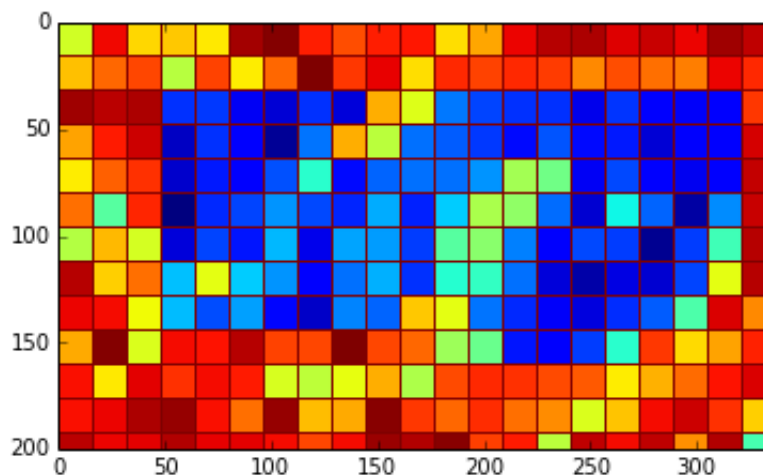
โดยให้  $\phi_j^i$  เป็นค่ากลางของทิศทางการวางตัวของอันตรภาคชั้น  $j$  ให้  $Mo(i)$  เป็นอันตรภาคชั้นหลัก ซึ่งก็คือฐานนิยมของฮิสโทแกรมทิศทางการวางตัวของเกรเดียนต์ของ  $B_i$  และ  $\phi_{Mo(i)}^i$  เป็นทิศทางการวางตัวหลัก



ภาพที่ 3.4 ขนาดของเกรเดียนต์แยกตามอันตรภาคชั้น

ภาพที่ 3.4 แสดงตัวอย่างขนาดของเกรเดียนต์แยกตามอันตรภาคชั้น ในที่นี้อันตรภาคชั้นที่มีค่ากลางของทิศทางการวางตัวเป็น 130 องศา มีขนาดของเกรเดียนต์มากที่สุดและถือเป็นอันตรภาคชั้นหลัก ระยะ  $D(i, j)$  ระหว่างทิศทางการวางตัวหลักนี้กับทิศทางการวางตัวที่ 10 องศา คือ  $\min(|10 - 130|, 180 - |10 - 130|)$  ซึ่งเท่ากับ 60 องศา ตัวอย่างผลการคำนวณค่า  $MOD$

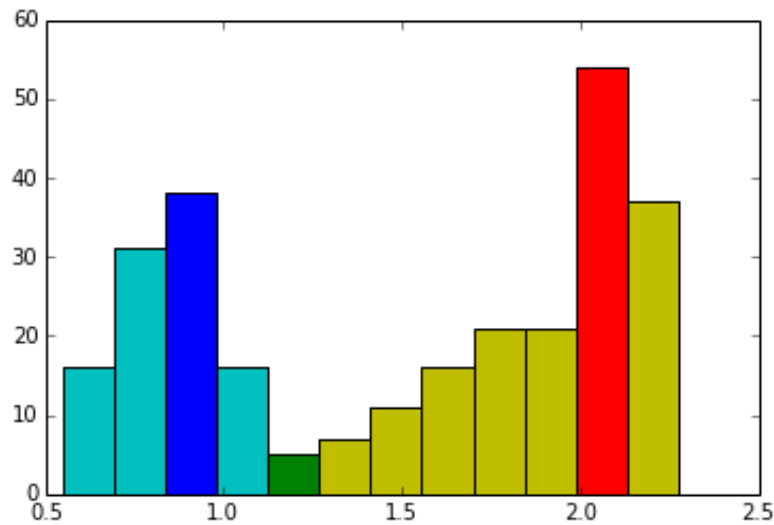
ของบาร์โค้ดในภาพที่ 3.2 แสดงเป็นผังในภาพที่ 3.5 สังเกตว่าบล็อกที่มีลักษณะบาร์โค้ดที่สมบูรณ์จะมีค่า MOD ต่ำ



ภาพที่ 3.5 ผังของค่า MOD ที่คำนวณได้สำหรับแต่ละบล็อก คำน้อยแทนด้วยสีน้ำเงินและค่ามากแทนด้วยสีแดง

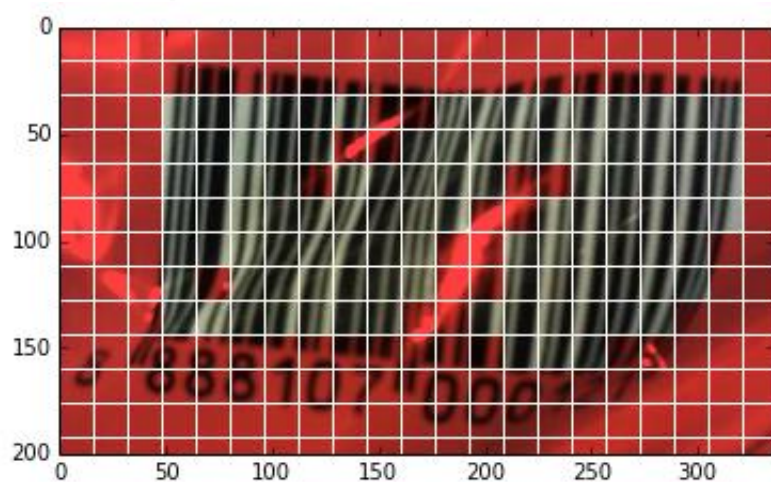
บล็อกที่มีความเป็นทิศทางเดียวกันของการวางตัวสูงจะมีค่า MOD ต่ำ การแยกบล็อกที่น่าจะเป็นบาร์โค้ดที่สมบูรณ์ออกจากบล็อกที่ไม่ใช่บาร์โค้ดและบล็อกที่มีลักษณะบกพร่องสามารถกระทำได้โดยการหาค่าขีดแบ่งที่เหมาะสม ซึ่งในที่นี้จะคำนวณจากฮิสโทแกรมของ MOD จากทั้งภาพ ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. คำนวณค่า MOD สำหรับทุกบล็อกในภาพ
2. นำค่า MOD สูงสุดและต่ำสุดและต่ำสุดแบ่งเป็นช่วงอันตรายภาคชั้นทั้งหมด 12 ช่วง
3. หาค่าขีดแบ่งทวิฐานนิยมที่เหมาะสม ซึ่งในที่นี้ใช้การแบ่งปริมาณประชากรในฮิสโทแกรมอย่างละครึ่ง แล้วหาอันตรายภาคชั้นที่สูงที่สุดของแต่ละครึ่ง จากนั้นจึงหาอันตรายภาคชั้นที่ต่ำที่สุดที่อยู่ระหว่างอันตรายภาคชั้นที่สูงที่สุดทั้งสอง ค่ากลางของอันตรายภาคชั้นที่ต่ำที่สุดนี้จะใช้เป็นค่าขีดแบ่งดังตัวอย่างในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ฮิสโทแกรมของ MOD อันตรภาคชั้นสีน้ำเงินและสีแดงแทนยอดของแต่ละครั้งของประชากร และอันตรภาคชั้นสีเขียวเป็นค่าต่ำสุดระหว่างยอดทั้งสองและถูกเลือกเป็นค่าขีดแบ่ง

บล็อกที่มีค่า MOD ต่ำกว่าค่าขีดแบ่งจะถูกเลือกเป็นบล็อกที่น่าจะใช้ถอดรหัสได้ สิ่งรบกวน เช่น แสงสะท้อน มักจะสร้างเกรเดียนต์ที่กระจายไปทุกทิศทาง ทำให้บล็อกที่มีสิ่งรบกวนนั้นอยู่มีผลลัพธ์ค่า MOD สูง และถูกกรองออกในที่สุด นอกจากนี้ บล็อกที่ผ่านเกณฑ์ค่า MOD แต่อยู่โดด ๆ หรือจับเป็นกลุ่มเล็ก ๆ ขนาดต่ำกว่าค่าที่กำหนดก็สามารถกรองออกได้เช่นกัน ภาพที่ 3.7 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์การกรองบล็อกด้วยค่า MOD



ภาพที่ 3.7 บล็อกที่มีสีแดงคือบล็อกที่ถูกกรองออกด้วยค่าขีดแบ่งจาก MOD

### 3.6 การหาวิถีกราฟตรวจ

วิถีกราฟตรวจคือ เซ็ตของส่วนของเส้นตรงที่เชื่อมต่อกันและตัดผ่านบาร์โค้ดเป็นแนวกราฟตรวจ การจัดเรียงตัวของส่วนของเส้นตรงเหล่านี้เป็นไปเพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งแปลกปลอมในภาพบาร์โค้ด เพื่อให้ได้ผลการอ่านค่าระดับความเข้มที่ถูกต้องตลอดแนวของวิถีกราฟตรวจ ทั้งนี้ นิยามของวิถีกราฟตรวจในวิทยานิพนธ์นี้จะมีความแตกต่างจากนิยามเดิมในงานวิจัย [8] ซึ่งในงานนั้น วิถีกราฟตรวจจะประกอบขึ้นจากส่วนของวิถีกราฟตรวจย่อย ๆ ตามตำแหน่งของเลขรหัสแต่ละหลัก โดยที่แต่ละส่วนไม่จำเป็นต้องต่อเนื่องกัน ในขณะที่วิถีกราฟตรวจตามนิยามในวิทยานิพนธ์นี้จะต้องมีลักษณะต่อเนื่องส่วนของเส้นตรงที่อยู่ติดจากกันที่ประกอบขึ้นเป็นวิถีกราฟตรวจจะต้องมีปลายที่เชื่อมต่อกัน

การหาวิถีกราฟตรวจ เริ่มต้นจากการสร้างกราฟกราฟตรวจด้วยข้อมูลของบล็อกที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้า อัลกอริทึมค้นหาเส้นทาง  $A^*$  ถูกเลือกมาใช้ค้นหาวิถีกราฟตรวจจากกราฟกราฟตรวจที่ได้จากบาร์โค้ด แต่ละบล็อกจะมีมูลค่าวิถี (path cost) ที่ผ่าน ขึ้นอยู่กับผลต่างเชิงมุมระหว่างส่วนของวิถีกราฟตรวจที่ตัดผ่านบล็อกกับเกรเดียนต์ของบล็อกนั่นเอง การสร้างกราฟกราฟตรวจ เริ่มต้นจากการวางจุดยอด (vertex) ไว้ที่จุดภาพกลางของทุกบล็อกที่ผ่านการคัดเลือกจากขั้นตอนก่อนหน้า สำหรับแต่ละคู่จุดยอด  $(v_i, v_j)$  ที่มีระยะห่างอยู่ภายในระยะที่กำหนด จะกำหนดเส้นเชื่อม (edge)  $e_{i,j}$  ขึ้นก็ต่อเมื่อ  $v_i$  อยู่ในสมมติทางซ้ายของ  $v_j$  และเส้นเชื่อมไม่ตัดผ่านบล็อกที่ไม่ผ่านการคัดเลือก กลุ่มจุดยอดทางซ้ายสุดจะถูกเลือกเป็นต้นทาง และกลุ่มจุดยอดทางขวาสุดจะถูกเลือกเป็นปลายทาง ฟังก์ชันมูลค่าวิถีที่เลือกใช้เป็นฟังก์ชันศึกษาสำนึก (heuristic function) คือฟังก์ชันระยะทางยูคลิด (Euclidean distance) มูลค่าวิถีที่แท้จริงจะกำหนดดังรายละเอียดต่อไปนี้

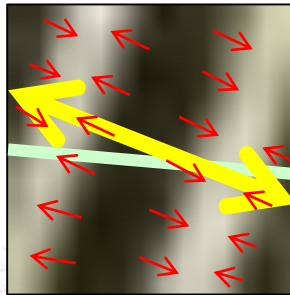
ในขั้นแรก นิยามให้การไหล  $FLOW(i)$  ของบล็อก  $B_i$  เป็นเวกเตอร์เชิงมุม  $(W_i, \Phi_i)$  โดย  $W_i$  แทนน้ำหนักที่ฉายลงบนทิศทางการวางตัวหลัก และ  $\Phi_i$  แทนทิศทางการวางตัวหลัก ค่าของ  $FLOW(i)$  กำหนดดังนี้

$$FLOW(i) = (W_i, \Phi_i) = \left( \sum_{j=1}^N w_j^i \cos D(i, j), \phi_{Mo(i)}^i \right)$$

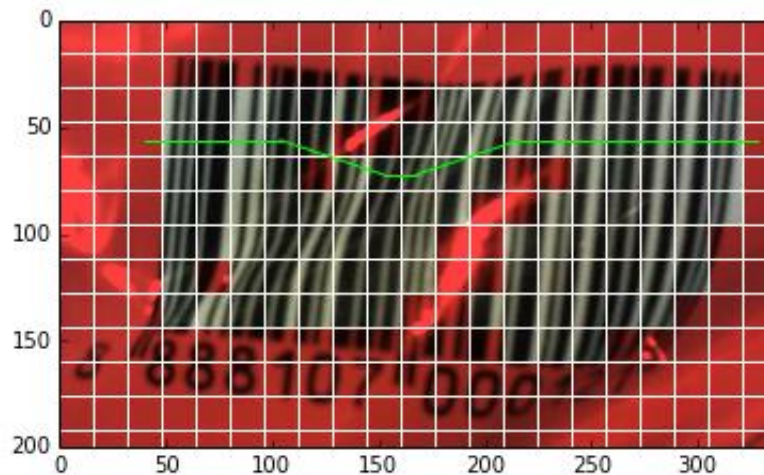
ส่วนของวิถีที่ไม่สอดคล้องกับการไหลจะถูกคิดมูลค่าวิถีให้สูงกว่าส่วนของวิถีที่เดินไปตามแนวการไหล และยิ่งการไหลมีน้ำหนักมากเท่าใด มูลค่าที่เพิ่มขึ้นไปก็ยิ่งสูงขึ้นไปด้วย กำหนดวิถี  $P = (v_1, v_2, \dots, v_n)$  ซึ่งมี  $e_{i,j}$  เชื่อมต่อ  $v_i$  และ  $v_j$   $e_{i,j}$  สามารถแบ่งเป็นเส้นเชื่อมย่อยตามจุดตัดขอบเขตของบล็อกที่  $e_{i,j}$  ผ่าน ให้  $e_k$  เป็นเส้นเชื่อมย่อยที่ตัดผ่านขอบเขตและอยู่ภายในบล็อก  $B_k$  ให้  $\alpha$  เป็นน้ำหนักของมูลค่าที่เกิดขึ้นจากการไหล และให้  $\Phi_{e_k}$  เป็นทิศทางการวางตัวของ  $e_k$  มูลค่าวิถีของ  $e_k$  จะคำนวณได้ดังนี้

$$f(e_k) = |e_k| \cdot (1 + \alpha W_k \sin^2(\Phi_{e_k} - \Phi_k))$$

ภาพที่ 3.8 แสดงภาพตัวอย่างทิศทางของ FLOW (ลูกศรใหญ่สองทิศทาง) เมื่อเทียบกับกระแสน้ำของบล็อก และส่วนของวิถีการตรวจที่ตัดผ่านบล็อก (แถบสีเขียวแนวอนกลางภาพ) ขนาดของ FLOW และมุมที่ FLOW ทำกับส่วนของวิถีการตรวจจะเป็นตัวกำหนดมูลค่าวิถีของส่วนของวิถีการตรวจส่วนนี้ ตัวอย่างของวิถีการตรวจที่ได้จากอัลกอริทึม A\* บนกราฟการตรวจที่สร้างจากเงื่อนไขและฟังก์ชันมูลค่าข้างต้นแสดงไว้ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.8 ทิศทางของ FLOW และส่วนของวิถีการตรวจที่ตัดผ่านบล็อก



ภาพที่ 3.9 ตัวอย่างวิถีการตรวจที่ได้เป็นผลลัพธ์

### 3.7 การเก็บตัวอย่างตามแนววิถีการตรวจ

การกราดตรวจจะกระทำในระดับจุดภาพย่อย (subpixel) โดยใช้การประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้นคู่ (bilinear interpolation) เหตุที่ใช้การอ่านค่าในระดับจุดภาพย่อย เนื่องจากวิถีการตรวจมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นตลอดแนวความยาวอันเนื่องมาจากการตัดผ่านบล็อกที่มีการไหลต่างกันและทำให้ระยะฉายลงของส่วนของวิถีการตรวจแปรไปตามบล็อกที่ตัดผ่าน ตำแหน่งที่ใช้เก็บตัวอย่าง (sampling) ค่าความเข้มตามแนววิถีการตรวจจึงต้องเป็นค่าที่ไม่เป็นจำนวนเต็มไปโดยปริยาย

นอกจากนี้ จากการทดลองพบว่า การกำหนดระยะเก็บตัวอย่างที่หยابเกินไปทำให้ได้ผลลัพธ์การเก็บตัวอย่างที่ไวต่อการเลื่อนตำแหน่งมาก ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเพียงเล็กน้อยก็สามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคะแนนความคล้ายเมื่อเทียบแม่แบบได้อย่างมาก การใช้ระยะเก็บตัวอย่างที่ละเอียดขึ้นช่วยลดผลจากความคลาดเคลื่อนของการเลื่อนตำแหน่งได้มาก การเก็บตัวอย่างในระดับจุดภาพย่อยทำให้สามารถใช้ระยะเก็บตัวอย่างที่ละเอียดขึ้นได้โดยไม่ต้องใช้ภาพที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งต้องใช้กำลังในการประมวลผลเพิ่มขึ้น

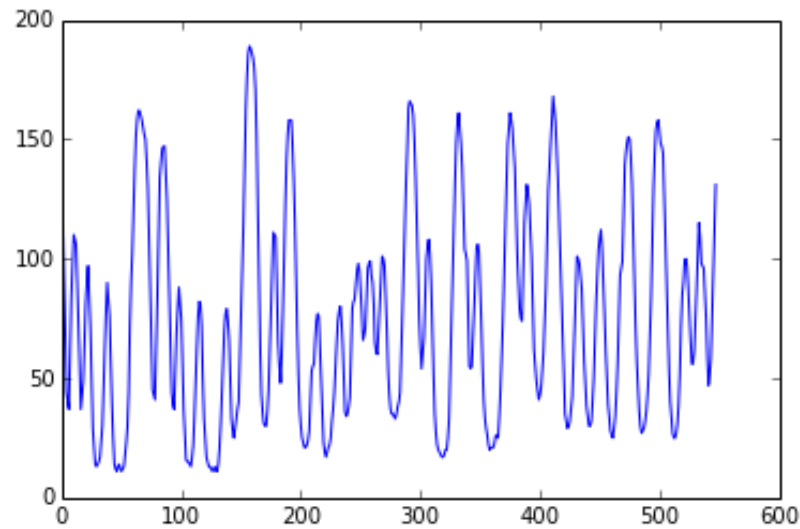
การหาระยะเก็บตัวอย่างจะพิจารณาจากความแตกต่างของทิศทางกราดตรวจตัวของส่วนของวิถีกราดตรวจและการไหลของบล็อกที่ตัดผ่าน สมมติว่าไม่พิจารณาความบิดเบือนจากมุมมอง ถ้าส่วนของวิถีกราดตรวจทำมุม  $\theta$  กับการไหลของบล็อก ระยะเก็บตัวอย่างสำหรับส่วนของวิถีกราดตรวจนี้จะเป็น  $T \sec \theta$  ในขณะที่ระยะเก็บตัวอย่างของส่วนของวิถีกราดตรวจที่สอดคล้องกับการไหลโดยสมบูรณ์คือ  $T$  ทั้งนี้ เพื่อให้ระยะเก็บตัวอย่างที่ฉายลงตามแนวการไหลคงที่ตลอดแนววิถีกราดตรวจ

ลำดับตัวอย่างที่เก็บได้จะมีส่วนทางด้านซ้ายและขวาของลำดับที่อยู่นอกขอบเขตของบาร์โค้ดเกินมาด้วย การตัดขอบซ้ายขวาออกเพื่อนำไปถอดรหัสในขั้นตอนต่อไปจะอ้างอิงวิธีการที่ระบุใน [6] กำหนดให้  $l(n)$  เป็นค่าความเข้ม ณ ตำแหน่งที่  $n$  ของลำดับตัวอย่างขนาด  $N$  ตัวอย่าง ตำแหน่งตัดทางซ้าย  $o_L$  และตำแหน่งตัดทางขวา  $o_R$  หาได้จากการกวาดเข้าจากด้านนอกและหาค่าเฉลี่ยความเข้ม ตำแหน่งแรกที่มีค่าความเข้มน้อยกว่า 85% ของค่าเฉลี่ยจากจุดนอกสุดมาถึงตำแหน่งนั้นจะถือเป็นตำแหน่งตัด ดังที่กำหนดต่อไปนี้

$$o_L: l(o_L) < 0.85 \cdot \frac{\sum_{n=1}^{o_L-1} l(n)}{o_L - 1}$$

$$o_R: l(o_R) < 0.85 \cdot \frac{\sum_{n=o_R+1}^N l(n)}{N - o_R}$$

ภาพที่ 3.10 แสดงลำดับตัวอย่างที่เก็บได้จากวิถีกราดตรวจที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้า ลำดับตัวอย่างในภาพนี้ได้ตัดขอบซ้ายและขวาตามเงื่อนไขข้างต้นแล้ว



ภาพที่ 3.10 ลำดับตัวอย่างที่เก็บได้จากวิธีการตรวจและตัดขอบซ้ายขวาแล้ว

### 3.8 การถอดรหัสด้วยการจับคู่กับแม่แบบพลวัต

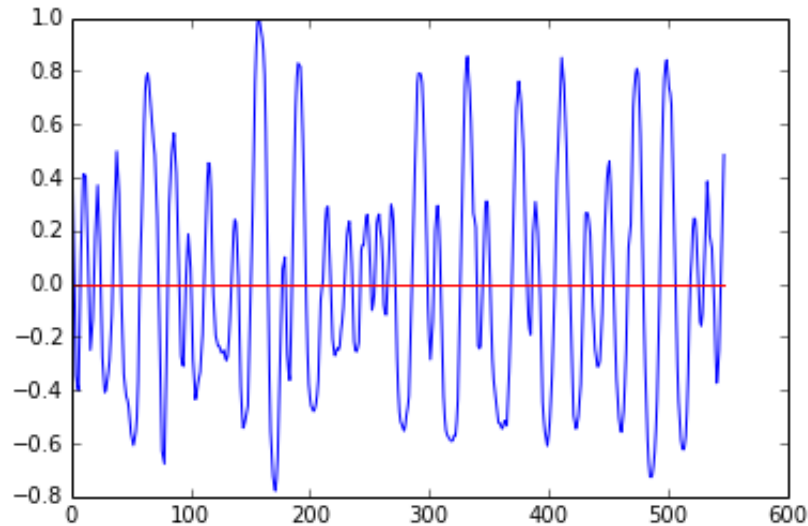
ลำดับตัวอย่าง  $L$  ที่เก็บได้จะถูกถอดรหัสโดยการนำมาจับคู่กับชุดแม่แบบที่สร้างขึ้นแบบพลวัต เนื่องจากบาร์โค้ดมีลักษณะผิดรูป จึงคาดได้ว่าเลขรหัสบน  $L$  จะมีการเลื่อนตำแหน่ง (shifting) และการปรับขนาด (scaling) เกิดขึ้น เป้าหมายของขั้นตอนนี้คือการหาการเลื่อนตำแหน่งและการปรับขนาดที่เกิดขึ้นสำหรับแต่ละหลักของเลขรหัสที่จะทำให้ค่าความผิดพลาดรวมของการจับคู่ต่ำที่สุด กล่าวคือ จะต้องคำนวณหา

$$C(A) = \sum_{k=1}^{12} \min_{0 \leq n \leq 9} M(L, T_{n,k}(o_k, w_k))$$

โดยที่  $A$  เป็นการจัดวาง  $(o_1, o_2, \dots, o_{12})$  และ  $o_k + w_k = o_{k+1}$  ยกเว้นกรณีที่  $k = 6$  ซึ่งจะเป็นไปตามเงื่อนไข  $o_6 + w_6 < o_7 - w_7$  กำหนดให้  $o_k$  และ  $w_k$  เป็นตำแหน่งและความกว้างของรหัสที่  $k$  บนลำดับตัวอย่าง  $L$  และ  $w_g$  กำหนดให้เป็นความกว้างน้อยที่สุดของชุดเส้นป้องกันกลางของบาร์โค้ด  $M(L, T_{n,k}(o_k, w_k))$  เป็นฟังก์ชันระยะห่างระหว่าง  $L$  กับฟังก์ชันแม่แบบ  $T_{n,k}$  ของเลข  $n$  ที่ตำแหน่งรหัสที่  $k$  เป้าหมายคือการหาการจัดวาง  $A$  ที่ทำให้ค่ามูลค่ารวม  $C(A)$  ต่ำที่สุด ในการหาการจัดวางนี้ อยู่ภายใต้เงื่อนไขของค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ  $o_k$  และ  $w_k$  ซึ่งกำหนดให้เป็นตำแหน่งของจุดตัดศูนย์ (zero-crossing point) ที่อยู่ภายในระยะขอบที่เฝ้าเอาไว้สำหรับความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งและขนาดในอุดมคติของรหัสที่  $k$  กระบวนการหาการจัดวางนี้กระทำโดยการใช้การโปรแกรมแบบพลวัตบนเงื่อนไขที่กำหนดข้างต้น

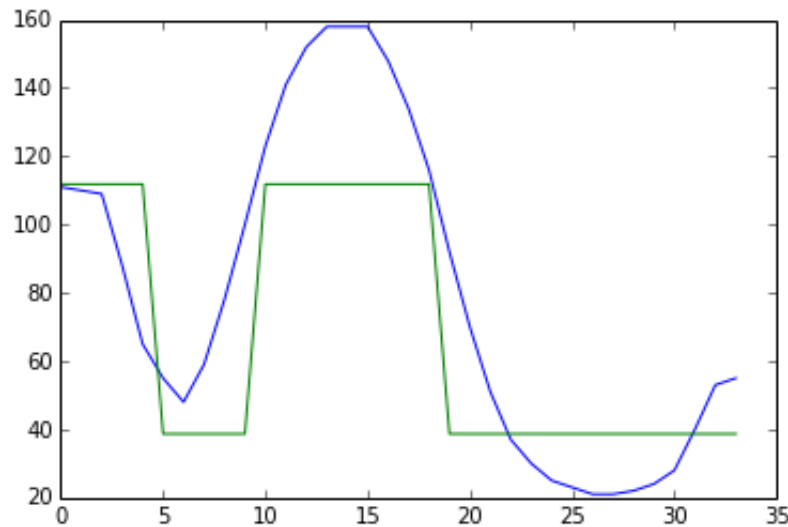


ชุดของตำแหน่งของจุดตัดศูนย์จะใช้ในกำหนดตำแหน่งบน  $L$  เพื่อจับคู่ การหาตำแหน่งจุดตัดศูนย์ชุดนี้จะเริ่มจากการทำค่าสุ่มแต่ละค่าให้เป็นบรรทัดฐานเฉพาะที่ด้วยหน้าต่างเฉลี่ยเคลื่อนที่ขนาดเล็กเพื่อที่จะปรับลดความแตกต่างเฉพาะที่ของความสว่างและความต่างของส่วนมืดและสว่าง กระบวนการนี้จะส่งผลให้ลำดับตัวอย่างยืดตรงและแกว่งอยู่รอบแกนศูนย์มากขึ้นดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ลำดับตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานเฉพาะที่เพื่อใช้หาจุดตัดศูนย์ ลำดับตัวอย่างนี้ไม่ได้ใช้ในการจับคู่กับแม่แบบพลวัตเนื่องจากความบิดเบือนจากการทำให้เป็นบรรทัดฐานเฉพาะที่

ลำดับตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานเฉพาะที่นี้จะนำไปใช้เพื่อการหาเซตของจุดตัดศูนย์เท่านั้น เนื่องจากการทำให้เป็นบรรทัดฐานเฉพาะที่ทำให้เกิดการบิดเบือนค่าของลำดับตัวอย่างและส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการจับคู่กับแม่แบบ การจับคู่จริงนั้นจะใช้ลำดับตัวอย่างเดิมที่ไม่ได้ทำให้เป็นบรรทัดฐาน แต่ตำแหน่งที่ใช้จับคู่จะอ้างอิงจากจุดตัดศูนย์ที่ได้จากลำดับตัวอย่างที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว ภาพที่ 3.12 แสดงตัวอย่างหนึ่งของลำดับตัวอย่างที่ตัดมา ณ จุดตัดศูนย์และนำมาเทียบกับแม่แบบที่ใกล้เคียง รูปแบบของแม่แบบของเลขรหัสต่าง ๆ ทั้งหมดอ้างอิงได้จากภาคผนวก



ภาพที่ 3.12 เปรียบเทียบลำดับตัวอย่างของรหัสหนึ่งกับแม่แบบที่คู่กัน ในที่นี้เลขรหัสคือ 0 ที่ภาวะคู่

การเปรียบเทียบลำดับตัวอย่างกับแม่แบบจะอ้างอิงฟังก์ชันระยะห่างใน [6] ซึ่งนิยามดังนี้

$$D(l(n), -1) = \frac{\max(l(n) - \mu_b, 0)^2}{2\sigma^2}$$

$$D(l(n), 1) = \frac{\min(l(n) - \mu_w, 0)^2}{2\sigma^2}$$

กำหนดให้  $\mu_b$  เป็นค่าเฉลี่ยจากค่า 50% ที่ต่ำที่สุดของ  $l(n)$  และ  $\mu_w$  เป็นค่าเฉลี่ยจากค่า 50% ที่สูงที่สุดของ  $l(n)$  และ  $\sigma^2$  เป็นความแปรปรวน ดังนั้น ในที่นี้  $\mu_b$  และ  $\mu_w$  จะเป็นตัวแทนของระดับค่าที่นับว่าเป็นเส้นสีดำและเส้นสีขาว ฟังก์ชันระยะห่างจะเทียบค่าในแต่ละตำแหน่งเทียบกับค่าที่ควรจะเป็นเมื่อแม่แบบที่นำมาเทียบเป็นสีดำ (-1) หรือสีขาว (1) ในตำแหน่งนั้น ๆ ฟังก์ชันนี้จะเน้นที่ค่าจาก  $l(n)$  ที่มีระยะกระจัด (displacement) จากศูนย์น้อยกว่าค่าเฉลี่ยทางฝั่งนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้คือชุดของเลขรหัส 13 หลักตามรูปแบบบาร์โค้ด EAN-13 ที่ได้จากการจัดวางที่ให้ค่ามูลค่ารวมต่ำที่สุด

การตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์จะกระทำสองจุด จุดแรกเมื่อเทียบค่าจนได้เลขรหัสหลักแรกแล้ว (หลักที่ 2-7) ค่าภาวะคู่และคี่ของเลขรหัสทั้งหกหลักจะถูกนำไปเทียบกับค่าในตารางที่ 2.2 ซึ่งถ้าตรงกันก็จะได้เลขรหัสของหลักที่ 1 แต่ถ้าไม่ตรง เลขรหัสที่ได้มาถือว่าไม่ถูกต้อง จุดที่สองเมื่อได้เลขรหัสครบทุกหลักแล้ว จะคำนวณค่าผลรวมตรวจสอบ (checksum) จากหลักที่ 1-12 แล้วเทียบกับค่าของหลักที่ 13 ซึ่งถ้าไม่ตรงกัน เลขรหัสทั้งชุดนั้นจะถูกพิจารณาว่าไม่ถูกต้อง

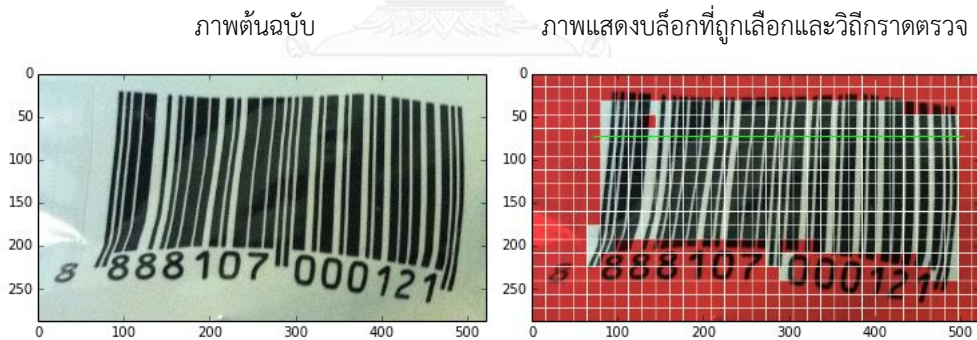
## บทที่ 4 การประเมินและการวัดผล

### 4.1 ระบบที่ใช้ทดสอบ

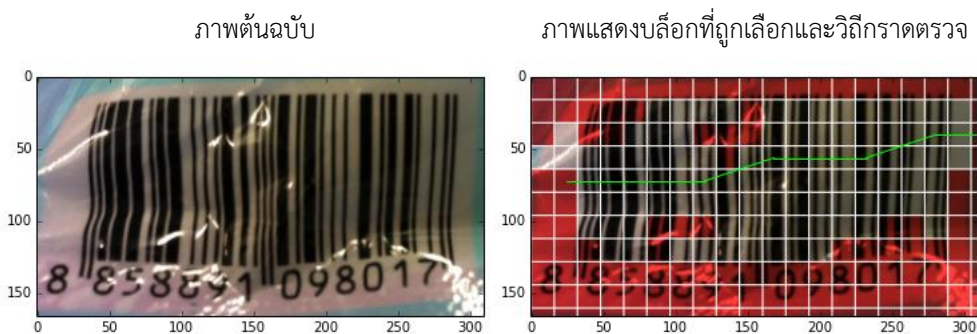
งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบทดสอบขึ้นด้วยภาษา Python 2.7 และใช้ไลบรารีประมวลผลภาพ OpenCV 2.4.9 เพื่อปรับขนาดและปริภูมิสีของภาพและคำนวณเกรเดียนต์ บาร์โค้ดที่ใช้ทดสอบเป็นแบบแผนสัญลักษณ์ EAN-13 และ UPC-A ถ่ายด้วยกล้องด้านหลังของ iPhone 4 และใช้บาร์โค้ดอีกส่วนหนึ่งจากคลังบาร์โค้ดของงานอื่นที่เกี่ยวข้อง

### 4.2 ผลการทดสอบกับชุดภาพบาร์โค้ดที่ถ่ายเอง

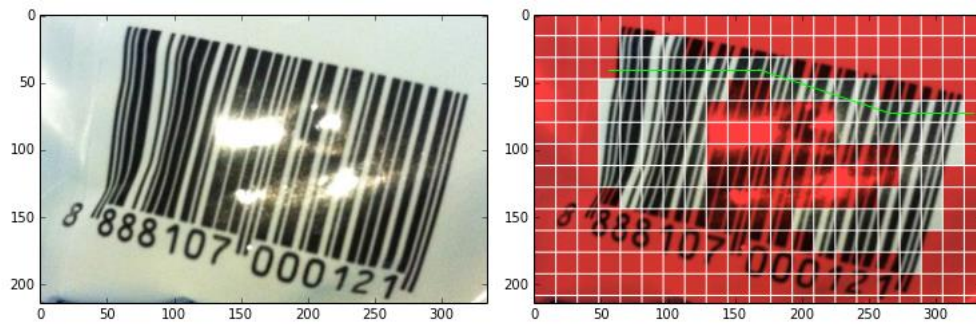
ภาพที่ 4.1-ภาพที่ 4.5 แสดงผลการหาวิถีกราดตรวจจากชุดภาพบาร์โค้ดที่ถ่ายด้วยกล้องด้านหลังของ iPhone 4 ภาพทางด้านซ้ายคือภาพบาร์โค้ดที่ตัดมาแล้ว ภาพทางด้านขวาแสดงการแบ่งและคัดเลือกล็อก และวิถีกราดตรวจที่ได้เป็นผลลัพธ์



ภาพที่ 4.1 ภาพทดสอบกรณีปกติ



(ก)

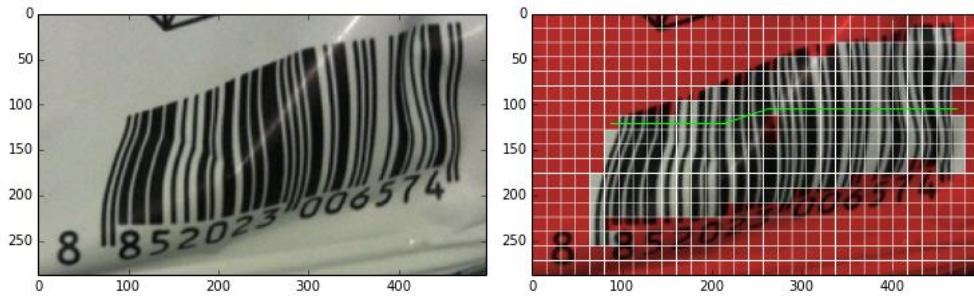


(ข)

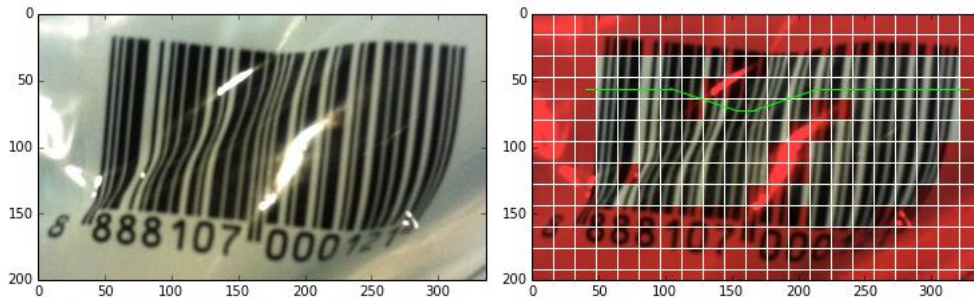
ภาพที่ 4.2 ภาพทดสอบกรณีมีแสงสะท้อนทั่วไป

ภาพต้นฉบับ

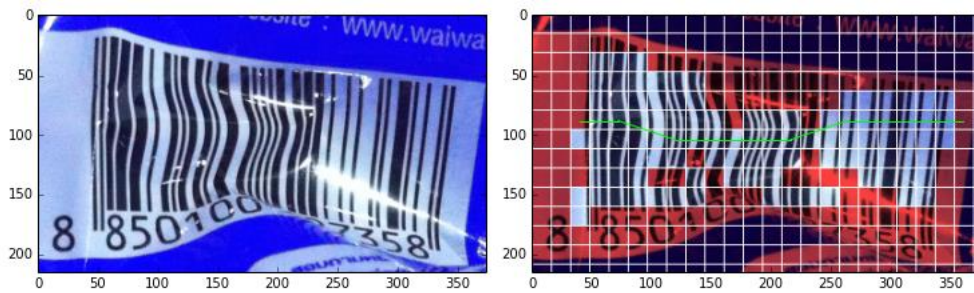
ภาพแสดงบล็อกที่ถูกเลือกและวิถีการตรวจ



(ก)

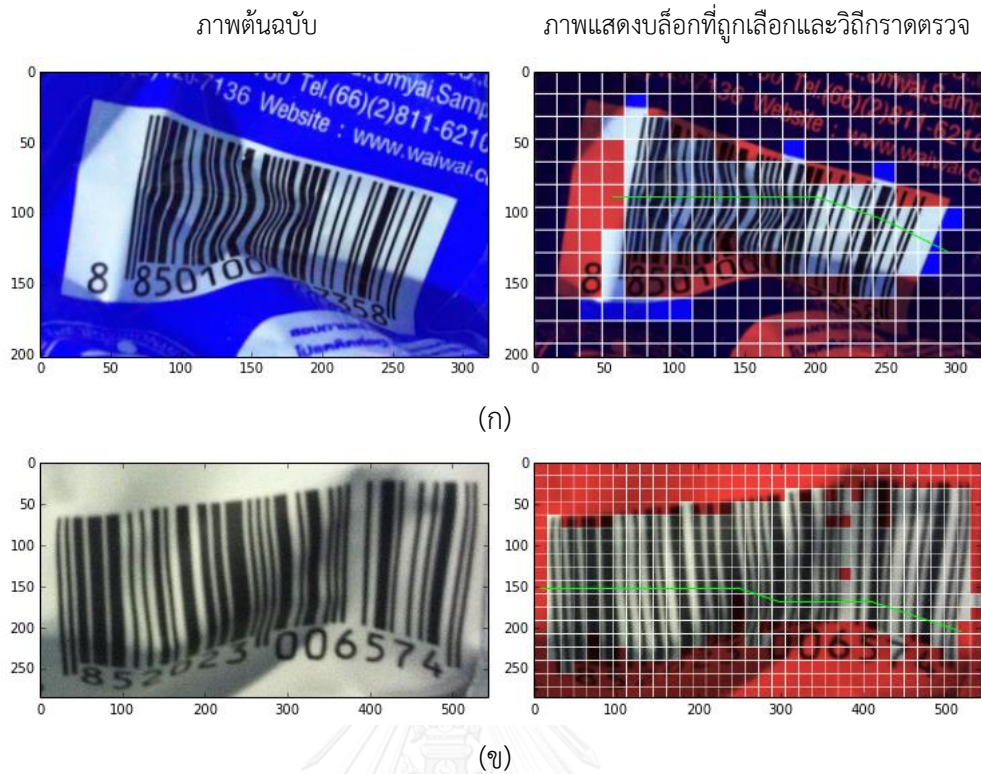


(ข)

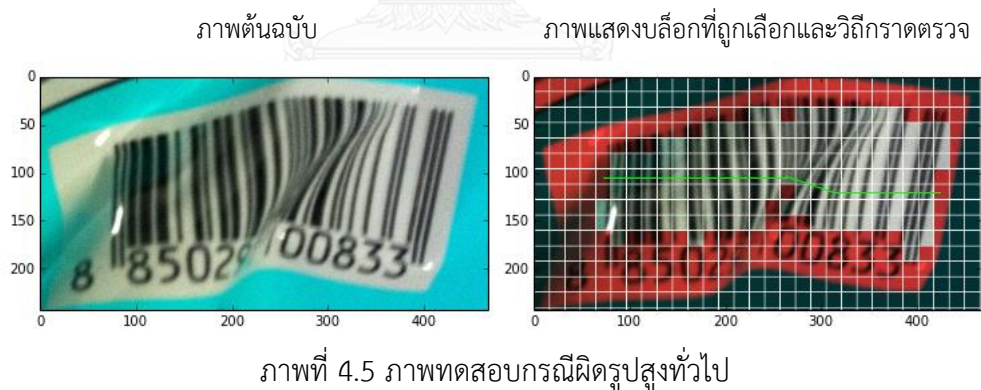


(ค)

ภาพที่ 4.3 ภาพทดสอบกรณีผิดรูปสูงและมีแสงสะท้อน



ภาพที่ 4.4 ภาพทดสอบกรณีผิดรูปสูงและความสว่างไม่เสมอกัน



ภาพที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 เป็นภาพที่มีลักษณะการผิดรูปเล็กน้อย และภาพที่ 4.3-ภาพที่ 4.5 แสดงถึงลักษณะการผิดรูปสูง โดยภาพที่ 4.2(ข) และภาพที่ 4.3(ข)-(ค) แสดงให้เห็นแสงสะท้อนที่ทอดผ่านบริเวณส่วนใหญ่ในแนวขวางของบาร์โค้ด เหลือพื้นที่ว่างแคบ ๆ ที่สามารถอ่านได้ ภาพที่ 4.4 แสดงสิ่งรบกวนในลักษณะของเงาซึ่งทำให้ความสว่างในภาพไม่เสมอกัน วิธีการที่นำเสนอสามารถสร้างวิถีการตรวจสำหรับภาพที่ 4.1-ภาพที่ 4.5 ได้ทั้งหมด

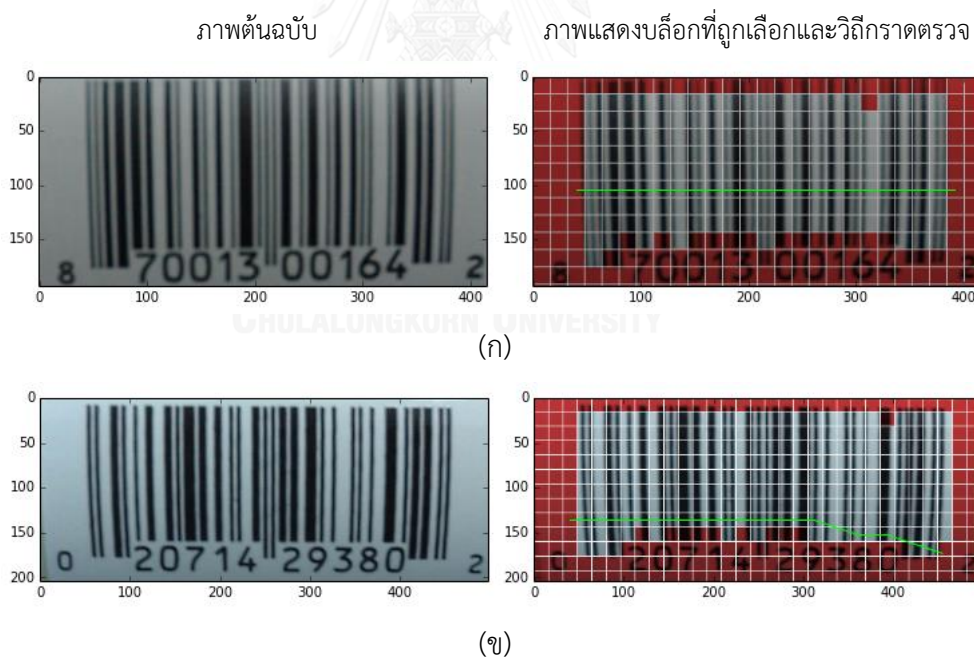
อย่างไรก็ดี ในขั้นตอนการถอดรหัส วิธีการที่นำเสนอสามารถถอดรหัสได้เฉพาะภาพที่ 4.1-ภาพที่ 4.4 แต่ไม่สามารถถอดรหัสภาพที่ 4.5 ได้ เนื่องจากจากลักษณะการผิดรูปที่สูงมากบริเวณกลาง

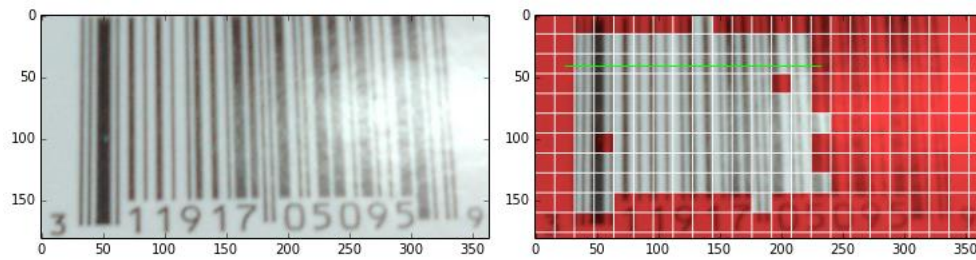
บาร์โค้ด ทำให้เส้นบาร์โค้ดกระจุกรวมกันในแนวที่วิถีกราดตัวตัดผ่าน การอ่านค่าความเข้มที่ได้บริเวณนี้จะมีลักษณะการแบ่งแยกระหว่างเส้นดำกับเส้นขาวที่ไม่ชัดเจน

#### 4.3 ผลการทดสอบกับชุดภาพจากงานอื่น

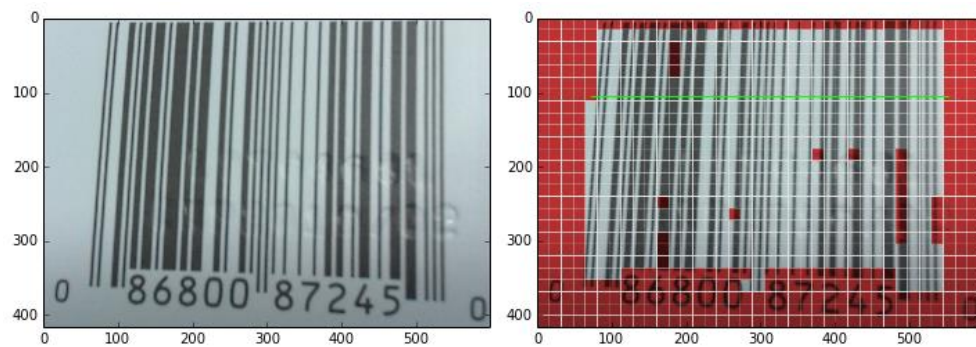
นอกจากชุดภาพบาร์โค้ดที่ถ่ายเอง ได้มีการทดสอบกับภาพบาร์โค้ดจากแหล่งอื่นด้วย ภาพบาร์โค้ดที่ทดสอบในส่วนนี้มาจาก [http://www.ski.org/Rehab/Coughlan\\_lab/BLaDE/](http://www.ski.org/Rehab/Coughlan_lab/BLaDE/) ซึ่งเป็นภาพบาร์โค้ดชุดที่ใช้ทดสอบใน [5] และ [6] ภาพบาร์โค้ดชุดนี้เป็นภาพบาร์โค้ดปกติที่ไม่มีลักษณะการผิดรูปสูง แต่จะเป็นชุดภาพที่เกิดปัญหาจากความพร่ามัว (blur) และความต่างของส่วนมืดและสว่างในภาพ (contrast)

อย่างไรก็ตาม การทดสอบกับภาพบาร์โค้ดชุดนี้เป็นไปเพื่อความสมบูรณ์ของชุดทดสอบ วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้เน้นการแก้ปัญหาจากความพร่ามัวสูงและความต่างของส่วนมืดและสว่างต่ำในภาพบาร์โค้ด ผลการทดสอบที่ได้อาจใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป





(ค)

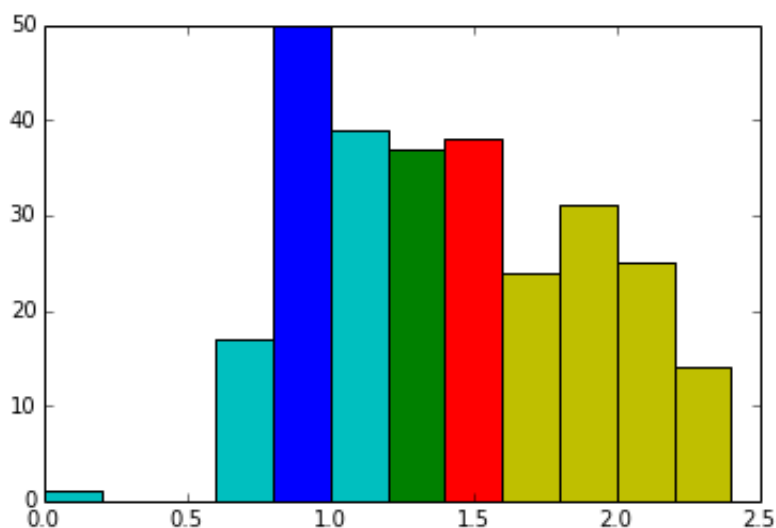


(ง)

ภาพที่ 4.6 ชุดภาพทดสอบจากแหล่งอื่น

(ที่มา: [http://www.ski.org/Rehab/Coughlan\\_lab/BLaDE/](http://www.ski.org/Rehab/Coughlan_lab/BLaDE/))

ภาพที่ 4.6 แสดงผลลัพธ์การหาวิถีการตรวจจากภาพบาร์โค้ดที่มาจากแหล่งอื่น วิธีการที่นำเสนอสามารถถอดรหัสได้ถูกต้องสำหรับภาพที่ 4.6(ก), (ข) และ (ง) แต่ไม่สามารถหาวิถีการตรวจที่ถูกต้องสำหรับภาพที่ 4.6(ค) ได้ ปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการแบ่งกลุ่มบล็อกที่ถอดรหัสได้ด้วยฮิสโทแกรมของค่า MOD ซึ่งในกรณีนี้เกิดความผิดพลาดขึ้นจากวิธีการที่ใช้ในการเลือกขีดแบ่ง ซึ่งไม่สามารถเลือกอันตรภาคขั้นที่สูงที่สุดของกลุ่มหลังให้เหมาะสมได้ ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ฮิสโทแกรมจากค่า MOD ของบาร์โค้ดในภาพที่ 4.6(ค)

#### 4.4 ผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้การแบ่งทวิภาคในการหาวิธีการตรวจ

ในงานเดิมของผู้วิจัย [8] ซึ่งเป็นงานแรกที่อิงวิธีการตรวจ วิธีการที่นำเสนอจะอาศัยการแบ่งทวิภาค (binarization) ในภาพระดับเทาของบาร์โค้ด เมื่อทดสอบกับภาพที่ 4.1-ภาพที่ 4.5 ผลการถอดรหัสถูกต้องยกเว้นในภาพที่ 4.4(ข) และภาพที่ 4.5 ในภาพจากแหล่งอื่นสามารถถอดรหัสภาพที่ 4.6(ข) และ (ง) ได้ แต่ไม่สามารถถอดรหัสภาพที่ 4.6(ก) และ (ค)

ปัญหาหลักของวิธีการเดิมคือการแบ่งทวิภาค ซึ่งจะมีปัญหามากในกรณีที่ความต่างของส่วนมืดและสว่างต่ำและกรณีที่มีเงามืดในภาพ ซึ่งปัญหาทั้งสองนี้ วิธีการใหม่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้สามารถจัดการได้ดีขึ้น และสามารถหาวิธีการตรวจได้สำเร็จในเกือบทุกภาพทดสอบ แต่ความพรำมัวของภาพยังคงเป็นปัญหาในการถอดรหัสสำหรับวิธีการใหม่อยู่



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการถอดรหัสภาพบาร์โค้ดที่มีลักษณะผิดรูปสูงโดยอิงวิธีการตรวจวิธีการที่นำเสนออาศัยตัวบอกอิงค่าเกรเดียนต์ HOG เป็นข้อมูลบ่งชี้ทิศทางการวางตัวเฉพาะที่ในส่วนย่อยของบาร์โค้ด ตัววัดความมีทิศทางของการวางตัว MOD ได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการจำแนกบล็อกว่าเป็นส่วนของบาร์โค้ดที่อ่านได้หรือไม่ และเพื่อสร้างวิธีการตรวจที่ผ่านเฉพาะบล็อกที่อ่านได้ หลังจากนั้นจึงถอดรหัสบาร์โค้ดด้วยการเทียบกับแม่แบบพลวัต

ผลลัพธ์จากการทดลองบ่งชี้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถแก้ปัญหาการอ่านบาร์โค้ดที่ผิดรูปสูงได้ในตัวอย่างทดสอบที่ใช้ ยกเว้นในกรณีที่มีการผิดรูปนั้นสูงจนทำให้เส้นบาร์โค้ดกระจุกตัวกันมากในแนววิธีการตรวจ

#### 5.2 ข้อจำกัด

วิธีการที่นำเสนอไม่ได้เน้นการจัดการกับปัญหาความพร่ามัวและความต่างของส่วนมืดและสว่างในภาพบาร์โค้ด ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบในภาพชุดยก

#### 5.3 แนวทางการวิจัยต่อ

ในการใช้งานจริง การเตรียมภาพบาร์โค้ดก่อนนำมาถอดรหัสจะต้องมีการค้นหาตำแหน่งของบาร์โค้ดในภาพก่อน ปัญหาดังกล่าวไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ แต่ค่า MOD ที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้มีคุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนตามทิศทางการวางตัว (orientation-invariant) จึงเป็นไปได้ที่อาจจะเอา MOD ไปประยุกต์ในการค้นหาตำแหน่งของบาร์โค้ดในภาพโดยไม่ต้องวางตัวในแนวนอน

ปัญหาความพร่ามัวและความต่างของส่วนมืดและสว่างต่ำของภาพบาร์โค้ดเป็นปัญหาที่มีการให้ความสำคัญในงานวิจัยหลัง ๆ มา [6, 7] และยังเป็นอุปสรรคอันหนึ่งในการถอดรหัสบาร์โค้ดในวิทยานิพนธ์นี้อยู่

และสุดท้ายคือปัญหาการผิดรูปที่สูงมากจนทำให้เส้นบาร์โค้ดกระจุกตัวซึ่งสร้างปัญหากับการถอดรหัสบาร์โค้ดเช่นกัน ค่า MOD ที่ได้ขณะนี้ยังไม่สามารถบ่งชี้ลักษณะการกระจุกตัวของเส้น

บาร์โค้ดได้ ทำให้ไม่สามารถสร้างวิธีการตรวจที่หลีกเลี่ยงการกระจุกตัวได้ แนวทางที่น่าสนใจคือการตรวจจับลักษณะการกระจุกตัวหรือการผิดรูปดังกล่าวเพื่อจะสร้างวิธีการตรวจที่หลีกเลี่ยงบริเวณที่มีปัญหา หรือเพื่อที่จะค้นหาวิธีการที่เหมาะสมในการถอดรหัสในกรณีเฉพาะนี้



## รายการอ้างอิง

1. Dalal, N. and B. Triggs. *Histograms of oriented gradients for human detection*. in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on*. 2005. IEEE.
2. Chai, D. and F. Hock. *Locating and decoding EAN-13 barcodes from images captured by digital cameras*. in *Information, Communications and Signal Processing, 2005 Fifth International Conference on*. 2005. IEEE.
3. Adelman, R., M. Langheinrich, and C. Flörkemeier, *Toolkit for Bar Code Recognition and Resolving on Camera Phones-Jump Starting the Internet of Things*. GI Jahrestagung (2), 2006. **94**: p. 366-373.
4. Krešić-Jurić, S., D. Madej, and F. Santosa, *Applications of hidden Markov models in bar code decoding*. *Pattern recognition letters*, 2006. **27**(14): p. 1665-1672.
5. Tekin, E. and J.M. Coughlan. *An algorithm enabling blind users to find and read barcodes*. in *Applications of Computer Vision (WACV), 2009 Workshop on*. 2009. IEEE.
6. Gallo, O. and R. Manduchi, *Reading 1d barcodes with mobile phones using deformable templates*. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2011. **33**(9): p. 1834-1843.
7. Chen, L., H. Man, and H. Jia, *On Scanning Linear Barcodes from Out-of-Focus Blurred Images: A Spatial Domain Dynamic Template Matching Approach*. *IEEE transactions on image processing: a publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2014.
8. Yospanya, P. and Y. Limpiyakorn, *Decoding Deformed Barcode Images with Scanpath Walkthrough*. *International Journal on Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 2015. **10**(1).



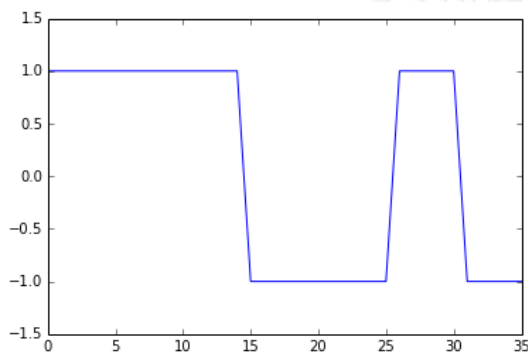
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

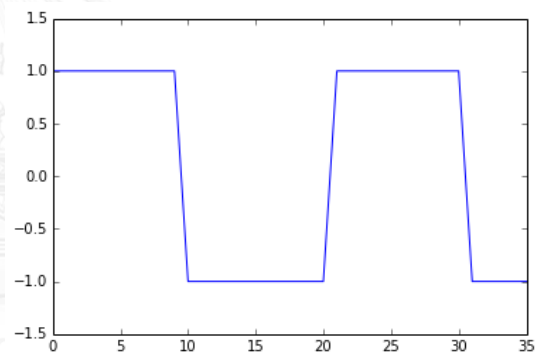
## แม่แบบรหัสบาร์โค้ด

ภาพต่อไปนี้จะแสดงรูปแบบของแม่แบบเลขรหัสในบาร์โค้ดทั้ง 30 รูปแบบ โดยแบ่งเป็นเลขรหัสหลักด้านซ้าย 20 แบบ ซึ่งประกอบด้วยภาวะคี่ 10 แบบและภาวะคู่ 10 แบบ และเลขรหัสหลักด้านขวาอีก 10 แบบ ทั้งนี้เลขรหัสหลักด้านขวาจะไม่ได้กำหนดแยกเป็นภาวะคี่และภาวะคู่เหมือนเลขรหัสหลักด้านซ้าย

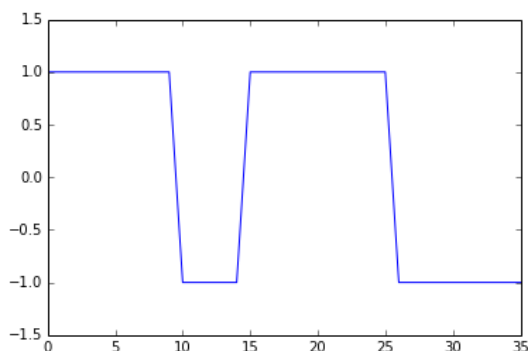
รูปแบบที่แสดงนี้เป็นรูปแบบที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว โดยมีค่า 1.0 แทนเส้นบาร์โค้ดสีขาวและค่า -1.0 แทนเส้นบาร์โค้ดสีดำ จำนวนตัวอย่างข้อมูล (sample) สำหรับแต่ละรูปแบบที่แสดงในที่นี้เป็น 36 ตัวอย่าง ในการใช้งานจริงเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลที่เก็บตัวอย่างมาจากวิธีการตรวจ แม่แบบเหล่านี้จะต้องถูกนำไปปรับขยายช่วงของค่าและจำนวนตัวอย่างข้อมูลให้เทียบเท่ากับชุดข้อมูลจากวิธีการตรวจ



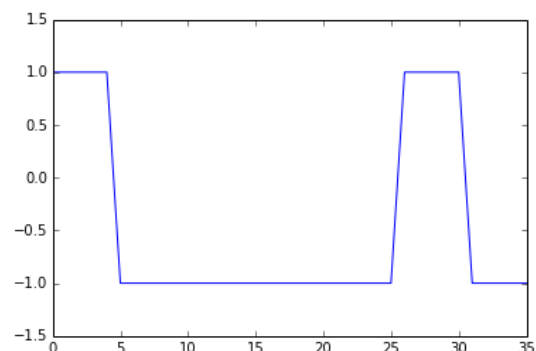
ภาพที่ ผ.1 แม่แบบเลข 0 ภาวะคี่



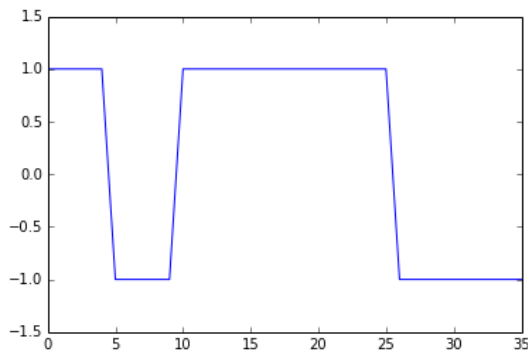
ภาพที่ ผ.2 แม่แบบเลข 1 ภาวะคี่



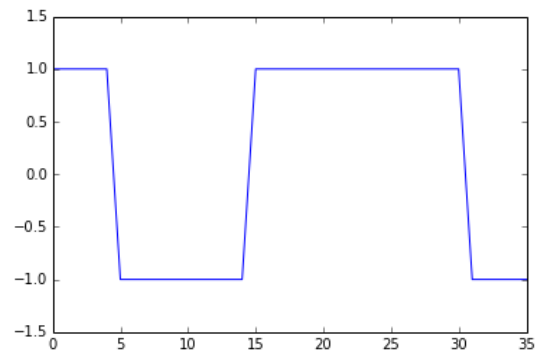
ภาพที่ ผ.3 แม่แบบเลข 2 ภาวะคี่



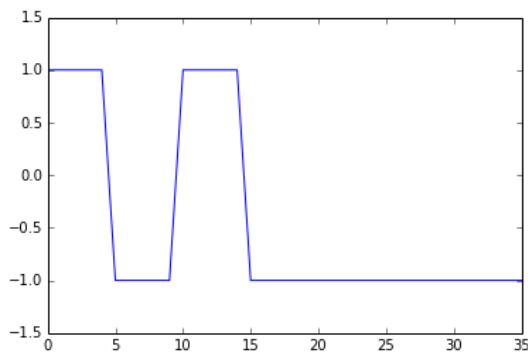
ภาพที่ ผ.4 แม่แบบเลข 3 ภาวะคี่



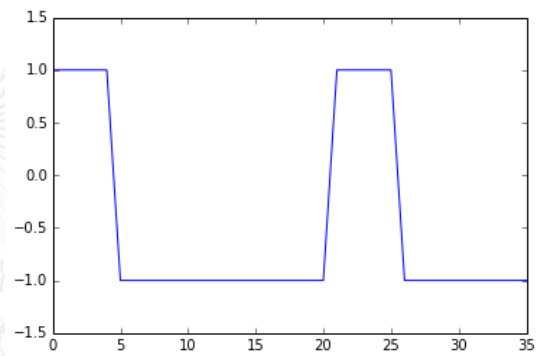
ภาพที่ ๕.5 แม่แบบเลข 4 ภาวะคี่



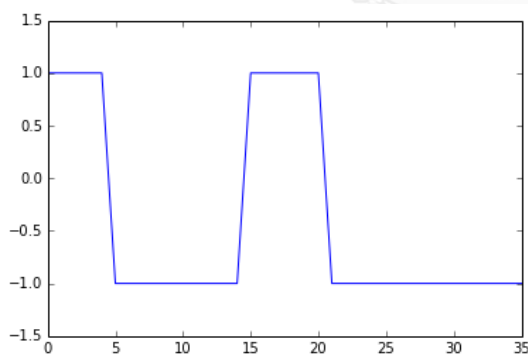
ภาพที่ ๕.6 แม่แบบเลข 5 ภาวะคี่



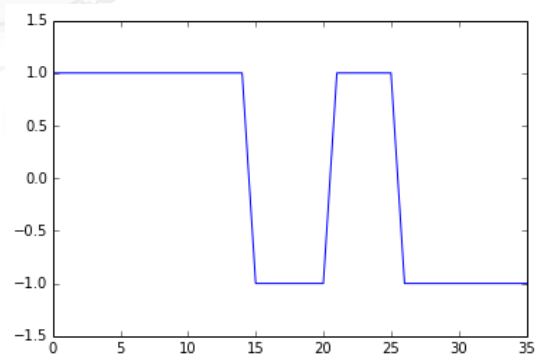
ภาพที่ ๕.7 แม่แบบเลข 6 ภาวะคี่



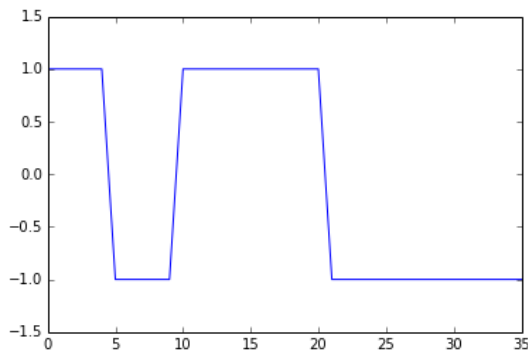
ภาพที่ ๕.8 แม่แบบเลข 7 ภาวะคี่



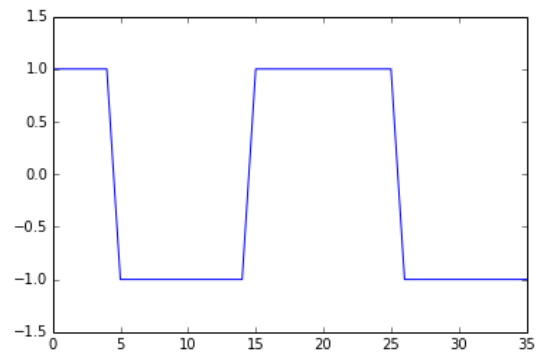
ภาพที่ ๕.9 แม่แบบเลข 8 ภาวะคี่



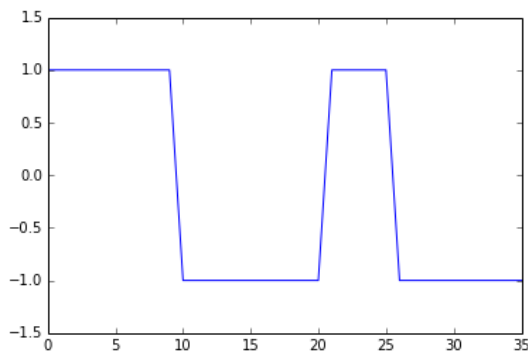
ภาพที่ ๕.10 แม่แบบเลข 9 ภาวะคี่



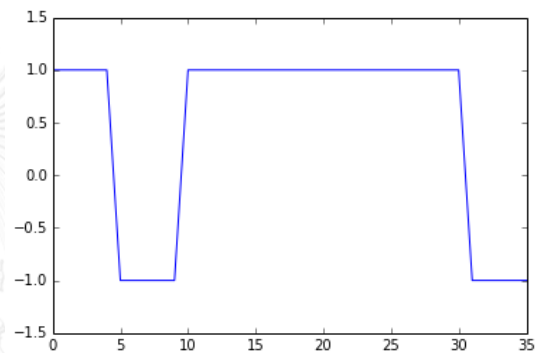
ภาพที่ ผ.11 แม่แบบเลข 0 ภาวะคู่



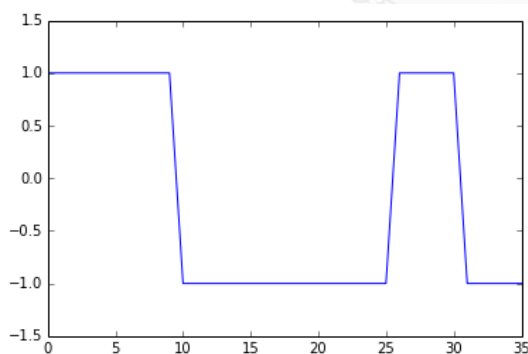
ภาพที่ ผ.12 แม่แบบเลข 1 ภาวะคู่



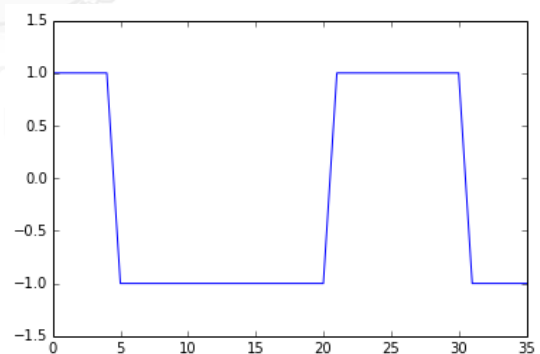
ภาพที่ ผ.13 แม่แบบเลข 2 ภาวะคู่



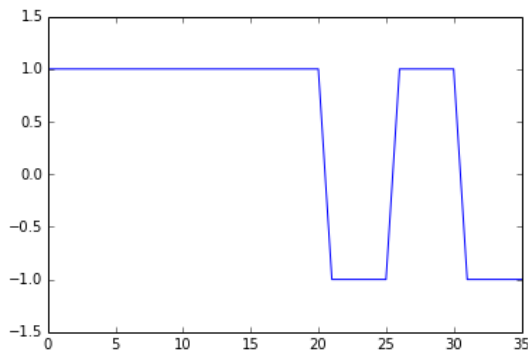
ภาพที่ ผ.14 แม่แบบเลข 3 ภาวะคู่



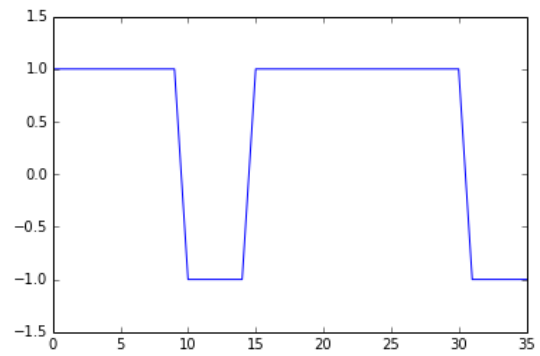
ภาพที่ ผ.15 แม่แบบเลข 4 ภาวะคู่



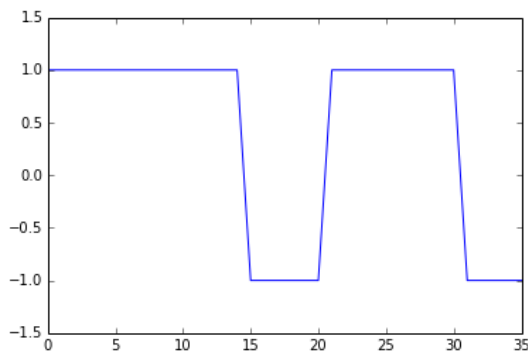
ภาพที่ ผ.16 แม่แบบเลข 5 ภาวะคู่



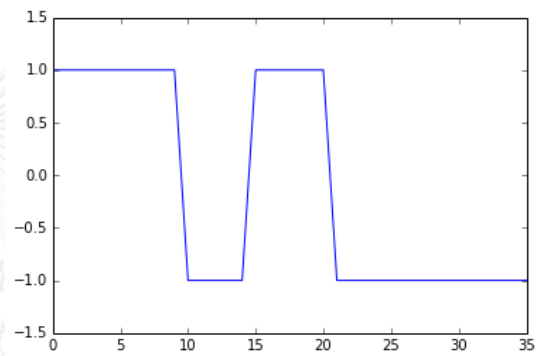
ภาพที่ ผ.17 แม่แบบเลข 6 ภาวะคู่



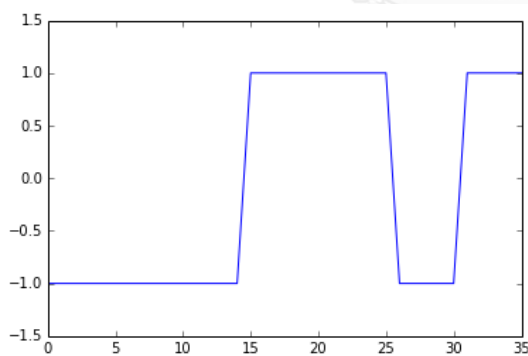
ภาพที่ ผ.18 แม่แบบเลข 7 ภาวะคู่



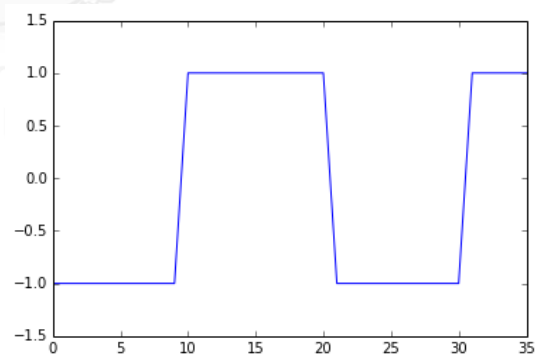
ภาพที่ ผ.19 แม่แบบเลข 8 ภาวะคู่



ภาพที่ ผ.20 แม่แบบเลข 9 ภาวะคู่

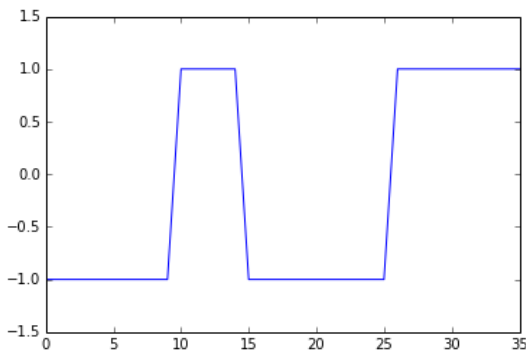


ภาพที่ ผ.21 แม่แบบเลข 0 หลักด้านขวา

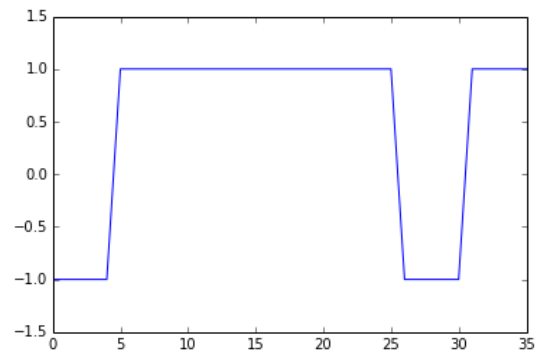


ภาพที่ ผ.22 แม่แบบเลข 1 หลักด้านขวา

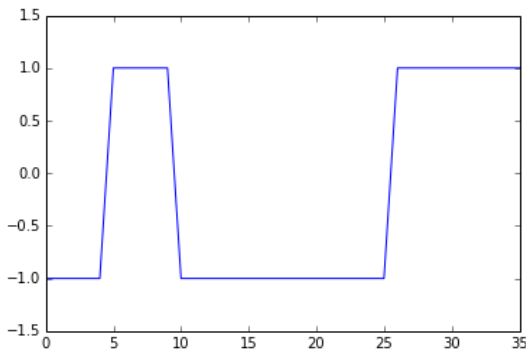




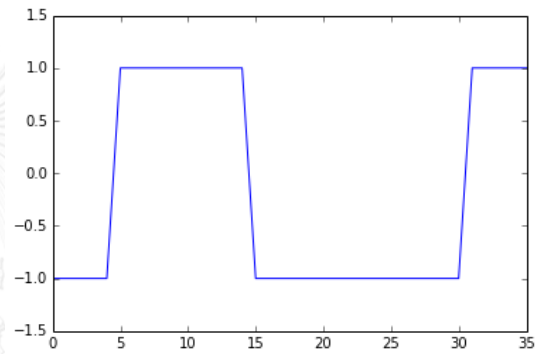
ภาพที่ ผ.23 แม่แบบเลข 2 หลักด้านขวา



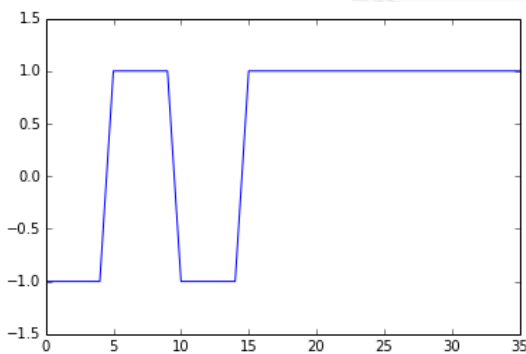
ภาพที่ ผ.24 แม่แบบเลข 3 หลักด้านขวา



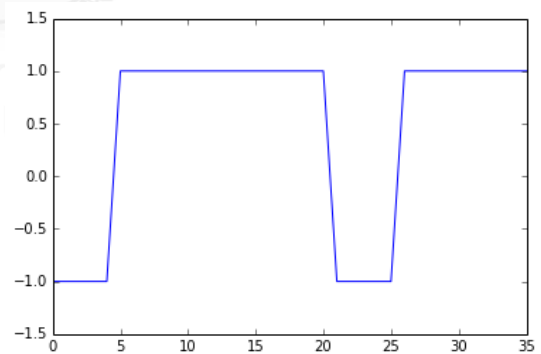
ภาพที่ ผ.25 แม่แบบเลข 4 หลักด้านขวา



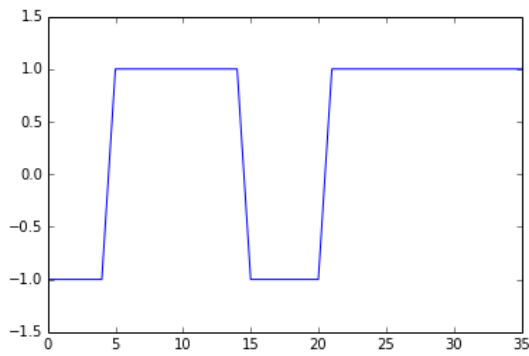
ภาพที่ ผ.26 แม่แบบเลข 5 หลักด้านขวา



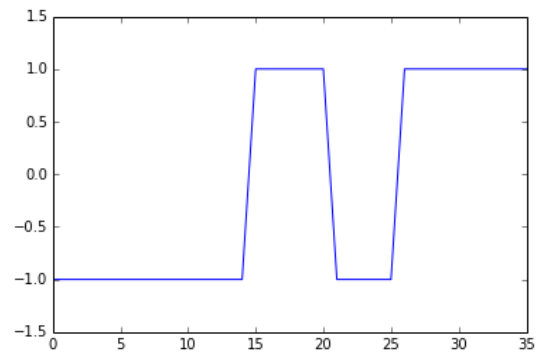
ภาพที่ ผ.27 แม่แบบเลข 6 หลักด้านขวา



ภาพที่ ผ.28 แม่แบบเลข 7 หลักด้านขวา



ภาพที่ ผ.29 แม่แบบเลข 8 หลักด้านขวา



ภาพที่ ผ.30 แม่แบบเลข 9 หลักด้านขวา



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปุ่นณะ ยศปัญญา เกิดเมื่อวันที่ 30 ตุลาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดเลย สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จากภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2542 และทำงานในตำแหน่งวิศวกรระบบที่บริษัทเคเอสซีคอมเมอร์เชียลอินเทอร์เน็ทเป็นเวลา 2 ปี ในปี พ.ศ. 2544 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา มาจนถึงปัจจุบัน และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคปลาย ปีการศึกษา 2555

