

การพัฒนาอัลกอริทึมการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันกาลสำหรับการติดตาม
เครื่องหมายเออาร์

กฤตชัย บุญศิวนนท์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

เมษายน 2555

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

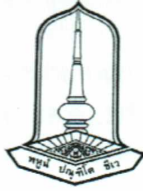
การพัฒนาอัลกอริทึมการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันทีสำหรับการติดตาม
เครื่องหมายเออาร์

กฤตชัย บุญคิวนนท์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

เมษายน 2555

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายกฤตชัย บุญศิวนนท์ แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ.ดร.อนันต์ อูร์โสภณ)

ประธานกรรมการ

(กรรมการบัณฑิตศึกษาประจำคณะ)

(ผศ.ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล)

กรรมการ

(ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์)

(อาจารย์ ดร.นิวัตร อังควิษฐพันธ์)

กรรมการ

(กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์)

(พลตรี ศ.วินัย คำทวี)

กรรมการ

(ผู้ทรงคุณวุฒิ)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ.ดร.สัมพันธ์ กุทธิเดช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศ.ดร.ประติษฐ์ เทอดทูล)

ผู้รักษาการคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 30 เดือน เม.ย. พ.ศ. 2555

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.อภิรักษ์ อรุโสมถน กรรมการบัณฑิตศึกษาประจำคณะ ผศ.ดร.วรวัฒน์ เสี่ยงมิวิบูล ประธานกรรมการควบคุม วิทยานิพนธ์ ดร.นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์ กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ และพลตรี ศ.วินัย คำทวิ ผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ด้านวิชาการและการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนในการให้ยืมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิด ให้กำลังใจ และการสนับสนุนในทุกๆ ด้าน

กฤตชัย บุญศิริวนนท์

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาอัลกอริทึมการเลือกกระดัดแบ่งแบบทันกาลสำหรับการติดตาม เครื่องหมายเออาร์
ผู้วิจัย	นายกฤตชัย บุญควินนท์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์
กรรมการควบคุม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสี่ยงมิบูล อาจารย์ ดร.นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2555

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีเออาร์หรือความเป็นจริงเสริม อาศัยวิธีการทำค่าขีดแบ่งคงที่ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ เซ็นเซอร์ภาพ และติดตามเครื่องหมายเออาร์ ซึ่งสามารถติดตามเครื่องหมายได้ดีเฉพาะในกรณีที่มีความส่องสว่างคงที่เท่านั้น แต่ไม่สามารถติดตามเครื่องหมาย และประมวลผลได้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของความส่องสว่าง ด้วยสาเหตุข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาอัลกอริทึมการเลือกกระดัดแบ่งแบบทันกาลสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ โดยนำเครื่องหมายเออาร์มาทดลองกับอัลกอริทึม 3 วิธีการ ได้แก่ วิธีการขีดแบ่งคงที่ วิธีการขีดแบ่งครอบคลุม และวิธีการเลือกกระดัดแบ่งอัตโนมัติ ภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่าง และระยะทาง

ผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่าง จำนวน 4 ช่วงพบว่า วิธีการที่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ดีที่สุด คือ วิธีการเลือกกระดัดแบ่งอัตโนมัติ โดยมีค่าขีดแบ่งของตัวอย่างเครื่องหมายทั้งหมดแปรผันโดยตรงตามความส่องสว่าง รวมทั้งยังพบว่า วิธีการเลือกกระดัดแบ่งอัตโนมัติสามารถติดตามตัวอย่างเครื่องหมายได้ทั้งหมด ซึ่งมีค่าขีดแบ่งเฉลี่ยต่ำสุด เท่ากับ 5.92 สำหรับผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขระยะทางพบว่า วิธีการที่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ดีที่สุด คือ วิธีการเลือกกระดัดแบ่งอัตโนมัติ โดยระยะทางจะแปรผันโดยตรงกับความส่องสว่างทุกช่วง ในขณะที่ระยะทางแปรผกผันกับค่าขีดแบ่ง ซึ่งวิธีการเลือกกระดัดแบ่งอัตโนมัติสามารถติดตามทุกช่วงความส่องสว่าง และได้ระยะทางดีกว่าวิธีการอื่นๆ โดยช่วงความส่องสว่าง เท่ากับ 15 ลักซ์ และ 35-45 ลักซ์ มีระยะทางที่สามารถติดตามได้มากที่สุด เท่ากับ 350 มิลลิเมตร และ 500 มิลลิเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าขีดแบ่งและความส่องสว่างทั้ง 2 วิธีการพบว่า ค่าขีดแบ่งมีค่า $p=0.000 < \alpha=0.05$ แสดงว่าค่าขีดแบ่งโดยใช้ความส่องสว่างทั้ง 4 ช่วงทุกคู่ได้ค่าขีดแบ่งที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

คำสำคัญ: การเลือกกระดัดแบ่งแบบทันกาล; การติดตามเครื่องหมายเออาร์; เทคโนโลยีเออาร์; การเปลี่ยนแปลงความส่องสว่าง;

TITLE A Development of Real-time Threshold Level Selection Algorithm for AR Marker's Tracking

AUTHER Mr. Krittachai Boonsivanon

DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Electrical and Computer Engineering

ADVISORS Assist. Prof. Dr.Worawat Sa-ngiamvibool, Ph.D.
Dr. Niwat Angkawisittpan, Ph.D.

UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2012

ABSTRACT

An Augmented Reality technology were used for a marker tracking is very important with marker-based that fixed threshold method used for AR marker's recognition, binarizes and AR marker's tracking on static illumination condition. However, this technology fails to track a marker with changing illumination or uneven illumination condition. To this end, this paper reports on an experimental investigation of a development of real-time threshold level selection algorithm for tracking an AR marker. To compare the efficiency of tracking the AR marker, the experiments are performed under the illumination and distance conditions. Three methods were used that include fixed threshold, global thresholding and automatic threshold level selection.

The results under illumination condition showed that the best method of AR marker's tracking was automatic threshold level selection method that threshold value of all samples were directly variations with illumination and can track all sample markers which has minimum average of thresholding of 5.92. The results under distance condition showed that the best method of AR marker's tracking was automatic threshold level selection method. In this method, the distance is varied as all range of illumination while the illumination's distance is inversely proportional to all thresholding value. The automatic threshold level selection method can track all range of illumination and obtain the best result greater than other methods. With the illuminations of 15 lux and 35-45 lux, the most tracking distances are 350 mm and 500 mm, respectively. In addition, the statistical analysis is used to determine the significant difference in the threshold value ($p=0.000 < \alpha =0.05$).

Keywords: Real-time threshold level selection; AR marker's tracking; Augmented Reality; Changing illumination

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพประกอบ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ภูมิหลัง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	4
1.4 ความสำคัญของการวิจัย	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 เทคโนโลยีเออาร์	6
2.2 หลักการทำงานของเทคโนโลยีเออาร์	8
2.3 ไลบรารี ARToolkit	12
2.4 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARToolkit	24
2.5 การขีดแบ่ง	25
2.6 ความส่องสว่าง	29
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	40
3.1 การเตรียมการทดลอง	40
3.2 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับทดสอบการติดตาม	42
3.3 การทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล	44
3.4 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล	47
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	48
4.1 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการขีดแบ่งคงที่	48
4.2 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการขีดแบ่งครอบคลุม	50
4.3 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ	53
4.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	62
สรุปผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่าง	62
สรุปผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขระยะทาง	62
ข้อเสนอแนะ	63

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่ได้รับการพิจารณาให้ตีพิมพ์	70
ภาคผนวก ข ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์	87
ภาคผนวก ค ตารางเปรียบเทียบค่าฮิสโตแกรม และการขีดแบ่งภายใต้เงื่อนไข ความส่องสว่างที่มี การเปลี่ยนแปลง	94
ประวัติย่อผู้วิจัย	119

สารบัญตาราง

		หน้า
ตาราง 2.1	ตัวอย่างฟังก์ชันของไลบรารี ARToolkit (Kato, 2000)	14
ตาราง 2.2	ความส่องสว่างตามมาตรฐานของ CIE และ IEC 61892-2	30
ตาราง 4.1	ตารางเปรียบเทียบค่าฮิสโตแกรม และการขีดแบ่ง วิธีการขีดแบ่งครอบคลุม ภายใต้เงื่อนไข ความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง	52
ตาราง 4.2	ตารางเปรียบเทียบค่าฮิสโตแกรม และการขีดแบ่ง วิธีการเลือกระดับขีดแบ่ง อัตโนมัติ ภายใต้ เงื่อนไขความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง	55

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า	
ภาพประกอบ 1.1	การประยุกต์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีเออาร์ (ก) ระบบชี้แนะการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกล (Steven J. Henderson et al., 2009) (ข) การพัฒนาระบบ Augmented Reality Conferencing (Kato, 2000)	2
ภาพประกอบ 1.2	การเปรียบเทียบค่ากราฟแสดงค่าความถี่กับความส่องสว่าง (ก) สภาวะที่มีปริมาณความส่องสว่างคงที่หรือปกติ (ข) สภาวะที่มีปริมาณความส่องสว่างไม่คงที่	3
ภาพประกอบ 2.1	ตัวอย่างเทคโนโลยีเออาร์	7
ภาพประกอบ 2.2	เทคโนโลยีความเป็นจริงผสมของ Milgram's Continuum (Paul Milgram et al, 1994)	8
ภาพประกอบ 2.3	ขั้นตอนการทำงานของเทคโนโลยีเออาร์ (Kato, 2000)	9
ภาพประกอบ 2.4	อุปกรณ์ที่ใช้ในการแสดงผลของเทคโนโลยีเออาร์ (ก) อุปกรณ์ชนิดสวมใส่ศีรษะ (HMD) (Kato, 2000) (ข) แท็บเล็ต-พีซี (Tablet-PC) (Michael Haller et al., 2005) (ค) สมาร์ทโฟน (Smart Phone) (Owaly, 2006) (ง) จอภาพแสดงผล (Monitor) (Abhilash Pandya et al., 2004)	11
ภาพประกอบ 2.5	ผังลำดับขั้นตอนการทำงานของไลบรารี ARToolki	15
ภาพประกอบ 2.6	โครงสร้างของไลบรารี ARToolKit (Kato, 2000)	16
ภาพประกอบ 2.7	ระบบแกนขนิ ด Rendering (Kato, 2000)	17
ภาพประกอบ 2.8	ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ (Kato, 2000)	18
ภาพประกอบ 2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างระบบแกนของกล้องกับระบบแกนเครื่องหมายเออาร์ ของไลบรารี ARToolkit (Kato, 2000)	20
ภาพประกอบ 2.10	อัลกอริทึมการทำงานของไลบรารี ARToolkit (Kato, 2000)	21
ภาพประกอบ 2.11	รูปแบบที่เหมาะสมของเครื่องหมายเออาร์ไลบรารี ARToolkit (Kato, 2000)	22
ภาพประกอบ 2.12	เครื่องหมายเออาร์มาตรฐานของไลบรารี ARToolki (Kato, 2000)	22
ภาพประกอบ 2.13	กระบวนการวิเคราะห์ภาพของไลบรารี ARToolkit (Kato, 2000)	23
ภาพประกอบ 2.14	กระบวนการติดตามเครื่องหมายเออาร์ และเข้ารหัสด้วยไลบรารี ARToolkit	24
ภาพประกอบ 2.15	การทำค่าขีดแบ่งควบคุม	25
ภาพประกอบ 2.16	การเลือกค่าขีดแบ่งจากกราฟแสดงค่าความถี่ (R. C. Gonzalez et al., 2004)	26
ภาพประกอบ 2.17	อัลกอริทึมของวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ	27
ภาพประกอบ 2.18	การทดลองการติดตามเครื่องหมายเออาร์ ARToolkit (Kato, 2000)	31

ภาพประกอบ 2.19	การพัฒนาวิธีการปรับปรุงการติดตาม โดยใช้วิธีการปรับเลือกค่าขีดแบ่ง (Thomas, 2003)	32
ภาพประกอบ 2.20	การวิจัยผลของความแม่นยำในการติดตามพื้นฐานโดยอาศัยเครื่องหมายเออาร์ (Daniel F. Abawi et al., 2004)	33
ภาพประกอบ 2.21	การพัฒนาเทคนิควิธีการในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARTag (Martin, 2008)	34
ภาพประกอบ 2.22	การจำลองการทำงานของหุ่นยนต์และแขนกล (J.W.S. Chong et al., 2009)	34
ภาพประกอบ 2.23	การพัฒนาอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ และระบุคุณลักษณะของเครื่องหมายเออาร์ (Hongfei Wu et al., 2010)	35
ภาพประกอบ 2.24	การนำเสนอเทคนิคใหม่ด้วยการใช้กล้อง 2 ตัวในการติดตาม (Jia Jun et al., 2010)	36
ภาพประกอบ 2.25	การนำเสนอวิธีการใหม่ของการติดตามระหว่างกล้องและเครื่องหมายเออาร์ ภายใต้เงื่อนไขสถานการณ์ถูกปิดกั้นด้วยวัตถุ (Ahyun Lee et al., 2010)	37
ภาพประกอบ 2.26	การนำเสนอวิธีการใหม่สำหรับแก้ปัญหาการกำหนดจุดมุมรอบเครื่องหมายและการปิดกั้น (Jonghoon Seo et al., 2011)	38
ภาพประกอบ 2.27	การพัฒนาเทคนิควิธีการในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARToolkit (Bortong Chen et al., 2011)	38
ภาพประกอบ 3.1	ตัวอย่างเครื่องหมายมาตรฐานของไลบรารี (บน) ARToolkit (Kato, 2000) (กลาง) ARTag (Mark Fiala, 2006) (ล่าง) ARLib (Daniel Diggins, 2005)	41
ภาพประกอบ 3.2	ผังลำดับขั้นตอนของอัลกอริทึมวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ	43
ภาพประกอบ 3.3	ผังลำดับขั้นตอนการทดลอง	45
ภาพประกอบ 3.4	ชุดอุปกรณ์อ่านและปรับความส่องสว่าง	46
ภาพประกอบ 3.5	การทดลองปรับค่าขีดแบ่งด้วยโปรแกรมทดสอบการติดตาม	47
ภาพประกอบ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการขีดแบ่งคงที่กับความส่องสว่าง	49
ภาพประกอบ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับค่าขีดแบ่งวิธีการขีดแบ่งคงที่	50
ภาพประกอบ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการขีดแบ่งครอบคลุมกับความส่องสว่าง	51
ภาพประกอบ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการขีดแบ่งครอบคลุมกับระยะทาง	53
ภาพประกอบ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติกับความส่องสว่าง	54
ภาพประกอบ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติกับระยะทาง	56
ภาพประกอบ 4.7	การทดลองการติดตามและการประมวลผลเครื่องหมายเออาร์	57

	หน้า
ภาพประกอบ 4.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ วิธีการขีดแบ่งครอบครัว	59
ภาพประกอบ 4.9 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ วิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ	61

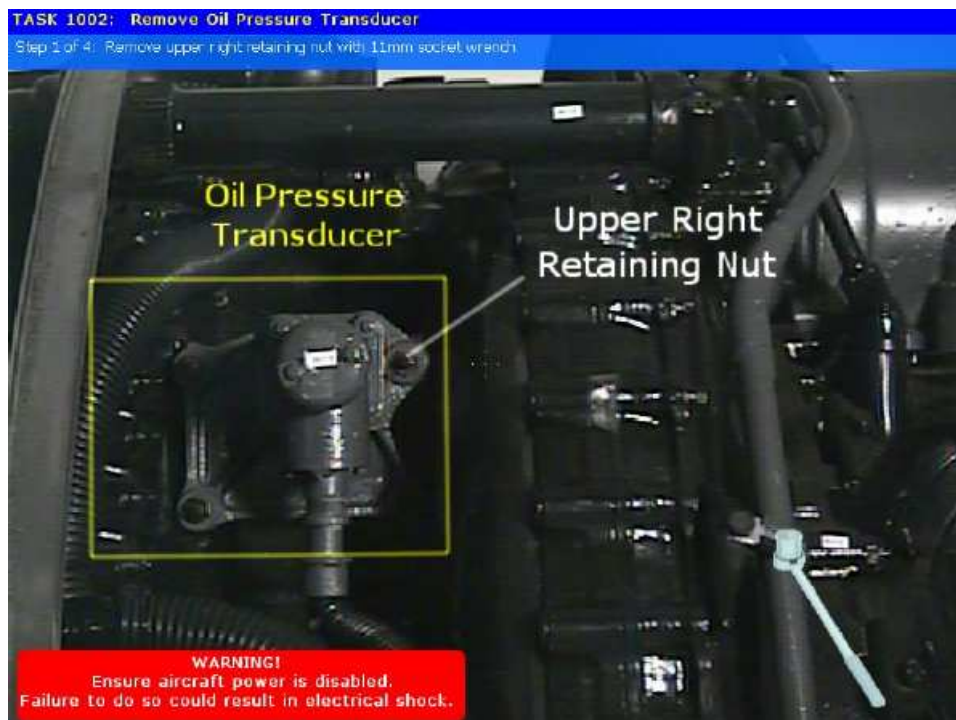
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ปัจจุบันคอมพิวเตอร์กราฟิกเข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในชีวิตประจำวันและได้มีการนำคอมพิวเตอร์กราฟิกมาประยุกต์ใช้กับงานในหลายๆ ด้าน รวมถึงในด้านการสร้างแบบจำลองด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง (Virtual Reality; VR) ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการนำเทคโนโลยีเสมือนจริงมาพัฒนาต้นแบบหรือแบบจำลองที่ช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์ และแก้ไขต้นแบบก่อนผลิตหรือสร้างขึ้นจริงได้ ซึ่งหากกล่าวถึงโลกเสมือนจริงเราอาจจะจินตนาการถึงภาพกราฟิกในเกมส์ 3 มิติต่างๆ ที่มีอยู่มากมาย แต่ในความเป็นจริงแล้วเทคโนโลยีนี้ไม่ได้มีเฉพาะในเกมส์เท่านั้น แต่ยังถูกนำไปใช้งานในหลายๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านการแพทย์ การทหาร การศึกษา ธุรกิจ โฆษณา ศิลปะ สถาปัตยกรรม และทางด้านวิศวกรรม (Krishnamurthy, 2002) โลกเสมือนจริงเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้สำหรับนำเสนอข้อมูลที่มีความซับซ้อน ซึ่งการแสดงผลที่ถูกสร้างขึ้นจะเป็นกราฟิกเสมือนจริงทั้งวัตถุและสภาพแวดล้อมรวมถึง ตัวอักษร ภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวในลักษณะกราฟิก 3 มิติ และมีความสามารถในการรองรับการโต้ตอบกับผู้ใช้ผ่านคอมพิวเตอร์แบบทันที (Real-time Interactive) (Dam et al., 2000) ได้อธิบายว่าในการพัฒนาต้นแบบหรือจำลองขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริงนั้น อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีเสมือนจริงยังมีข้อจำกัดในการออกแบบ คือไม่สามารถแสดงผลเข้ากับสภาพแวดล้อมจริงได้ เนื่องจากแสดงได้เฉพาะภายในสภาพแวดล้อมจำลองเท่านั้น รวมทั้งในการพัฒนาแบบจำลองในแต่ละครั้ง มีค่าใช้จ่ายและใช้เวลาในการพัฒนามาก

ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้น เทคโนโลยีเออาร์จึงถูกนำเสนอขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาและตอบสนองความต้องการข้างต้น (Silva, Oliveira & Giraldo, 2001) (Claudio et al, 2006) (Borting Chen et al., 2011) ได้อธิบายว่าเทคโนโลยีเออาร์หรือความเป็นจริงเสริม เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่เกี่ยวข้องกับการโต้ตอบกับผู้ใช้ผ่านคอมพิวเตอร์แบบทันที โดยมีความสามารถในการแสดงกราฟิกจำลองเสมือนจริงในลักษณะ 3 มิติผสมซ้อนทับเข้ากับสภาพแวดล้อมจริง โดยการใช้เทคนิคการแสดงวิดีโอทัศน์ (Computer Vision) ในรูปแบบการส่งข้อมูลสัญญาณวิดีโอแบบต่อเนื่อง ชนิดการถ่ายทอดสัญญาณทันที (Live-video Streams) และเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) ที่ใช้ในกระบวนการติดตามเครื่องหมายเออาร์ (AR Marker Tracking) ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ภาพ คำนวณตำแหน่งกล้อง และประมวลผลกราฟิกต่อไป ซึ่งในกระบวนการพื้นฐานการติดตามด้วยเครื่องหมายเออาร์ (Marker-based) เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีเออาร์ โดยขั้นตอนของกระบวนการนี้จำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์ภาพ การเข้ารหัส และตรวจสอบข้อมูลตำแหน่งระหว่างกล้องกับเครื่องหมายเออาร์ในลักษณะ 3 มิติ เพื่อรองรับการตอบสนองผู้ใช้ทันทีในการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาของระยะและมุมมอง รวมทั้งยังใช้เครื่องหมายเออาร์ในการกำหนดตำแหน่ง เพื่อใช้สำหรับสร้างกราฟิกเสมือนจริงอีกด้วย จึงเห็นได้ว่าเครื่องหมายเออาร์เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีเออาร์ ดังภาพประกอบ 1.1



(ก)



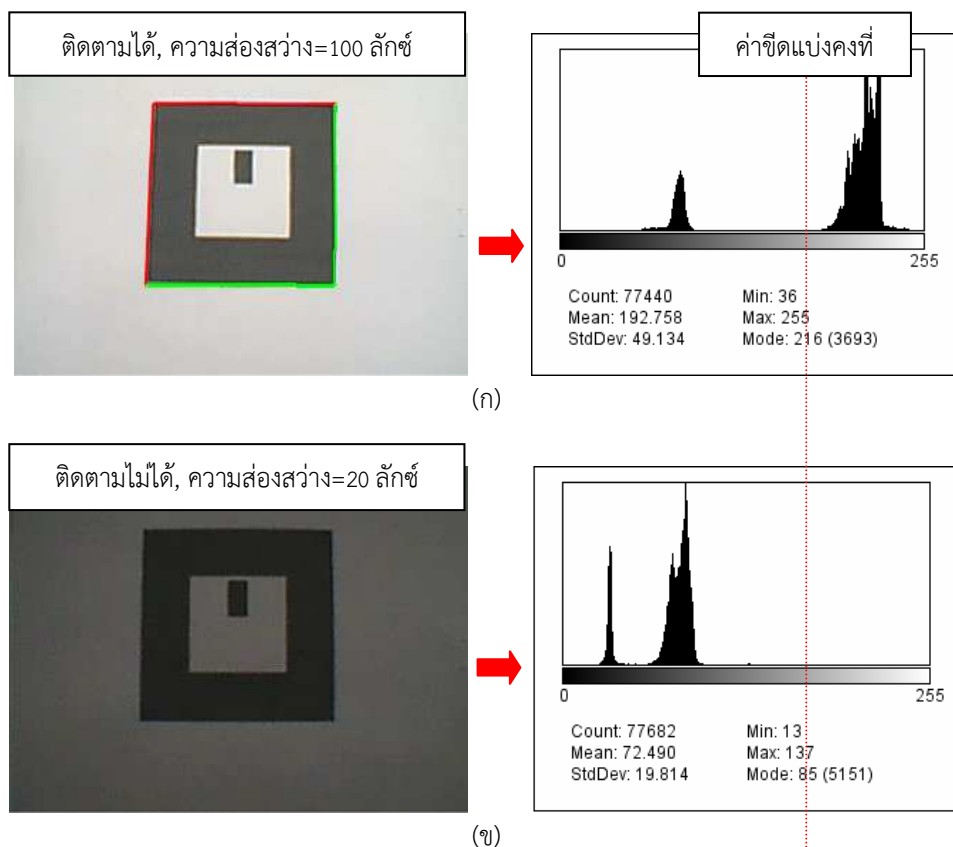
(ข)

ภาพประกอบ 1.1 การประยุกต์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีเออาร์

(ก) ระบบชี้แนะการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกล (Steven J. Henderson et al., 2009)

(ข) การพัฒนาระบบ Augmented Reality Conferencing (Kato, 2000)

อย่างไรก็ตาม ในการประยุกต์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีเออาร์ โดยอาศัยหลักการพื้นฐานในการติดตามเครื่องหมายเป็นหลักในการทำงาน ซึ่งหลักการนี้มีจุดเด่น คือ มีค่าใช้จ่ายไม่สูง การสร้างและการติดตั้งติดตั้งเครื่องหมายเออาร์ง่าย แต่หลักการดังกล่าวยังพบว่ามีจุดด้อยของหลักการพื้นฐานในการติดตามเครื่องหมายเป็นหลักในการทำงาน ซึ่งมีหลายปัจจัยที่เป็นสาเหตุหลัก และส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการติดตาม รวมทั้งไม่สามารถประมวลผลวัตถุเสมือนจริงหรือเกิดการประมวลผลที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นได้ เช่น ขนาดของเครื่องหมายเออาร์ มุม และระยะห่างที่ใช้ในการติดตาม เป็นต้น ซึ่งนอกจากปัจจัยข้างต้นแล้ว ความส่องสว่างนั้นก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญ และส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการติดตามได้เช่นกัน เนื่องจากในกระบวนการติดตาม และวิเคราะห์เครื่องหมายจะอาศัยเทคนิคการทำค่าขีดแบ่ง (Thresholding) ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจะพิจารณาค่าขีดแบ่งจากค่ากราฟแสดงค่าความถี่ โดยเฉพาะในการทำค่าขีดแบ่งที่ใช้ในการติดตามของไลบรารี ARToolkit ซึ่งค่าขีดแบ่งจะถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ (Fixed Threshold) ซึ่งใช้ได้ดีเฉพาะในสถานะที่มีความส่องสว่างปกติหรือคงที่เท่านั้น แต่ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความส่องสว่าง ซึ่งจะส่งผลให้ค่ากราฟแสดงค่าความถี่เปลี่ยนแปลงไปตามความส่องสว่างด้วย ในขณะที่ค่าขีดแบ่งของไลบรารีนี้เป็นค่าขีดแบ่งแบบคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงตามค่ากราฟแสดงค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลง จึงทำให้ไม่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ ดังภาพประกอบ 1.2



ภาพประกอบ 1.2 การเปรียบเทียบค่ากราฟแสดงค่าความถี่กับความส่องสว่าง

(ก) สถานะที่มีปริมาณความส่องสว่างคงที่หรือปกติ

(ข) สถานะที่มีปริมาณความส่องสว่างไม่คงที่

ด้วยสาเหตุข้างต้น ในประเด็นการติดตามภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะประเด็นความส่องสว่างที่มีปริมาณความส่องสว่างต่ำ และระยะทางนั้น พบว่ายังไม่มีผู้ทำการศึกษาวิจัยในประเด็นนี้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษา และพัฒนาอัลกอริทึมการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันกาลสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ โดยทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่าง และระยะทางที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ ซึ่งผลจากการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันกาลสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ สามารถปรับปรุงค่าขีดแบ่งให้มีความเหมาะสมกับปริมาณความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงได้แบบทันกาล จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการติดตามเครื่องหมายเออาร์และการประมวลผลดีขึ้น รวมทั้งยังมีความต่อเนื่องอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษา และพัฒนาการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติแบบทันกาลสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตามเครื่องหมายเออาร์

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การพัฒนาการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันกาลมีประสิทธิภาพในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ดีกว่าวิธีการอื่นๆ

1.4 ความสำคัญของการวิจัย

1.4.1 ได้อัลกอริทึมการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันกาลสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์

1.4.2 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ และการประมวลผลมีประสิทธิภาพดีขึ้น และมีความต่อเนื่อง

1.4.3 ได้แนวทางในการนำไปศึกษากับเครื่องหมายเออาร์ชนิดหลายเครื่องหมาย (Multi Markers)

1.4.4 ได้แนวทางในการนำไปศึกษา และปรับปรุงด้วยเทคนิควิธีการทางด้านประมวลผลภาพดิจิทัลอื่นๆ

1.4.5 ได้แนวทางในการนำไปศึกษากับไลบรารีของเทคโนโลยีเออาร์อื่นๆ

1.4.6 ได้แนวทางในการนำไปศึกษา และพัฒนาบนแพลตฟอร์มอื่นๆ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 เครื่องหมายเออาร์ ชนิดเครื่องหมายเดี่ยว (Single Marker) จำนวน 12 ตัวอย่าง เครื่องหมาย โดยกำหนดตัวอย่างเครื่องหมายเป็น 3 กลุ่มๆ ละ 4 ตัวอย่าง ดังนี้
 - 1.5.1.1 กลุ่มตัวอย่างเครื่องหมายมาตรฐานของไลบรารี ARToolkit
 - 1.5.1.2 กลุ่มตัวอย่างเครื่องหมายมาตรฐานของไลบรารี ARTag
 - 1.5.1.3 กลุ่มตัวอย่างเครื่องหมายมาตรฐานของไลบรารี ARLib
- 1.5.2 ศึกษา และพัฒนาอัลกอริทึมในกระบวนการวิเคราะห์ภาพของไลบรารี ARToolkit
- 1.5.3 เครื่องหมายเออาร์ใช้รูปแบบไฟล์ BMP ชนิด 24 บิต ขนาด 8x8 ซม. และมีพื้นหลังของเครื่องหมายเออาร์ทั้งหมดเป็นสีขาว
- 1.5.4 ความส่องสว่างที่ใช้ในการทดลองเป็นแสงประดิษฐ์ ชนิดภายในอาคาร โดยกำหนดช่วงความส่องสว่างที่ใช้ในการทดลอง ต่ำกว่า 50 ลักซ์
- 1.5.5 โหมดรูปแบบการบีบอัดสี และสัญญาณภาพที่ใช้ในการทดลอง ชนิด RGB24
- 1.5.6 ช่วงระยะห่างระหว่างกล้องกับตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ ตั้งแต่ 20-50 ซม.
- 1.5.7 การวัดความผิดพลาดในการติดตามใช้อัตราความเร็วของข้อมูลวิดีโอที่สนับเท่ากับ 300 เฟรม
- 1.5.8 ภาพวัตถุเสมือนจริงที่ใช้ในการทดลอง คือ สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ทึบ (Solid Cube) มาตรฐานของไลบรารี OpenGL
- 1.5.9 พัฒนาโปรแกรมติดตาม และเข้ารหัส ด้วยภาษา C++ โดยการอ้างอิงไลบรารี ดังนี้ ไลบรารี ARToolkit เวอร์ชัน 2.72.1
- 1.5.10 พัฒนาโปรแกรมแสดงผลเออาร์ ด้วยภาษา C++ โดยการอ้างอิงไลบรารี ดังนี้ ไลบรารี OpenGL เวอร์ชัน 2.0
- 1.5.11 พัฒนาโปรแกรมบนไมโครคอมพิวเตอร์ภายใต้ระบบปฏิบัติการ Windows XP
- 1.5.12 กล้องดิจิทัล USB กำหนดปิดการทำงานโหมดการปรับค่าความสว่างอัตโนมัติ
- 1.5.13 ประชากร และกลุ่มตัวอย่าง
 - 1.5.13.1 ประชากรในการทำวิจัย คือ เครื่องหมายเออาร์
 - 1.5.13.2 กลุ่มตัวอย่างในการทำวิจัย คือ เครื่องหมายเออาร์ ชนิดเครื่องหมายเดี่ยวของไลบรารี ARToolkit ARTag และ ARLib
- 1.5.14 ตัวแปรที่ศึกษา
 - 14.1 ตัวแปรต้น คือ ความส่องสว่าง
 - 14.2 ตัวแปรตาม คือ ค่าขีดแบ่ง และระยะทาง
- 1.5.15 เครื่องมือที่ใช้ และการเก็บรวบรวมข้อมูล
 - 1.5.15.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย คือ โปรแกรมสำหรับทดสอบการติดตามเครื่องหมายเออาร์
 - 1.5.15.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ เครื่องหมายเออาร์ ชนิดเครื่องหมายเดี่ยว

บทที่ 2

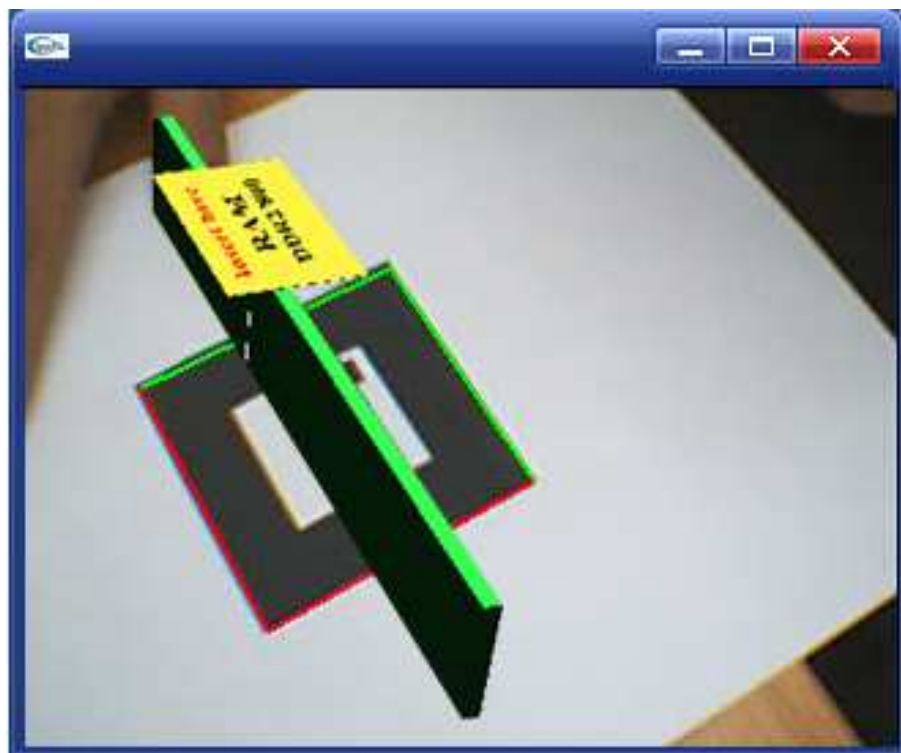
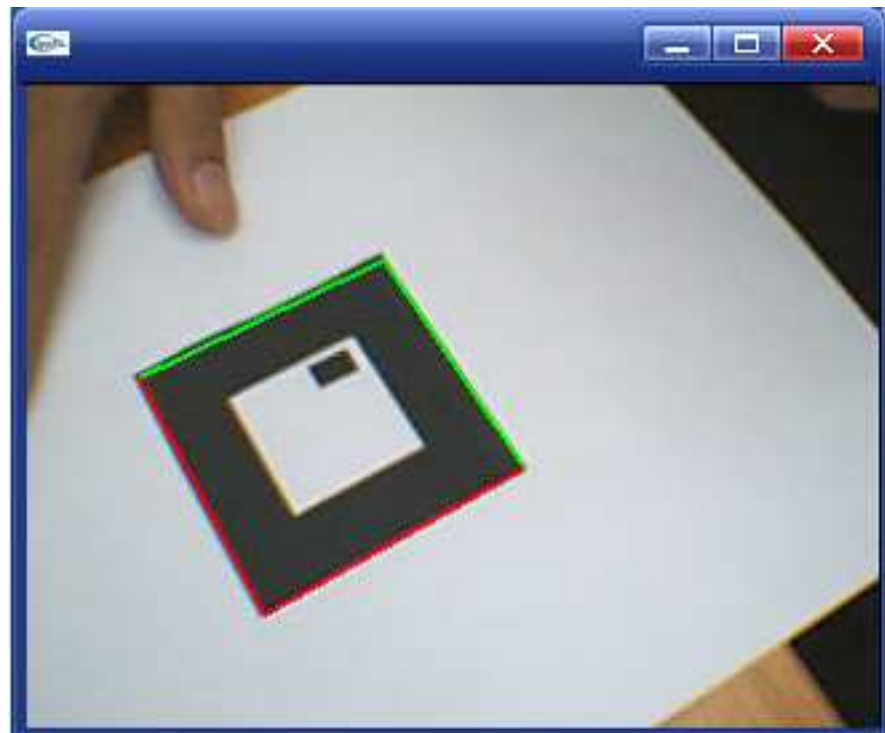
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

- 2.1 เทคโนโลยีเออาร์
- 2.2 หลักการทำงานของเทคโนโลยีเออาร์
- 2.3 ไลบรารี ARToolkit
- 2.4 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARToolkit
- 2.5 การขีดแบ่ง
- 2.6 ความส่องสว่าง
- 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

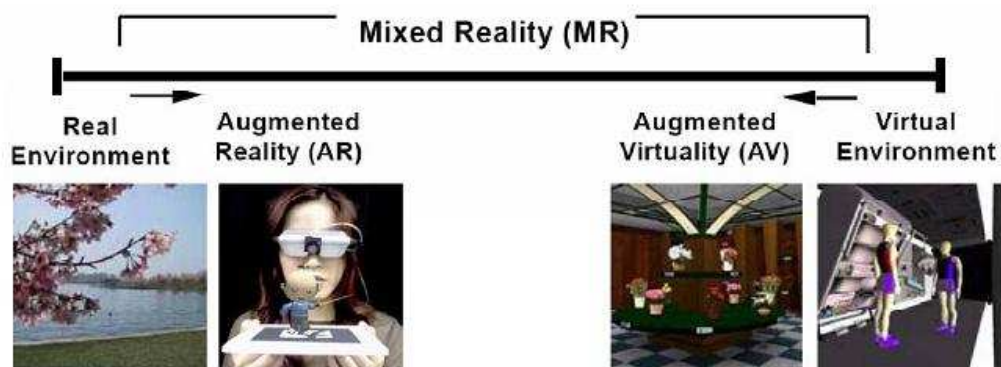
2.1 เทคโนโลยีเออาร์

ด้วยข้อจำกัดของเทคโนโลยีเสมือนจริง คือ ไม่สามารถแสดงผลเข้ากับสภาพแวดล้อมจริงได้ รวมทั้งในการพัฒนาแบบจำลองในแต่ละครั้ง มีค่าใช้จ่ายและใช้เวลาในการพัฒนามาก จึงทำให้เทคโนโลยีเออาร์ถูกนำเสนอขึ้น เพื่อแก้ไขข้อจำกัดและปัญหาดังกล่าว (Silva, Oliveira & Giraldo, 2001 ; Claudio et al., 2006 ; Mukunfan & Bilinghurst, 2008) (Papagiannakis & Thanlmann, 2008) (Borting Chen et al., 2011) ได้อธิบายว่า เทคโนโลยีเออาร์หรือความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality; AR) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่เกี่ยวข้องกับการโต้ตอบกับผู้ใช้ผ่านคอมพิวเตอร์แบบทันกาล โดยมีความสามารถในการแสดงกราฟิกจำลองเสมือนจริงในลักษณะ 3 มิติผสมผสานซ้อนทับเข้ากับสภาพแวดล้อมจริง (Real Environment) โดยการใช้เทคนิคการแสดงวิดีโอทัศน์ (Computer Vision) ในรูปแบบการส่งข้อมูลสัญญาณวิดีโอแบบต่อเนื่อง ชนิดการถ่ายทอดสัญญาณทันกาล (Live-video Streams) ดังภาพประกอบ 2.1 และใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) ที่ใช้ในกระบวนการติดตามเครื่องหมายเออาร์ (AR Marker Tracking) ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ภาพ คำนวณตำแหน่งกล้อง และประมวลผลกราฟิกต่อไป ซึ่งในกระบวนการพื้นฐานการติดตามด้วยเครื่องหมายเออาร์ (Marker-based) เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีเออาร์ โดยขั้นตอนของกระบวนการนี้จำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์ภาพ การเข้ารหัส และตรวจสอบข้อมูลตำแหน่งระหว่างกล้องกับเครื่องหมายเออาร์ในลักษณะ 3 มิติ เพื่อรองรับการตอบสนองของผู้ใช้งานทันทีในการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาของระยะและมุมมอง รวมทั้งยังใช้เครื่องหมายเออาร์ในการกำหนดตำแหน่ง เพื่อใช้สำหรับสร้างกราฟิกเสมือนจริงอีกด้วย



ภาพประกอบ 2.1 ตัวอย่างเทคโนโลยีเออาร์

เทคโนโลยีเออาร์ เป็นเทคโนโลยีหนึ่งของเทคโนโลยีความเป็นจริงผสม (Mixed Reality) (Paul Milgram et al., 1994) ได้อธิบายภายใต้นิยามของ “Milgram’s Continuum” ซึ่งเป็นนิยามประเภทของเทคโนโลยีด้วยความสามารถในการแสดงผลของวัตถุเสมือนจริงชนิด 3 มิติ ดังภาพประกอบ 2.2

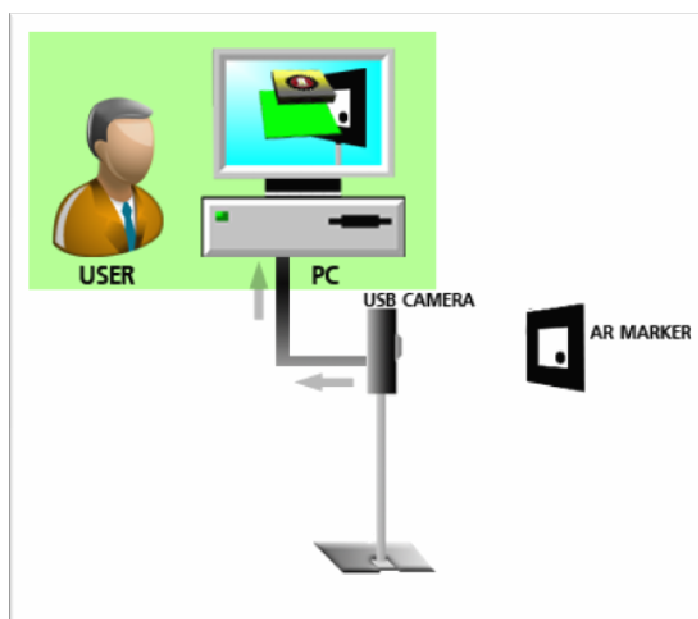


ภาพประกอบ 2.2 เทคโนโลยีความเป็นจริงผสมของ Milgram’s Continuum
(Paul Milgram et al., 1994)

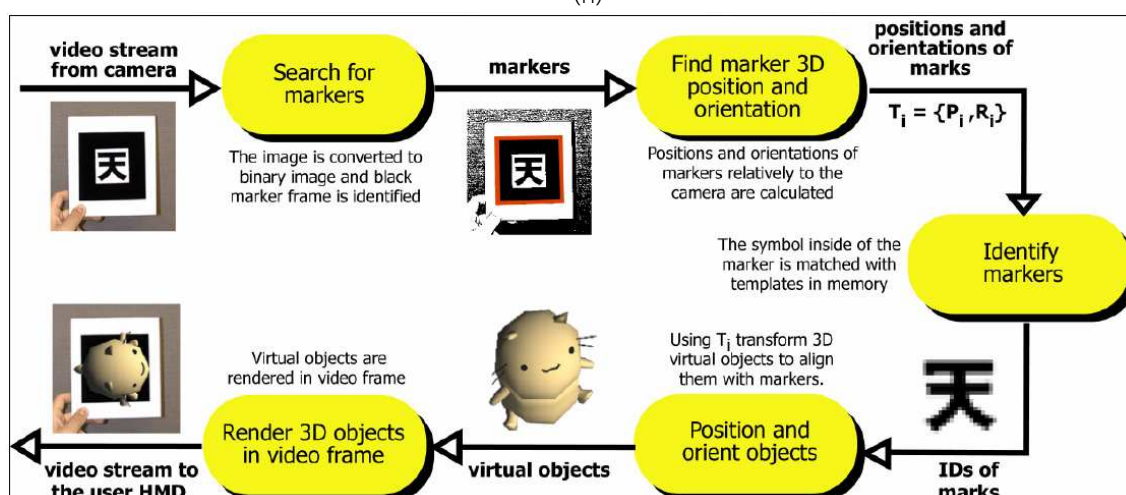
ด้วยความสามารถดังกล่าวข้างต้นของเทคโนโลยีนี้ จึงช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และเวลาเป็นอย่างมาก เนื่องจากในการสร้างภาพจะสร้างเฉพาะภาพวัตถุเสมือนจริงเท่านั้น รวมทั้งสามารถช่วยลดความผิดพลาดในการทำงาน เนื่องจากใช้ข้อมูลจากสภาพแวดล้อมจริงแทนการใช้ข้อมูลจากสภาพแวดล้อมจำลอง และยังช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์ แก้ไข และการทำงานได้สะดวก รวดเร็วขึ้น

2.2 หลักการทำงานของเทคโนโลยีเออาร์

หลักการทำงานของเทคโนโลยีเออาร์ อาศัยการใช้ความสามารถของกล้องวิดีโอดิจิทัลในการติดตามที่สนับสนุนสัญญาณภาพชนิด NTSC หรือ PAL ที่มีรูปแบบการบีบอัดในการส่งข้อมูลเป็น YUV : 4 : 2 : 2 YUV : 4 : 1 : 1 และทำการเข้ารหัสภาพเครื่องหมายเออาร์ให้เป็นรหัสทวิภาค (Binary Code) เพื่อใช้ในการคำนวณตำแหน่งระหว่างกล้องกับเครื่องหมาย โดยนำคุณลักษณะของรหัสที่ได้ข้างต้น นำมาเปรียบเทียบกับเทมเพลตของหน่วยความจำในคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นจึงได้ทำการสร้างภาพกราฟิกเสมือนจริงบนเครื่องหมายเออาร์ และนำไปแสดงบนอุปกรณ์แสดงผลต่อไป โดยการทำงานของเทคโนโลยีนี้จะทำงานในลักษณะวนซ้ำไปมาตลอดจนกว่าจะสิ้นสุดการใช้งาน ดังภาพประกอบ 2.3



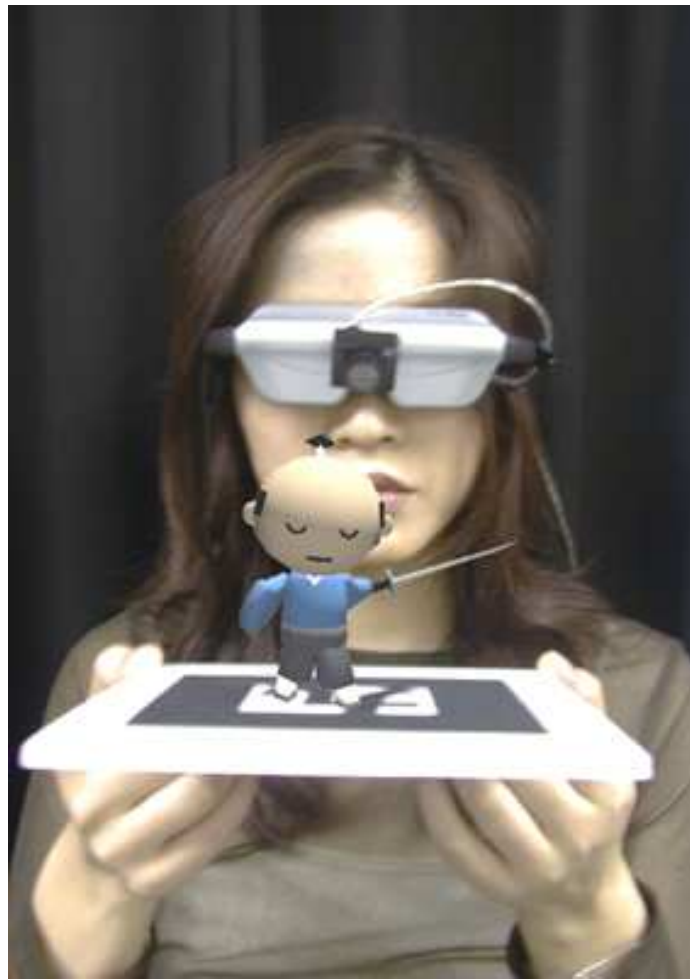
(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 2.3 ขั้นตอนการทำงานของเทคโนโลยีเออาร์ (Kato, 2000)

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการแสดงผลของเทคโนโลยีเออาร์ เช่น อุปกรณ์แสดงผลชนิดสวมใส่ศีรษะ (Head Mounted Display; HMDs) คอมพิวเตอร์ชนิดพกพา (PDA) โทรศัพท์มือถือ (Mobile Phone Device) และจอภาพคอมพิวเตอร์ (Monitor) ดังภาพประกอบ 2.4



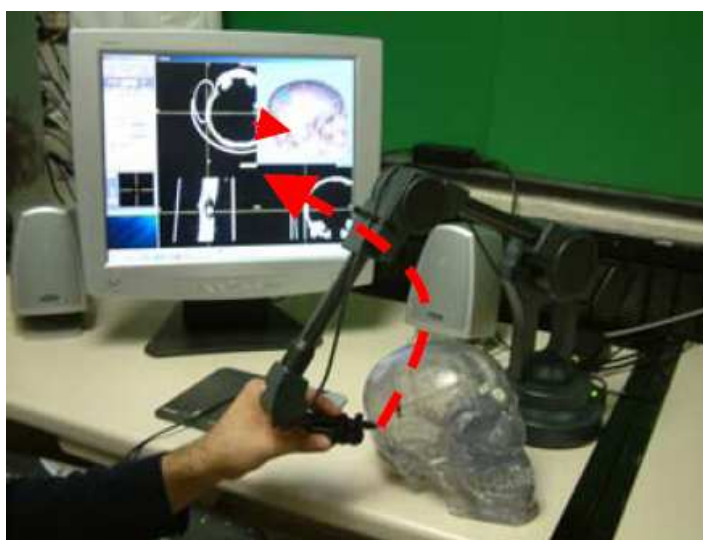
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพประกอบ 2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแสดงผลของเทคโนโลยีเออาร์

(ก) อุปกรณ์ชนิดสวมใส่ศีรษะ (HMDs) (Kato, 2000)

(ข) แท็บเล็ต-พีซี (Tablet-PC) (Michael Haller et al., 2005)

(ค) สมาร์ทโฟน (Smart Phone) (Owal, 2006)

(ง) จอภาพแสดงผล (Monitor) (Abhilash Pandya et al., 2004)

ไลบรารีที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีเออาร์

ไลบรารี คือ ซอฟต์แวร์ชนิดหนึ่งประกอบไปด้วยชุดคำสั่งต่างๆ ที่ทำหน้าที่ในการติดต่อกับส่วนฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์เพื่อใช้ในการแสดงภาพกราฟิก เป็นตัวกำหนดคุณลักษณะ ควบคุมการทำงานของโปรแกรมกราฟิก 3 มิติ และยังเป็นมาตรฐานสำหรับคอมพิวเตอร์กราฟิกในการโต้ตอบแบบทันทีทันใด รวมทั้งมีฟังก์ชันในการสร้างความเสมือนจริง (Visualization) ซึ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีเออาร์

บนไมโครคอมพิวเตอร์ จำเป็นต้องอาศัยการเขียนโปรแกรมอ้างอิงไลบรารีเออาร์ ซึ่งในปัจจุบันไลบรารีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการพัฒนาด้วยเทคโนโลยีเออาร์ ดังนี้

1. ไลบรารี ARToolkit
2. ไลบรารี ARTag
3. ไลบรารี ARLib
4. ไลบรารี osgART

ไลบรารี ARToolkit ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีเออาร์ (Jonghoon Seo et al. 2011) เนื่องจากมีฟังก์ชันที่รองรับการวิเคราะห์ภาพ (Image Analysis) การคำนวณตำแหน่งระหว่างกล้องกับเครื่องหมายภายใต้ระบบแกน 3 มิติ (3D Pose) และการสร้างกราฟิก 3 มิติในระดับพื้นฐาน (3D Rendering) โดยการสร้างกราฟิกสามารถอ้างอิงไลบรารี OpenGL (Donald Hearn, M. Pauline Baker, 2004) ซึ่งไลบรารีนี้สามารถทำงานได้หลายแพลตฟอร์ม และยังมีลักษณะเป็นโปรแกรมรหัสเปิด (Open Source) ที่อนุญาตให้นักพัฒนาสามารถนำไปพัฒนาต่อได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ภายใต้ข้อตกลงของ GPL (GNU General Public License) ยกเว้นการนำไปใช้เพื่อการพาณิชย์

2.3 ไลบรารี ARToolKit

หากกล่าวถึงการประยุกต์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีเออาร์ ผู้พัฒนามีความจำเป็นต้องอาศัยการเขียนโปรแกรมอ้างอิงไลบรารีเออาร์เพื่อใช้ในการติดตาม เข้ารหัสและคำนวณตำแหน่งของกล้องกับเครื่องหมาย เทคโนโลยีเออาร์อาศัยเทคนิคการแสดงวิดีโอทัศน์ (Computer Vision) ในรูปแบบการส่งข้อมูลสัญญาณวิดีโอแบบต่อเนื่อง ชนิดการถ่ายทอดสัญญาณสด (Live-video Streams) และเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) ที่ใช้ในกระบวนการติดตามเครื่องหมายเออาร์ (AR Marker-base Tracking) ก่อนที่จะนำไปประมวลผลกราฟิกต่อไป ซึ่งในกระบวนการติดตามเครื่องหมายเออาร์เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีเออาร์ โดยขั้นตอนของกระบวนการนี้จำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์ภาพ การเข้ารหัสและตรวจสอบข้อมูลตำแหน่งของกล้องกับเครื่องหมายเออาร์ในลักษณะ 3 มิติ (3D Pose) เพื่อรองรับการตอบสนองผู้ใช้งานทันทีในการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาของระยะและมุมมองรวมทั้งใช้เครื่องหมายในการกำหนดตำแหน่ง เพื่อใช้สำหรับสร้างกราฟิกเสมือนจริงอีกด้วย

(Kato, 2000) (Eva Hornecker et al., 2005) (Wagner & Schmalstieg, 2008) ได้อธิบายว่า ไลบรารี ARToolKit เป็นซอฟต์แวร์ไลบรารีชนิดหนึ่ง ที่ใช้เป็นเครื่องมือในการพัฒนาแอปพลิเคชัน (Software Development Kit; SDK) ของเทคโนโลยีเออาร์ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นจากภาษา C เพื่อทำหน้าที่ในการวิเคราะห์ภาพ การคำนวณตำแหน่งระหว่างกล้องกับเครื่องหมายภายใต้ระบบแกน 3 มิติ และการสร้างกราฟิก 3 มิติในระดับพื้นฐาน โดยการสร้างกราฟิกจะอาศัยการอ้างอิงไลบรารี OpenGL

ไลบรารี ARToolKit ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเวอร์ชัน 2.72.1 ซึ่งสามารถทำงานได้หลายแพลตฟอร์ม เช่น PC ภายใต้ระบบปฏิบัติการ Windows (95/98/NT/2000/XP), ระบบปฏิบัติการ Linux, ระบบปฏิบัติการ Mac OS, และ SGI IRIX เป็นต้น สำหรับการพัฒนา และประมวลผล แอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีเออาร์โดยใช้ไลบรารีดังกล่าวนี้ มีความต้องการในการใช้ทรัพยากรฮาร์ดแวร์ของเครื่อง และกล้องวิดีโอต่ำ รวมทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับ HMDs และอุปกรณ์แสดงผลมือถือทั่วไปได้ นอกจากนี้ไลบรารีนี้ยังมีลักษณะเป็นรหัสเปิดที่อนุญาตให้นักพัฒนาสามารถนำไปพัฒนาต่อได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

สำหรับปัญหาหลักที่ยุ่งยากในการพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีเออาร์นั้น คือ การติดตามมุมมองของผู้ใช้งานกับวัตถุเสมือนจริง ไลบรารี ARToolKit จึงนำเสนออัลกอริทึมทางด้านวิดิโอทัศน์ (Computer Vision Algorithm) เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยอัลกอริทึมจะทำหน้าที่ในการคำนวณตำแหน่งมุมจากกล้องกับเครื่องหมายเออาร์ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมจริงแบบทันทีกาล นอกจากนี้ยังได้นำเสนออัลกอริทึมทางด้านกรเข้าใช้งาน และการปรับเทียบตำแหน่งของกล้อง จึงทำให้สามารถทำงานร่วมกับเทคโนโลยี VRML (Virtual Reality Modeling Language) และไลบรารี OpenGL ได้

(Borting Chen et al., 2011) ได้กล่าวว่า ไลบรารี ARToolKit เป็นกระบวนการที่ทำหน้าที่เข้ารหัสภาพให้เป็นข้อมูลรหัสทวิภาค (Binarizes) โดยทำการเข้ารหัสจากภาพสีมาเป็นภาพขาวดำด้วยการใช้เทคนิคขีดแบ่งคงที่ในขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพ จึงทำให้ไลบรารีนี้ทำงานได้รวดเร็ว และสามารถติดตามได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ความส่องสว่างไม่คงที่ จะทำให้ผลที่ได้จากการทำงานของไลบรารีนี้ยังไม่น่าเชื่อถือ

2.3.1 ขั้นตอนในการพัฒนาโปรแกรมด้วยไลบรารี ARToolkit

ขั้นตอนในการพัฒนาโปรแกรม การทำงานหลักๆ จะทำงานในขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 โดยจะทำงานวนซ้ำไปมาตลอดที่โปรแกรมทำงาน และสำหรับในขั้นตอนที่ 1 และ 6 จะทำงานเพียงแค่เริ่มและสิ้นสุดโปรแกรมเท่านั้น ซึ่งมีฟังก์ชันที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนดังตารางที่ 1 โดยในแต่ละฟังก์ชันมีรายละเอียดการทำงานดังนี้

2.3.1.1 Initialize the application เป็นขั้นตอนการเริ่มเตรียมค่าต่างๆ ของการตรวจจับภาพวิดีโอ การรับค่าพารามิเตอร์ และรูปแบบสัญญาณวิดีโอต่างๆ ของกล้องวิดีโอ

2.3.1.2 Grab a video input frame เป็นขั้นตอนในการนำเข้าเฟรมวิดีโอ

2.3.1.3 Detect the marker and recognized patterns เป็นขั้นตอนการติดตามค้นหา เข้ารหัส และวิเคราะห์เครื่องหมายเออาร์

2.3.1.4 Calculate camera transformation เป็นขั้นตอนการคำนวณค่าความสัมพันธ์จากตำแหน่งบนสภาพแวดล้อมจริงระหว่างกล้อง และเครื่องหมายเออาร์

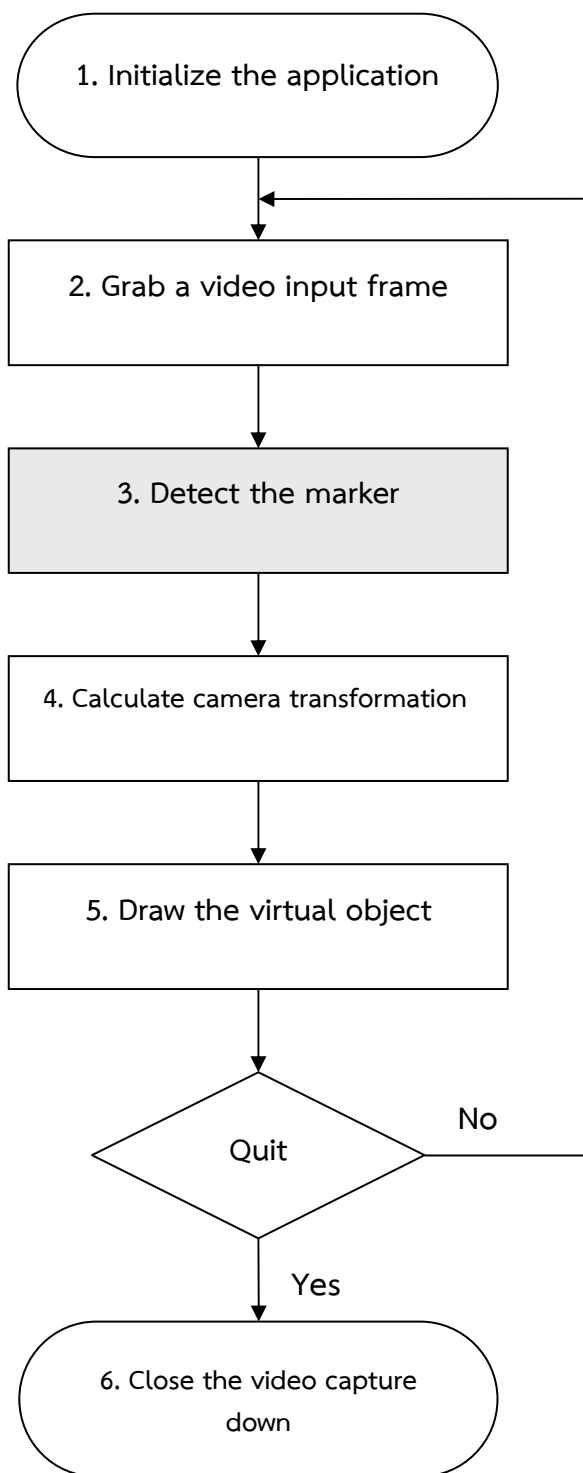
2.3.1.5 Draw the virtual object เป็นขั้นตอนการสร้างกราฟิก 3 มิติลงบนเครื่องหมายเออาร์ ณ ตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ

2.3.1.6 Close the video capture down เป็นขั้นตอนการปิดการติดต่อกับกล้องวิดีโอ

ตาราง 2.1 ตัวอย่างฟังก์ชันของไลบรารี ARToolkit (Kato, 2000)

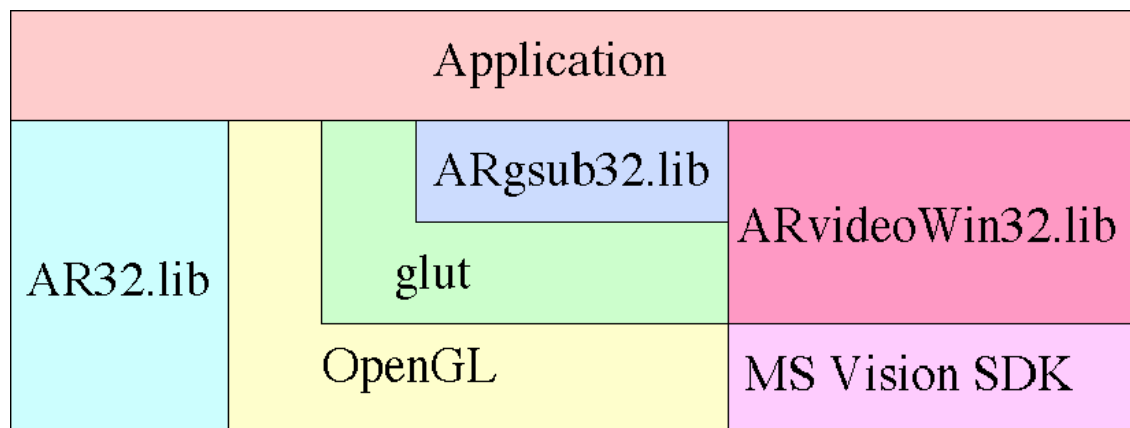
ขั้นตอนการทำงานของไลบรารี ARToolkit	ฟังก์ชัน
1. Initialize the application	<i>init</i>
2. Grab a video input frame	<i>arVideoGetImage</i> (called in mainloop)
3. Detect the marker	<i>arDetectMarker</i> (called in mainloop)
4. Calculate camera transformation	<i>arGetTransMat</i> (called in mainloop)
5. Draw the virtual object	<i>draw</i> (called in mainloop)
6. Close the video capture down	<i>cleanup</i>

ไลบรารีนี้มีการทำงานหลักๆ ในขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 โดยจะทำงานวนซ้ำไปมาตลอดที่โปรแกรมทำงาน จนกระทั่งมีการออกจากโปรแกรมจึงหยุดการทำงาน ดังภาพประกอบ 2.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการติดตามเครื่องหมาย (Detect the marker) ซึ่งหากไม่สามารถติดตามได้ จะส่งผลให้ไม่สามารถที่จะแสดงผลวัตถุเสมือนจริงได้ หรืออาจทำให้เกิดการประมวลผลที่ไม่สมบูรณ์ขึ้น เนื่องจากต้องอาศัยการติดตามวนซ้ำไปมาอยู่ตลอดเวลาตามการเปลี่ยนแปลงมุมมองของผู้ใช้งานนั่นเอง



ภาพประกอบ 2.5 ฟังก์ชันขั้นตอนการทำงานของไลบรารี ARToolkit

(Kato, 2000) กล่าวว่า โครงสร้างไลบรารีของ ARToolKit ซึ่งภายในทำหน้าที่เก็บค่าต่างๆ ที่เรียกใช้เป็นประจำในการประมวลผล รวมถึงใช้ในการเก็บฟังก์ชันที่ใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีเออาร์ ดังภาพประกอบ 2.6



ภาพประกอบ 2.6 โครงสร้างของไลบรารี ARToolKit (Kato, 2000)

โครงสร้างหลักของไลบรารี ARToolkit ดังนี้

1. ไลบรารี AR32.lib เป็นที่เก็บฟังก์ชันที่ใช้ในการเก็บค่าที่เกิดจากกระบวนการติดตาม ค่าที่ได้จากการคำนวณระยะห่าง และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นประจำในการเรียกใช้งาน
2. ไลบรารี ARVideoWin32.lib เป็นที่เก็บค่าที่ใช้ในการติดตามสัญญาณวิดีโอนำเข้า โดยจะทำงานร่วมกับไลบรารี Microsoft Vision SDK
3. ไลบรารี ARsub32.lib เป็นที่เก็บค่าฟังก์ชันสำหรับกราฟิกพื้นฐานต่างๆ โดยอ้างอิงกับไลบรารี OpenGL และ GLUT ในการสร้างกราฟิก 3 มิติ

2.3.2 ระบบแกน 3 มิติของไลบรารี ARToolkit

ระบบแกน 3 มิติของไลบรารีนี้ มีความแตกต่างจากระบบแกนที่ใช้กันปกติ จึงต้องเข้าใจความสัมพันธ์ของแกนเหล่านี้ สำหรับใช้ในการผันกลับภาพ (Reverse Image) หรือแสดงตำแหน่งที่ผิดของวัตถุ เนื่องจากระบบแกนของเครื่องหมายเออาร์กับกล้อง ซึ่งถูกกำหนดให้แกนอ้างอิง Z เข้าหากัน จึงต้องอาศัยการผันกลับภาพ โดยระบบแกน 3 มิติของไลบรารีนี้ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

2.3.2.1 ระบบแกนชนิด Computer Vision

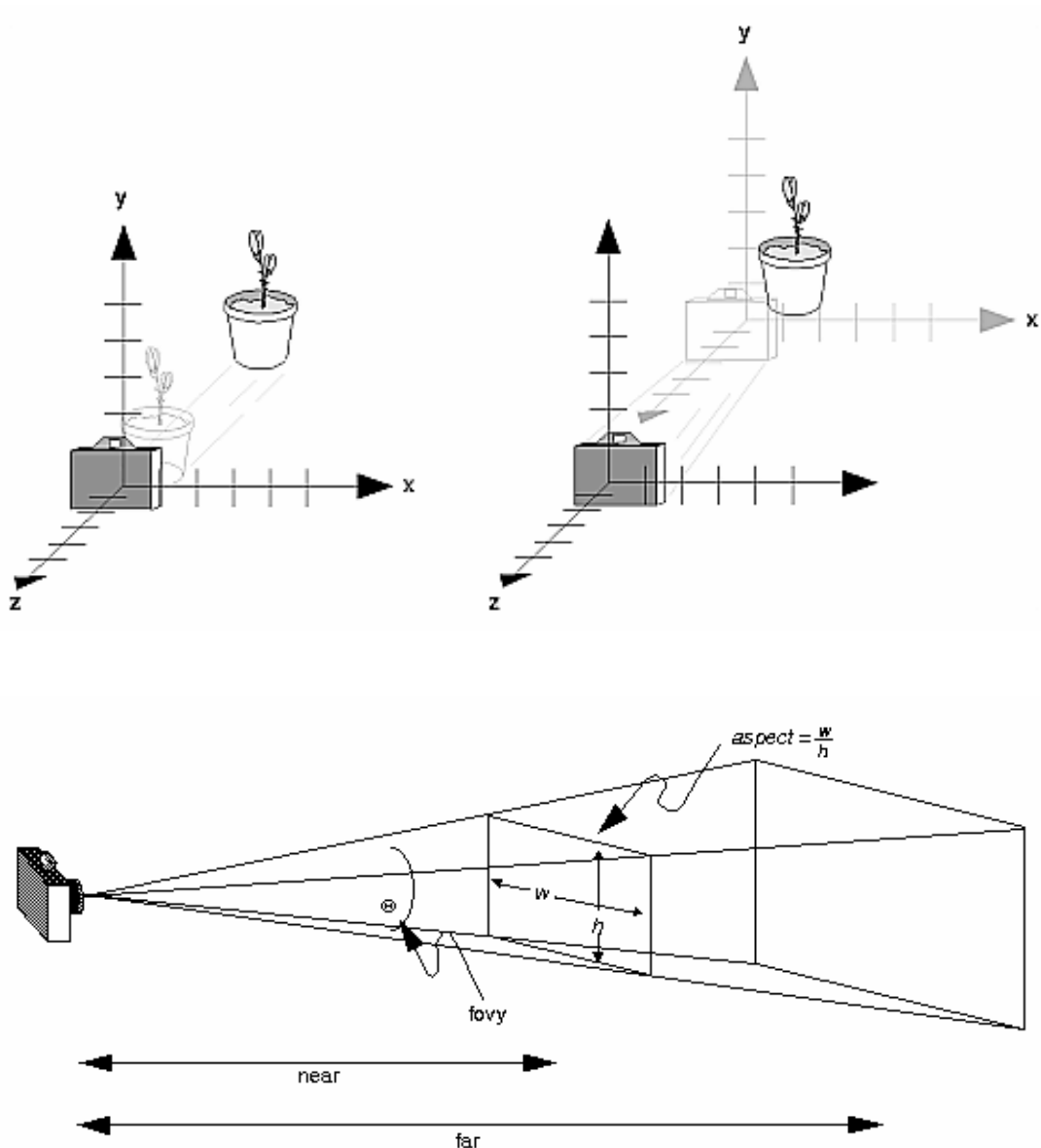
2.3.2.2 ระบบแกนชนิด Rendering

2.3.3 ระบบแกนชนิด Computer Vision

ระบบแกนชนิดนี้จะถูกใช้เป็นแกนหลักในไลบรารี ARToolkit ซึ่งจะทำหน้าที่รับค่าตำแหน่งอ้างอิงของเครื่องหมายด้วยระบบแกนของกล้อง โดยการใช้ฟังก์ชัน *arGetTransMat* รับค่าขณะที่ยังไม่ได้ทำการผันกลับภาพ แต่ในกรณีที่ต้องการรับค่าตำแหน่งอ้างอิงของกล้องด้วยระบบแกนของเครื่องหมาย จึงใช้การผันกลับภาพด้วยฟังก์ชัน *arMatrixInverse*

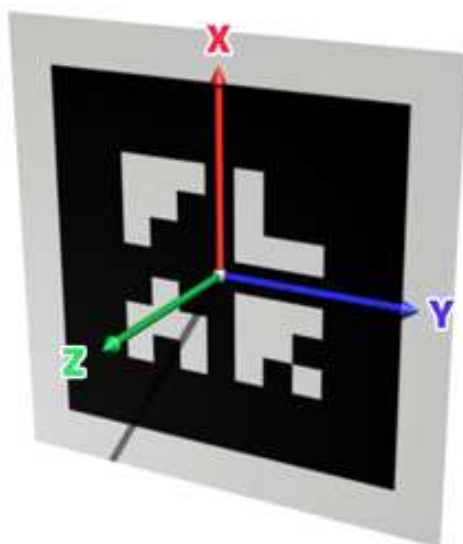
2.3.4 ระบบแกนชนิด Rendering

ระบบแกนชนิดนี้จะถูกใช้ร่วมกับไลบรารี OpenGL เพื่อช่วยในการวาดหรือสร้างกราฟิกขึ้นมา ซึ่งต้องอาศัยระบบแกน 3 มิติ โดยใช้หลักการของกฎมือขวา ตัวอย่างเช่น แกน Z จะหันแกนเข้าหาตัวเรา แต่ถ้าจากกล้องแกน Z จะกลายเป็น $-Z$ เป็นต้น ซึ่งไลบรารี ARToolkit จะใช้มุมมองแบบทัศนียภาพ (Perspective) ดังภาพประกอบ 2.7



ภาพประกอบ 2.7 ระบบแกนชนิด Rendering (Kato, 2000)

นอกจากนี้ไลบรารี ARToolKit อาศัยอัลกอริทึมทางด้าน การแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ (Computer Vision) ซึ่งทำหน้าที่ในการคำนวณตำแหน่งระหว่างกล้องกับตำแหน่งของเครื่องหมายเออาร์ภายใต้ระบบแกน 3 มิติแบบพิกัด โดยประกอบไปด้วยแกน X แกน Y และแกน Z ดังภาพประกอบ 2.8 รวมทั้งยังมีฟังก์ชันให้ผู้พัฒนาสามารถสร้างเครื่องหมายเออาร์ในรูปแบบต่างๆ ได้



ภาพประกอบ 2.8 ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ (C. Kirner et al, 2006)

การเขียนโปรแกรมในอ้างอิงไลบรารี ARToolkit จำเป็นต้องมีความเข้าใจในเรื่องของความสัมพันธ์ระหว่างกล้องกับเครื่องหมายเออาร์หรือกับฉากอุดมคติ รวมไปถึงระบบแกน 3 มิติที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหน้าที่หลักของไลบรารีนี้ต้องมีการคำนวณเพื่อรองรับการเปลี่ยนมุมมองและส่งเป็นสัญญาณวิดีโอต่อเนื่องแบบทันทีทันใด ซึ่งสามารถใช้สมการต่อไปนี้ช่วยในการเขียนโปรแกรมให้คำนวณหาตำแหน่งอ้างอิงได้ดังสมการต่อไปนี้

2.3.5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างกล้องกับเครื่องหมายเออาร์

ขั้นตอนของการคำนวณค่าตำแหน่งในเชิง 3 มิติของเครื่องหมายเออาร์กับกล้องวิดีโอซึ่งค่าจะถูกแสดงในรูปของเมตริกซ์ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 4×4 โดยค่า T_{CM} สามารถคำนวณได้จากดังสมการที่(1)

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= T_{CM} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \\ 1 \end{bmatrix}$$

2.3.6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างกล้องกับระบบแกนฉากอุดมคติ (Ideal Screen)

สำหรับขั้นตอนของการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างจุดใดๆ ณ แกนอ้างอิงของกล้องกับจุดที่ตรงกันในฉากอุดมคติ สามารถคำนวณได้จากดังสมการที่(2)

$$\begin{bmatrix} hX1 \\ hY1 \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sf_x & 0 & x_c & 0 \\ 0 & sf_y & y_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยที่ C คือ ค่าพารามิเตอร์ของกล้อง ซึ่งจะคำนวณได้มาจากขั้นตอนปรับเทียบมาตรฐานของกล้อง (Camera Calibrations)

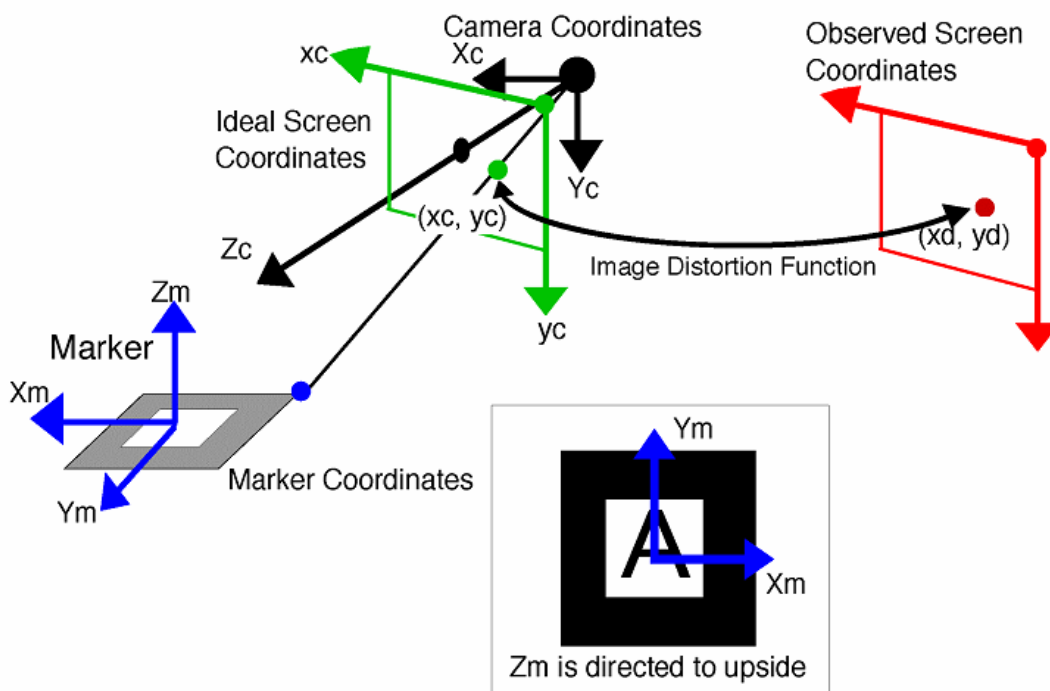
2.3.6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างระบบแกนของฉากอุดมคติกับฉากสังเกต (Observed Screen)

สำหรับขั้นตอนการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างระบบแกนของฉากอุดมคติกับฉากสังเกต ดังภาพประกอบ 2.9 โดยที่ค่า x_0, y_0 ได้มาจากกระบวนการปรับเทียบมาตรฐานของกล้องวิดีโอ (Camera Calibration) ซึ่งการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างระบบแกนของฉากอุดมคติกับฉากสังเกต สามารถคำนวณได้จากดังสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} d^2 &= (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 \\ p &= \{1 - fd^2\} \\ x_0 &= p(x_1 - x_0) + x_0, \\ y_0 &= p(y_1 - y_0) + y_0 \end{aligned} \quad (3)$$

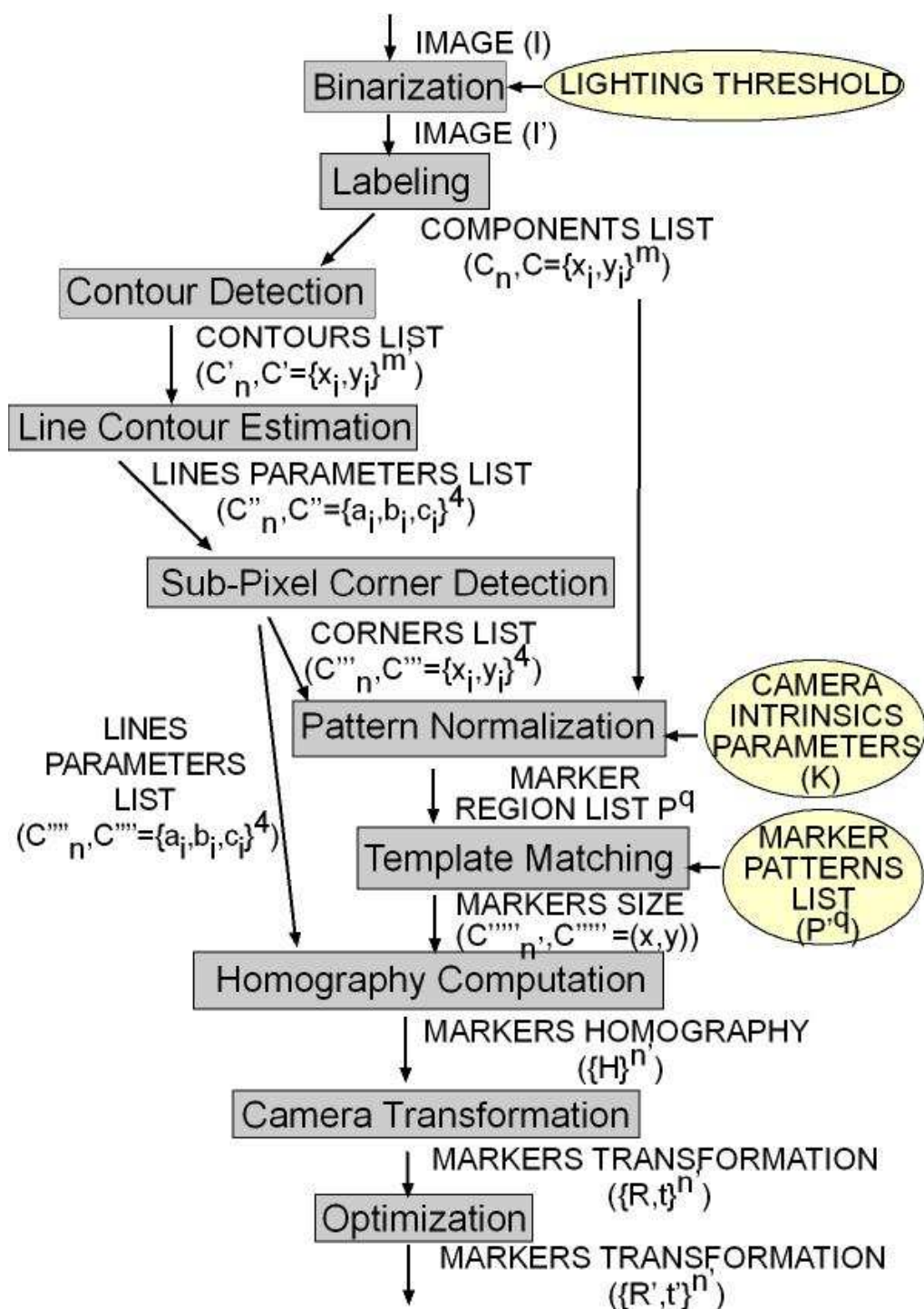
โดยที่ (x_0, y_0) คือ จุดศูนย์กลางของการ Distortion

f คือ Distortion Factor



ภาพประกอบ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบแกนของกล้องกับระบบแกนเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARToolkit (Kato, 2000)

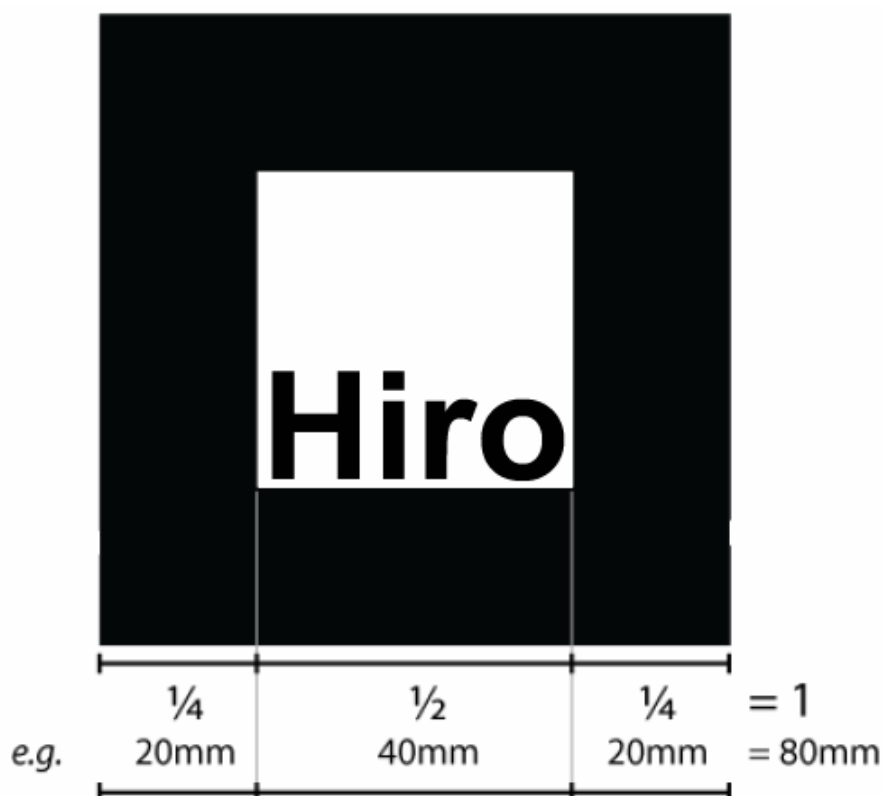
การทำงานของไลบรารี ARToolkit อาศัยกระบวนการประมวลผลรูปภาพดิจิทัล โดยใช้วิธีการทำค่าขีดแบ่ง เพื่อวิเคราะห์ภาพ (Image Analysis) และการเข้ารหัสภาพเป็นข้อมูลรหัสทวิภาค ก่อนที่จะนำข้อมูลรหัสดังกล่าวข้างต้นไปทำการเปรียบเทียบในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ (Template Matching) จากนั้นจึงอาศัยวิธีการแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ และวิดีโอทัศน์ ในการประมวลผลภาพกราฟิกเข้ากับสภาพแวดล้อมจริงแบบทันกาล โดยวิธีการทำงานมีอัลกอริทึม ดังภาพประกอบ 2.10



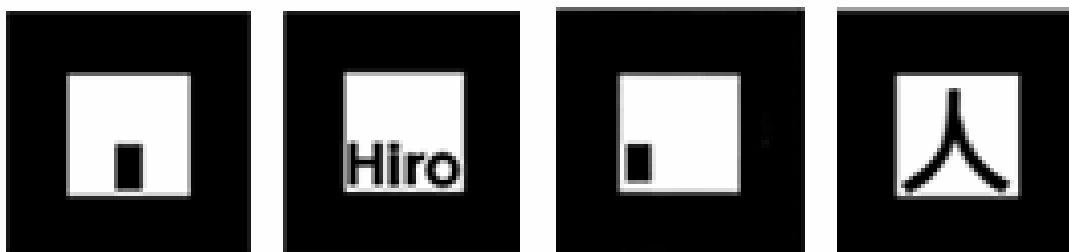
ภาพประกอบ 2.10 อัลกอริทึมการทำงานของไลบรารี ARToolkit (Kato, 2000)

นอกจากอัลกอริทึมการแสดงผลทางด้านคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ในการคำนวณตำแหน่งระหว่างกล้องวิดีโอกับตำแหน่งของเครื่องหมายภายใต้ระบบแกน 3 มิติแล้ว จะเห็นได้ว่ากระบวนการวิเคราะห์ภาพ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่ง ซึ่งในกระบวนการนี้จะอาศัยข้อมูลที่จำเป็นของ

เครื่องหมายเออาร์ เช่น ขนาด และรูปแบบของเครื่องหมายเออาร์ไลบรารี ARToolkit โดยรูปแบบของเครื่องหมายเออาร์ มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดกว้าง 8 เซนติเมตร และยาวเท่ากับ 8 เซนติเมตรขึ้นไป โดยกำหนดให้ขอบมีสีดำหนา 2 เซนติเมตร พื้นหลังด้านในเป็นสีขาว และมีรูปแบบของลวดลายเป็นสีดำเช่นเดียวกัน ดังภาพประกอบ 2.11 หรือสามารถใช้เครื่องหมายเออาร์มาตรฐานของไลบรารีนี้ได้ เนื่องจากสะดวก รวดเร็วในการนำไปใช้งาน รวมทั้งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ภาพได้ดี ดังภาพประกอบ 2.12



ภาพประกอบ 2.11 รูปแบบที่เหมาะสมของเครื่องหมายเออาร์ไลบรารี ARToolkit (Kato, 2000)



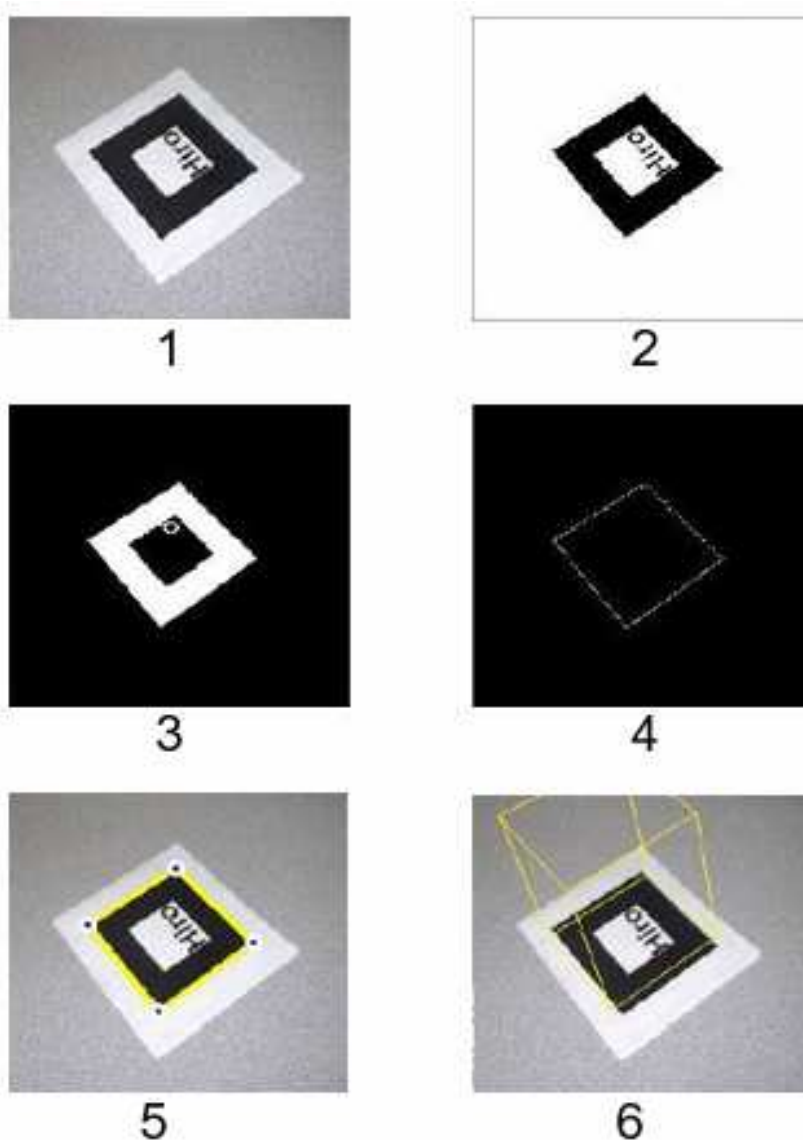
ภาพประกอบ 2.12 เครื่องหมายเออาร์มาตรฐานของไลบรารี ARToolkit (Kato, 2000)

กระบวนการวิเคราะห์ภาพ จะอาศัยการติดตามเครื่องหมายเออาร์ในแต่ละเฟรมจากกล้องวิดีโอ ดังภาพประกอบ 2.13 โดยมีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

1. ทำการนำเข้าภาพจากกล้องวิดีโอ และแปลงภาพสีเป็นภาพขาวดำ
2. ทำการเข้ารหัสด้วยเทคนิคค่าขีดแบ่งคงที่
3. ทำการหาพื้นที่ต่อเนื่องกัน ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพแบบ Connected

Component Labeling

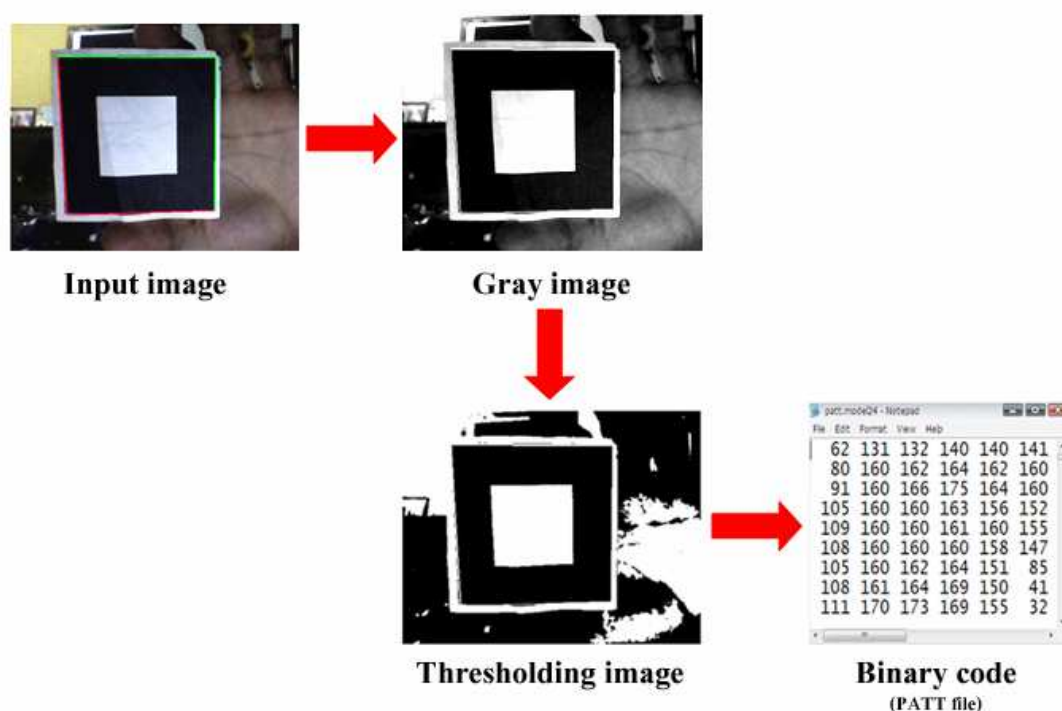
4. ทำการหาระดับเส้นรอบรูป (Contours) ของพื้นที่จากขั้นตอนที่แล้ว
5. ทำการประเมินหาค่าพารามิเตอร์จากสมการเส้นตรง โดยใช้แทนเส้นรอบรูปในลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 4 เส้น จากนั้นจึงทำการกำหนดจุดมุมรอบเครื่องหมายเออาร์ ซึ่งหาได้จากจุดตัดของเส้นตรงทั้ง 4 เส้นที่หาได้ก่อนหน้านี้
6. ทำการกำหนดจุดมุมทั้ง 4 จุด และนำไปใช้ในขั้นตอนถัดไป



ภาพประกอบ 2.13 กระบวนการวิเคราะห์ภาพของไลบรารี ARToolkit (Kato, 2000)

2.4 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARToolkit

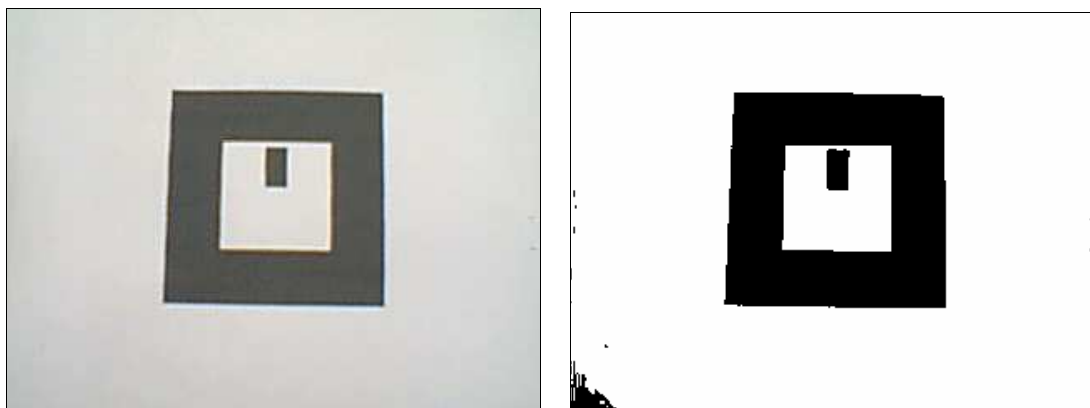
กระบวนการหลักในการพัฒนาโปรแกรมด้วยเทคโนโลยีเออาร์ นอกจากการเขียนโปรแกรมอ้างอิงไลบรารีเออาร์เพื่อคำนวณตำแหน่งของกล่องกับเครื่องหมายแล้ว การติดตามเครื่องหมายเออาร์ ซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งในการวิเคราะห์ภาพที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น จึงนับได้ว่าเป็นอีกกระบวนการที่สำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากต้องอาศัยการเข้ารหัสสัญญาณภาพเครื่องหมายเออาร์ ที่เป็นสัญญาณวีดิโอชนิดต่อเนื่องด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัล เพื่อเข้ารหัสเป็นรหัสทวิภาค หากไม่สามารถติดตามได้ก็จะส่งผลให้ไม่สามารถประมวลผลด้วยเทคโนโลยีนี้ได้ ซึ่งในการติดตามเพื่อเข้ารหัสด้วยไลบรารี ARToolkit นั้น อาศัยวิธีการแปลงจากภาพสีเป็นภาพขาวดำด้วยกระบวนการวิเคราะห์ภาพ จากนั้นจึงใช้เทคนิคการแยกบริเวณจุดภาพ (Segmentation) โดยใช้การทำค่าขีดแบ่ง ซึ่งวิธีการนี้สามารถทำงานได้ดีกับภาพที่มีลักษณะขาวดำ (Gray Image) วิธีการดังกล่าวจึงมีความเหมาะสม เมื่อนำมาใช้กับเครื่องหมายเออาร์ ซึ่งมีลักษณะการแยกสีวัตถุและพื้นหลังที่ชัดเจน จากนั้นในขั้นตอนถัดไปจึงทำการเข้ารหัสเป็นรหัสทวิภาคในรูปแบบไฟล์นามสกุล PATT เพื่อกำหนดคุณลักษณะของเครื่องหมายเออาร์ (Identification Marker) ที่จะนำไปใช้งาน และใช้ในการคำนวณตำแหน่งระหว่างกล่อง และเครื่องหมายเออาร์ รวมถึงเพื่อใช้ในการกำหนดตำแหน่งสำหรับสร้างภาพกราฟิก 3 มิติต่อไป ดังภาพประกอบ 2.14



ภาพประกอบ 2.14 กระบวนการติดตามเครื่องหมายเออาร์และเข้ารหัสด้วยไลบรารี ARToolkit

2.5 การขีดแบ่ง

Gonzalez et al. (2004) ได้อธิบายว่า การทำค่าขีดแบ่งครอบคลุม (Global Thresholding หรือ Intensity Thresholding) เป็นวิธีการหนึ่งในกระบวนการประมวลผลภาพระดับต่ำ ซึ่งทำหน้าที่จัดการกับภาพที่มีลักษณะขาวดำ โดยจะสร้างภาพขึ้นมาใหม่ในลักษณะเป็นรหัสทวิภาคหรือเป็นลักษณะภาพขาวดำ ดังรูปภาพประกอบ 2.15



ภาพประกอบ 2.15 การทำค่าขีดแบ่งครอบคลุม

การทำค่าขีดแบ่งในแต่ละจุดภาพ (Pixel) มี 2 ค่า คือ 0 และ 1 หรือ 0 และ 255 โดยค่า 0 แทนจุดภาพสีดำ และค่า 1 หรือ 255 แทนจุดภาพสีขาว ซึ่งอาศัยการเปรียบเทียบกับค่าขีดแบ่งเริ่มต้นและทำการแยกกลุ่มของจุดภาพว่าเป็นวัตถุเดียวกันหรือเป็นภาพพื้นหลัง ถ้ามีค่ามากกว่าค่าขีดแบ่ง จะทำการเปลี่ยนค่าจุดภาพในตำแหน่งนั้นให้เป็นค่าสูงสุดหรือเป็นภาพวัตถุ และถ้าน้อยกว่าค่าขีดแบ่งจะทำการเปลี่ยนค่าจุดภาพในตำแหน่งนั้นให้เป็นค่าต่ำสุดหรือเป็นภาพพื้นหลัง สามารถคำนวณค่าขีดแบ่งได้จากสมการที่(4)

$$T = T [f(x,y)] \quad (4)$$

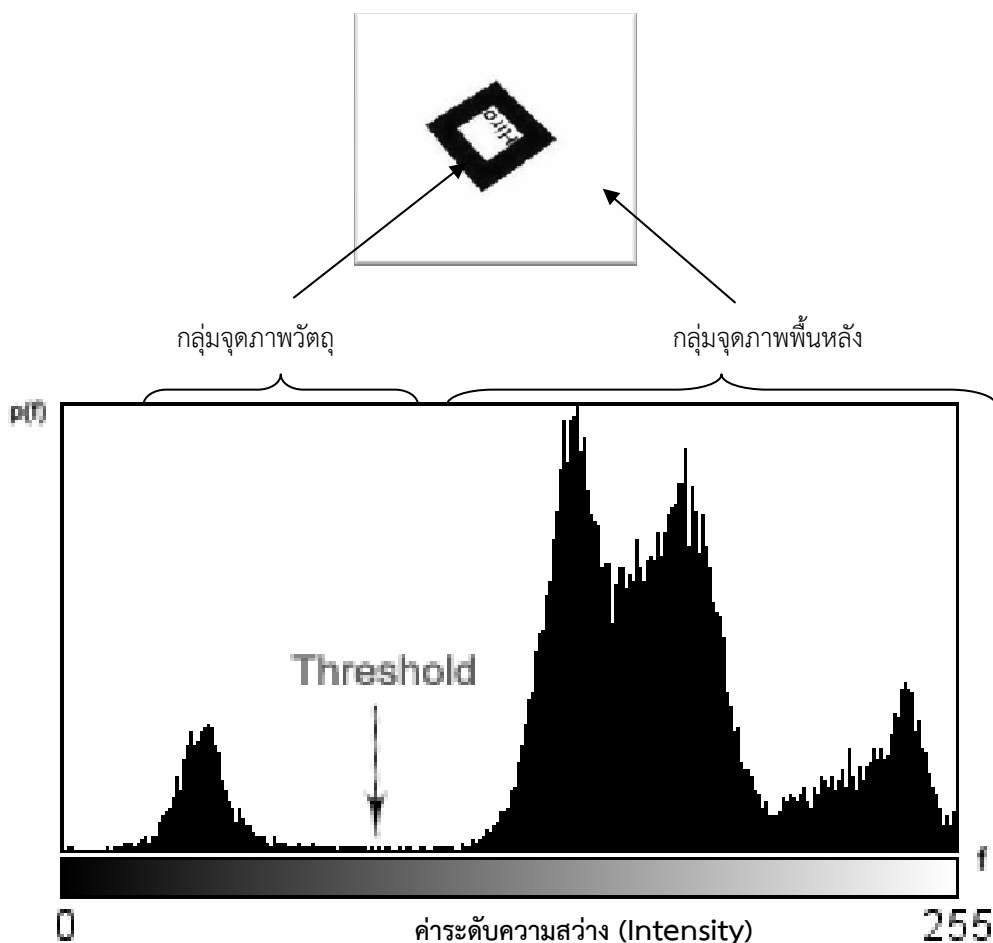
โดยที่ T คือ ค่าขีดแบ่งครอบคลุม

$f(x,y)$ คือ ระดับข้อมูลภาพขาวดำ (Gray-Level) ณ ตำแหน่งที่ x, y

โดยปกติในการแยกวัตถุออกจากพื้นหลังด้วยวิธีการทำค่าขีดแบ่งครอบคลุม ซึ่งจะพิจารณาจากค่ากราฟแสดงค่าความถี่ (Histogram) โดยการเลือกค่าขีดแบ่งจะเลือกจากจุดต่ำสุดของกราฟแสดงค่าความถี่ ที่อยู่ระหว่างจุดสูงสุด (Peaks) ภาพประกอบที่ 18 ซึ่งสามารถคำนวณค่าขีดแบ่งได้จากสมการที่(5)

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{ถ้า } f(x,y) > T \\ 0 & \text{อื่น หรือ } f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (5)$$

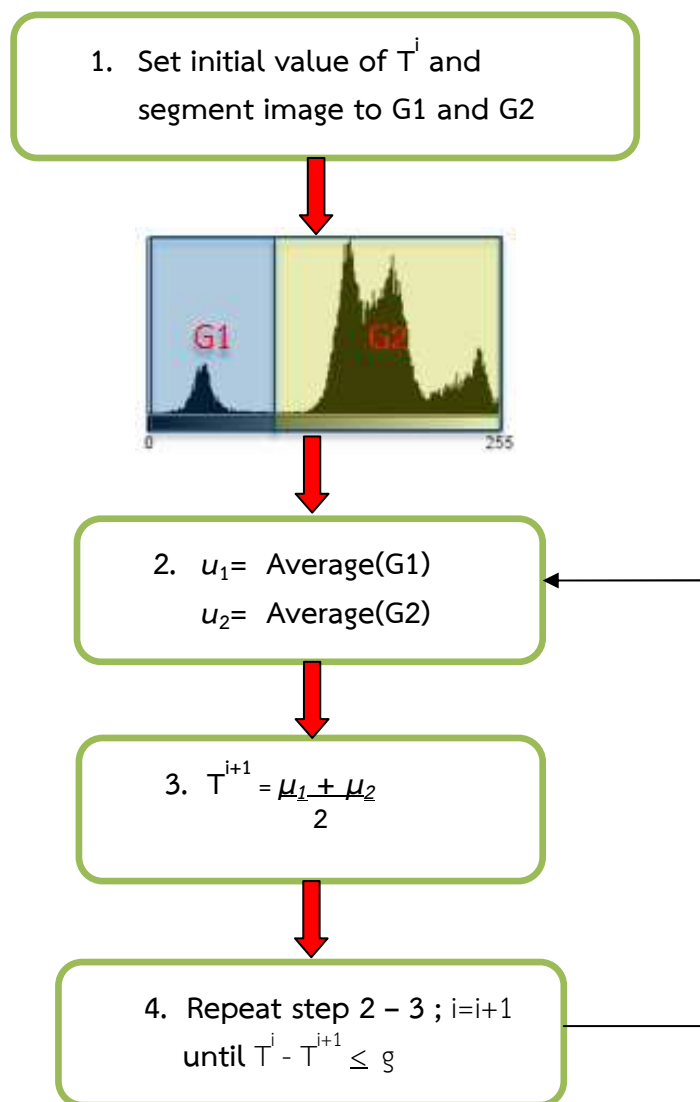
โดยที่ $g(x,y)$ คือ ข้อมูลภาพค่าขีดแบ่ง ณ ตำแหน่งที่ x, y
 $f(x,y)$ คือ ระดับข้อมูลภาพขาวดำ ณ ตำแหน่งที่ x, y
 T คือ ค่าขีดแบ่งครอบคลุม



ภาพประกอบ 2.16 การเลือกค่าขีดแบ่งจากกราฟแสดงค่าความถี่ (R. C. Gonzalez et al., 2004)

อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักของวิธีการดังกล่าวข้างต้น คือ การหาระดับค่าขีดแบ่งที่ดีหรือค่าที่เหมาะสม จึงได้นำวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ (Automatic Threshold Level Selection) มาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งวิธีการนี้มีขั้นตอนในการทำงานโดยการกำหนดค่าขีดแบ่งเริ่มต้น (T_0) จากนั้นจึงทำการแยกบริเวณกลุ่มจุดภาพด้วยการจัดบริเวณ (Region) ออกเป็น 2 บริเวณ โดยกำหนดให้บริเวณที่ 1 (G_1) คือกลุ่มค่าข้อมูลภาพขีดแบ่ง ณ ตำแหน่งที่ x และ y ที่มีค่ามากกว่าค่าขีดแบ่ง (กลุ่มจุดภาพของวัตถุ) และกำหนดให้บริเวณที่ 2 (G_2) คือกลุ่มค่าข้อมูลภาพขีดแบ่ง ณ ตำแหน่งที่ x และ y ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าขีดแบ่ง (กลุ่มจุดภาพของพื้นหลัง) หลังจากนั้นจึงทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าสีเทาในแต่ละบริเวณ และนำค่าที่ได้ในแต่ละบริเวณมาทำการคำนวณหาค่าขีดแบ่ง

โดยการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ซึ่งในการเลือกระดับค่าขีดแบ่งอัตโนมัติจะทำงานวนซ้ำไปที่ขั้นตอนการหาค่าเฉลี่ยในแต่ละบริเวณถึงขั้นตอนการหาค่าเฉลี่ยใหม่ จนกระทั่งค่าขีดแบ่งที่ได้มีผลต่างน้อยกว่าค่าขีดแบ่งที่ถูกกำหนดไว้เป็นค่าเริ่มต้น (T^i) จึงจะหยุดขั้นตอนการทำซ้ำ ซึ่งวิธีการเลือกระดับค่าขีดแบ่งอัตโนมัติมีแนวคิดของอัลกอริทึมในการทำงาน ดังภาพประกอบ 2.17



ภาพประกอบ 2.17 อัลกอริทึมของวิธีการเลือกระดับค่าขีดแบ่งอัตโนมัติ

สำหรับขั้นตอนในการปรับปรุงวิธีการเลือกกระดบซิดแบ่งอัตโนมัติ มีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. กำหนดค่าซิดแบ่งเริ่มต้นจากสมการที่(6)

$$T^i = \frac{\min(g(x,y)) + \max(g(x,y))}{2} \quad (6)$$

โดยที่ $g(x,y)$ คือ ข้อมูลภาพค่าซิดแบ่ง ณ ตำแหน่งที่ x, y
 T^i คือ ค่ากลางของภาพ

2. คำนวณและกำหนดค่าซิดแบ่งเริ่มต้นจากสมการที่(7)

$$T^i = \frac{\sum_{k=0}^{T-1} h_k * k}{\sum_{k=0}^{T-1} h_k} \quad (7)$$

โดยที่ h_k คือ จำนวนของค่าสีเทาที่มีค่าระดับสีเทาเท่ากับ k และกำหนดให้ $i=0$

3. แยกบริเวณกลุ่มจุดภาพด้วยการจัดกลุ่มออกเป็น 2 กลุ่ม คือ G1 และ G2 โดยใช้ค่าซิดแบ่งที่ได้จากสมการที่ (8) และ (9)

$$G1 = \{ g(x,y) \mid g(x,y) \geq T^i \} \quad (8)$$

$$G2 = \{ g(x,y) \mid g(x,y) \leq T^i \} \quad (9)$$

4. คำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าสีเทา μ_1 และ μ_2 ของบริเวณจุดภาพ G1 และ G2 ตามลำดับจากสมการที่(10)

$$\mu_1 = \frac{\sum_{k=0}^{T^i} h_k * k}{\sum_{k=0}^{T^i} h_k} \quad (10)$$

$$\mu_2 = \frac{\sum_{k=T^i+1}^{T-1} h_k * k}{\sum_{k=T^i+1}^{T-1} h_k}$$

5. คำนวณค่าขีดแบ่งใหม่ จากสมการที่(11)

$$T^{i+1} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} \quad (11)$$

6. ตรวจสอบเงื่อนไข ถ้า $T^i - T^{i+1} \leq g$ แล้วมีค่าเป็นเท็จ กำหนดให้ $i=i+1$ และ $T^i = T^{i+1}$ จากนั้นให้ทำงานวนซ้ำไปที่ขั้นตอนที่ 4 จนกระทั่งเงื่อนไขดังกล่าวมีค่าเป็นจริง จึงหยุดการวนซ้ำ

7. ใช้ค่าขีดแบ่งที่ได้ คือ T^i ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมทำการแยกบริเวณจุดภาพจากสมการที่(12)

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 \text{ (วัตถุ)} & \text{ถ้า } 0 < g(x,y) \leq T^i \\ 0 \text{ (พื้นหลัง)} & \text{ถ้า } T^i < g(x,y) \leq T \end{cases} \quad (12)$$

การนำวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ จะช่วยลดจำนวนข้อมูลในรูปภาพที่ไม่จำเป็นในการวิเคราะห์หลัง การจัดระเบียบข้อมูลให้เป็นกลุ่มได้ดีขึ้น และสามารถแสดงข้อมูลที่เข้าใจง่ายขึ้น ซึ่งวิธีการที่นำมาใช้ปรับปรุงดังกล่าว สามารถใช้แก้ปัญหาหลักของการทำค่าขีดแบ่งคงที่หรือวิธีการค่าขีดแบ่งครอบคลุมด้วยการจัดกลุ่มก่อนทำการคำนวณค่าขีดแบ่งใหม่ จึงทำให้ได้ระดับค่าขีดแบ่งที่ดีหรือค่าขีดแบ่งที่เหมาะสม ส่งผลให้การติดตามเครื่องหมายเออาร์มีประสิทธิภาพดีขึ้น นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวยังสามารถทำงานได้ดีภายใต้สภาวะที่ความส่องสว่างมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่คงที่อีกด้วย

2.6 ความส่องสว่าง

ความส่องสว่าง (Illumination) คือ ปริมาณแสงที่กระทบลงบนวัตถุต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็นลูเมนต่อตารางเมตรหรือลักซ์ (Lux) (สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย, 2541) และมาตรฐานของ CIE (CIE Standard, 2007) และ IEC 61892-2 (IEC Standard, 2005) ได้กำหนดมาตรฐานปริมาณความส่องสว่างภายในอาคารตามข้อกำหนด โดยกำหนดขึ้นตามประเภทของพื้นที่หรือกิจกรรม ดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 ปริมาณความส่องสว่างตามมาตรฐานของ CIE และ IEC 61892-2

พื้นที่ต่างๆ	มาตรฐาน CIE (ลักซ์)	มาตรฐาน IEC (ลักซ์)
ห้องประชุม	300-500-750	200-300-500
ห้องทำงานทั่วไป	300-500-750	200-300-500
ห้องคอมพิวเตอร์	300-500-750	200-300-500
ห้องสมุด	300-500-750	200-300-500
ห้องเก็บของ	100-150-200	100-150-200
ห้องน้ำ	100-150-200	100-150-200
บันได	100-150-200	100-150-200
ลิฟต์	100-150-200	100-150-200
ทางเดิน	50-100-150	100-150-200

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

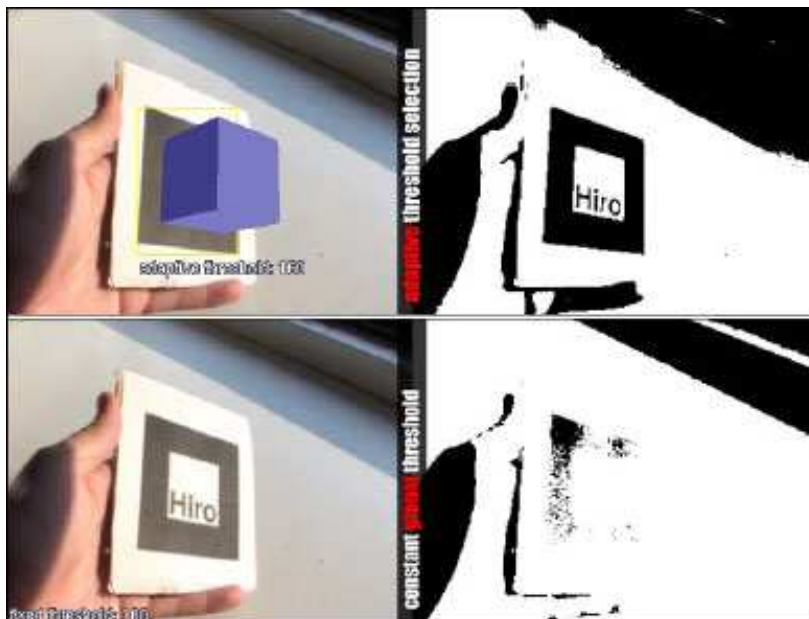
การพัฒนาและปรับปรุงเทคนิคการติดตามโดยใช้พื้นฐานการติดตามด้วยเครื่องหมายเออาร์ ซึ่งมีจุดเด่นในด้านความสะดวกสบายในการติดตั้ง ง่ายในการสร้างเครื่องหมาย มีฟังก์ชันคำนวณ ตำแหน่งระหว่างกล้องและเครื่องหมาย และไม่เสียค่าใช้จ่าย จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้แพร่หลายในหลายๆ ด้าน เช่น ด้านการแพทย์ การทหาร การศึกษา ศิลปะ ธุรกิจ สถาปัตยกรรม และด้านวิศวกรรม อย่างไรก็ตาม การติดตามด้วยพื้นฐานของเครื่องหมาย ยังมีจุดด้อยที่เป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถติดตามได้ คือ ปัจจัยของเครื่องหมาย การติดตาม การวิเคราะห์ภาพ การคำนวณมุมจตุรรอบเครื่องหมาย การปิดกั้น และการทำงานในการติดตามภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของแสงสว่าง จึงมีงานวิจัยที่ได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว มีดังนี้

งานวิจัยของ (Kato, 2000) ได้ทำการศึกษาความแม่นยำในการติดตามเกี่ยวกับปัจจัย ด้านขนาดและมุมของเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARToolkit โดยอาศัยการติดตามด้วยอุปกรณ์ HMD ผลการทดลองพบว่า ระยะทางที่ได้แปรผันตามขนาดของเครื่องหมาย และความลาดเอียงที่สามารถติดตามได้ ตั้งแต่มุม 0 ถึง 85 องศา ในขณะที่ระยะทางและมุมที่เกิดความผิดพลาดมากที่สุดในการติดตาม คือ มุมความลาดเอียง 60 องศา ที่ระยะทาง 50 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 2.18



ภาพประกอบ 2.18 การทดลองการติดตามเครื่องหมายเออาร์ ARToolkit (Kato, 2000)

งานวิจัยของ (Thomas, 2003) ได้ทำการศึกษาและพัฒนาวิธีการปรับปรุงการติดตาม โดยใช้วิธีการปรับเลือกค่าขีดแบ่ง (Adaptive Threshold Selection) เพื่อแก้ไขปัญหาในการติดตามจากผลกระทบจากแสงสะท้อน (Reflection) บนพื้นผิวของเครื่องหมายเออาร์ ดังภาพประกอบ 2.19 โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตามกับวิธีการมาตรฐานของไลบรารี ARToolkit ผลการทดลองพบว่า วิธีการปรับปรุงข้างต้นส่งผลให้การติดตามดีขึ้น ถึงแม้ว่าจะเกิดแสงสะท้อนบนพื้นผิวเครื่องหมายเออาร์ก็ตาม

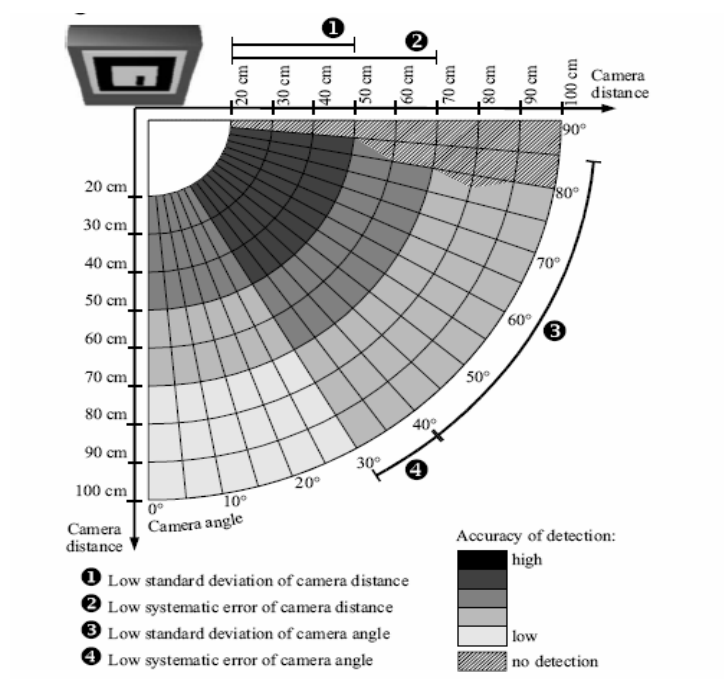


ภาพประกอบ 2.19 การพัฒนาวิธีการปรับปรุงการติดตาม โดยใช้วิธีการปรับเลือกค่าขีดแบ่ง (Thomas, 2003)

งานวิจัยของ (Qingming Huang et al., 2004) ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ของการประมวลผลภาพดิจิทัล คือ การทำค่าขีดแบ่ง ด้วยวิธีการปรับเลือกขนาดหน้าต่าง (Adaptive Window Size Selection) ซึ่งจุดเด่นของวิธีการนี้ คือ เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการทำงานในสภาวะแสงสว่างไม่คงที่ หรือมีการรบกวนหรือบดบังจากวัตถุ จึงทำให้เกิดแสงสว่างไม่สม่ำเสมอ โดยวิธีการนี้อาศัยวิธีการเลือกหน้าต่างเป็นขอบเขตที่ต้องการทำค่าขีดแบ่งบนโครงสร้างข้อมูลแบบปริมาตรของ Lorentz โดยในการศึกษาทำการทดลองเปรียบเทียบกับวิธีการของ Otsu ผลการทดลองพบว่า วิธีการที่ได้นำเสนอสามารถทำงานได้ดีกว่าวิธีการของ Otsu ในสภาวะแสงสว่างไม่คงที่ หรือมีการรบกวนหรือบดบังจากวัตถุ ในขณะที่วิธีการของ Otsu ไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะดังกล่าว

งานวิจัยของ (Daniel F. Abawi et al., 2004) ได้ทำการวิจัยผลของความแม่นยำในการติดตามพื้นฐานโดยอาศัยเครื่องหมายเออาร์ ในการทดลองได้พัฒนาอัลกอริทึมโดยใช้ฟังก์ชันในการคำนวณการแปลงภาพ 2 มิติให้เป็น 3 มิติ และการวิเคราะห์ภาพของไลบรารี ARToolkit โดยนำเครื่องหมายเออาร์มาทดลองความผิดพลาดในการติดตาม ซึ่งใช้การปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกล้องและเครื่องหมายเออาร์ ตั้งแต่ 20-100 เซนติเมตร และทดลองด้วยการหมุนเครื่องหมายเออาร์รอบๆ แกน Y ตั้งแต่ 0-85 องศา ในขณะที่กำหนดมุมรอบแกน X และแกน Z คงที่หรือมีค่า เท่ากับ 0 องศา ผลการทดลองพบว่า ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการคำนวณระยะทางของไลบรารี ARToolkit ตั้งแต่ 20-70 เซนติเมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) น้อยสุด ตั้งแต่ 20-50 เซนติเมตร สำหรับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการคำนวณมุมของไลบรารี ARToolkit ตั้งแต่ 30-40 องศา และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยสุด คือ ตั้งแต่ 40-85 องศา นอกจากนี้ยังพบว่า ได้ช่วงระยะที่เป็นช่วง

วิกฤตในการเกิดความผิดพลาดในการติดตาม และการคำนวณ ซึ่งสามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองไปใช้ได้ เพื่อลดความผิดพลาดและทำให้การติดตามมีความแม่นยำขึ้น ดังภาพประกอบ 2.20



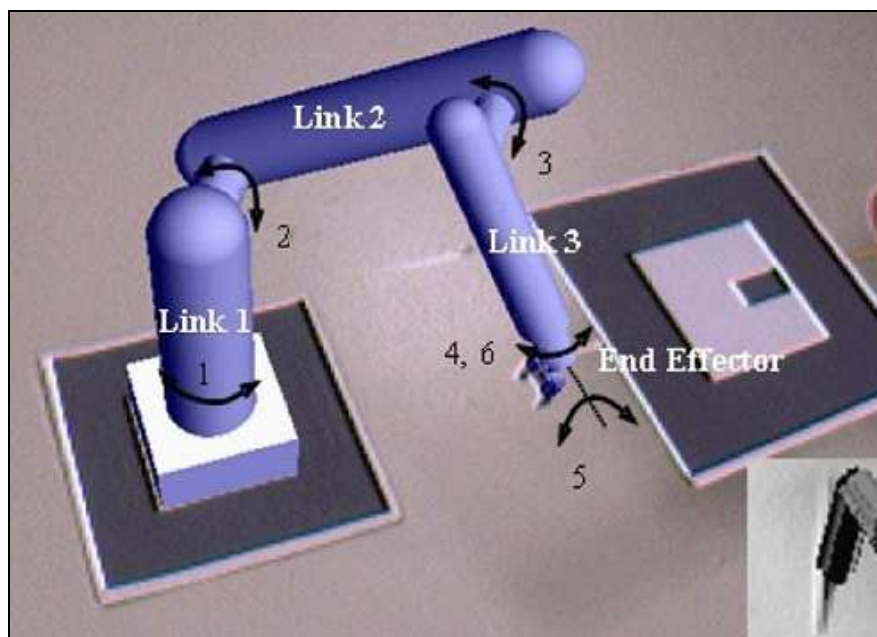
ภาพประกอบ 2.20 การวิจัยผลของความแม่นยำในการติดตามพื้นฐานโดยอาศัยเครื่องหมายเออาร์ (Daniel F. Abawi et al., 2004)

งานวิจัยของ (Martin, 2008) ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเทคนิควิธีการในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARTag ชนิดหลายเครื่องหมาย (Multi Marker) ดังภาพประกอบ 2.21 โดยอาศัยการประมวลผลภาพด้วยเทคนิค Edge detection เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตาม ผลการทดลองพบว่า อัลกอริทึมของ Martin มีประสิทธิภาพดีกว่าไลบรารีของ ARToolkitPlus



ภาพประกอบ 2.21 การพัฒนาเทคนิควิธีการในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARTag (Martin, 2008)

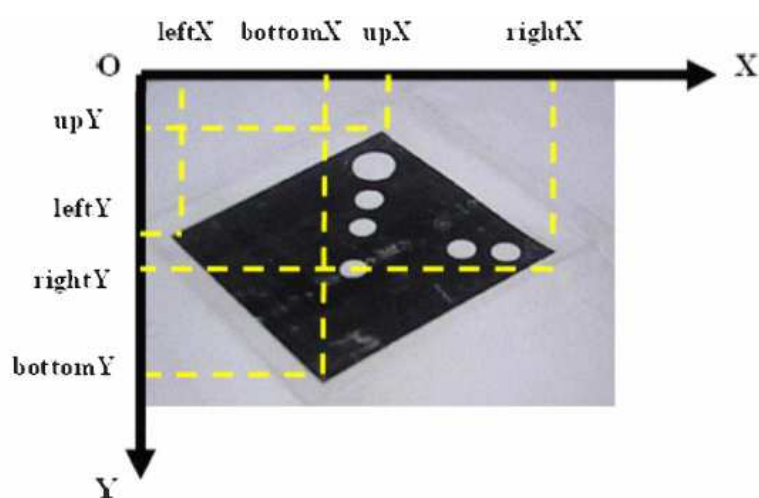
งานวิจัยของ (J.W.S. Chong et al., 2009) ได้ทำการประยุกต์และจำลองการทำงานของหุ่นยนต์และแขนกล โดยการเขียนโปรแกรมควบคุมแขนกลในการตรวจสอบการชนโดยอิสระ การเคลื่อนที่และเปลี่ยนมุมได้หลายองศา ซึ่งใช้อัลกอริทึม Heuristic Beam Search ในการกำหนดเส้นทางของแขนกลด้วยการอาศัยเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARToolkit ผลการทดลองพบว่าการประยุกต์โดยใช้ไลบรารีดังกล่าว มีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ ดังภาพประกอบ 2.22



ภาพประกอบ 2.22 การจำลองการทำงานของหุ่นยนต์และแขนกล (J.W.S. Chong et al., 2009)

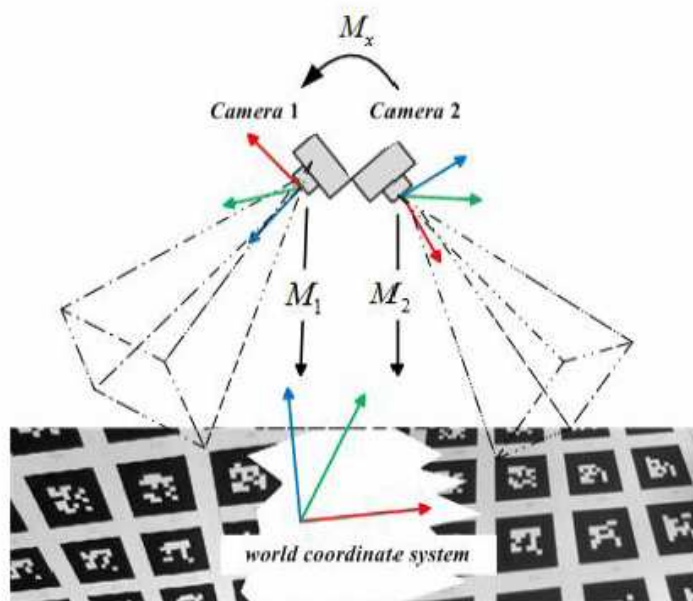
งานวิจัยของ (Hongfei Wu et al., 2010) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวข้องกับกระบวนการวิเคราะห์ภาพ โดยในการทดลองได้สร้างเครื่องหมายเออาร์ใหม่ขึ้นมา และทำการกำหนดระเบียบวิธีการใหม่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ภาพเครื่องหมาย โดยพัฒนาอัลกอริทึมในการวิเคราะห์และระบุคุณลักษณะของเครื่องหมายเออาร์ ซึ่งนำมาทดลองวิเคราะห์ภาพเปรียบเทียบกับไลบรารี ARToolkit จำนวน 1,000 5,000 และ 10,000 ครั้ง รวมทั้งยังทดลองภายใต้เงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงของแสงสว่าง

ผลการทดลองพบว่า เครื่องหมายและอัลกอริทึมดังกล่าวสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทำงานในการติดตามได้รวดเร็วเพิ่มขึ้นมากกว่าไลบรารี ARToolkit แม้ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของแสงสว่างก็ตาม ในขณะที่ไลบรารี ARToolkit พบว่าเกิดความผิดพลาดขึ้นในระหว่างการทำงาน ภายใต้เงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงของแสงสว่าง ดังภาพประกอบ 2.23



ภาพประกอบ 2.23 การพัฒนาอัลกอริทึมในการวิเคราะห์และระบุคุณลักษณะของเครื่องหมายเออาร์ (Hongfei Wu et al., 2010)

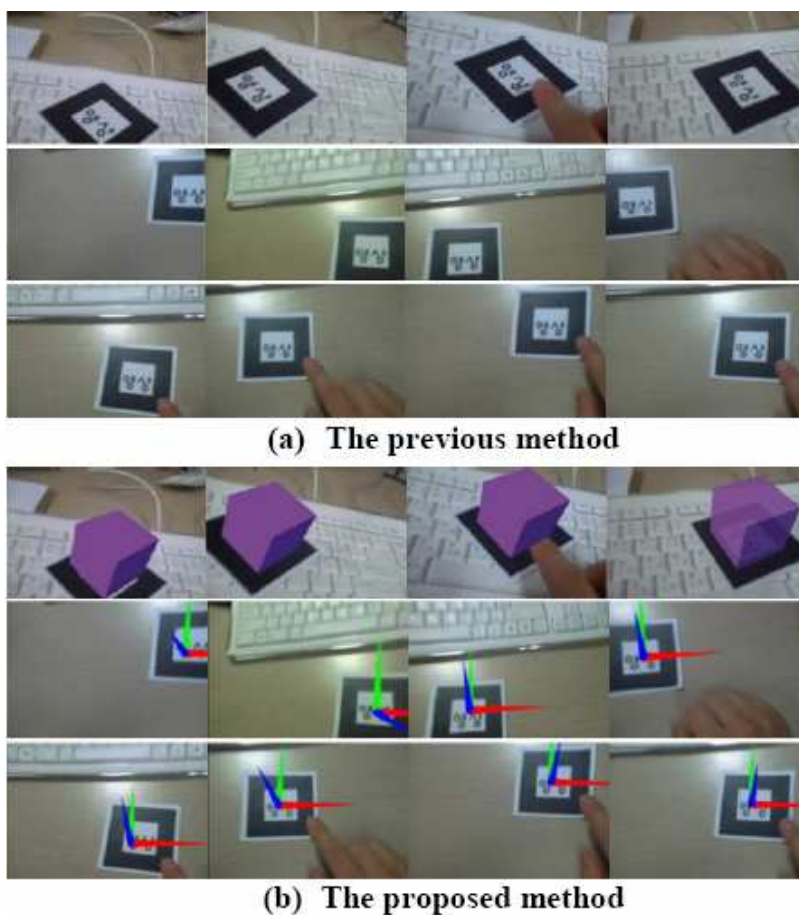
งานวิจัยของ (Jia Jun et al., 2010) ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเทคนิควิธีการในการติดตามเครื่องหมายเออาร์เพิ่มเติมของไลบรารี ARToolkitPlus เพื่อทำการแก้ปัญหาการติดตามเครื่องหมายในกรณีที่มีความต้องการใช้งานในสถานที่หรือบริเวณที่มีขนาดเนื้อที่กว้างขวาง เช่น โรงซ่อมบำรุง เครื่องยนต์ของเครื่องบิน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ด้วยการใช้กล้อง 2 ตัวในการติดตาม โดยกล้องตัวที่ 1 ซึ่งติดตั้งบนศีรษะ ซึ่งทำหน้าที่ติดตามเครื่องหมายเออาร์ จำนวน 48 ตัว ที่ติดตั้งไว้บริเวณเพดาน ส่วนกล้องอีกตัวทำหน้าที่ในการติดตามสภาพแวดล้อมในการทำงาน โดยนำตำแหน่งที่ได้จากกล้องทั้ง 2 ตัว มาคำนวณตำแหน่งที่ใช้ในการอ้างอิงร่วมกัน ผลการทดลองพบว่า เทคนิควิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ และช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าระบบการติดตามอื่นๆ ที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ดังภาพประกอบ 2.24



ภาพประกอบ 2.24 การนำเสนอเทคนิคใหม่ด้วยการใช้กล้อง 2 ตัวในการติดตาม (Jia Jun et al., 2010)

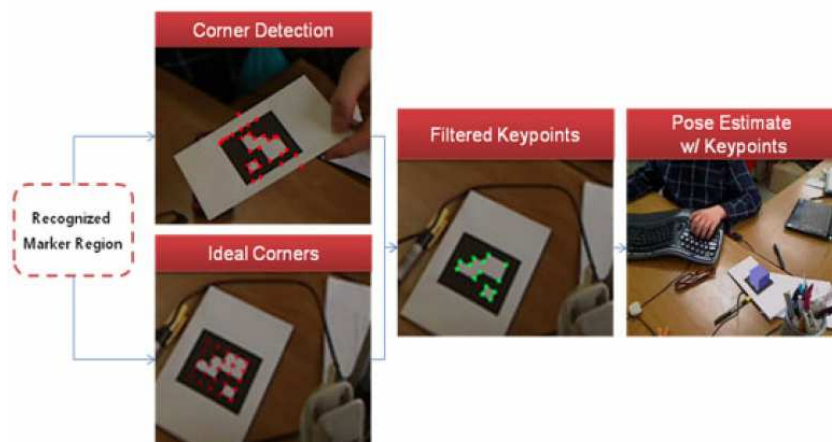
งานวิจัยของ (Ahyun Lee et al., 2010) ได้นำเสนอวิธีการใหม่ของการติดตามระหว่างกล้องและเครื่องหมายเออาร์ ภายใต้เงื่อนไขสถานการณ์ที่เครื่องหมายทั้งหมดไม่อยู่ในระหว่างการติดตาม มุมมองของกล้องหรือถูกปิดกั้นด้วยวัตถุ โดยในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการทดลองและนำไปเปรียบเทียบการติดตามกับไลบรารี ARToolkit ผลการทดลองพบว่า อัลกอริทึมดังกล่าวง่ายและรวดเร็วกว่าไลบรารี ARToolkit ในการใช้งานภายใต้เงื่อนไขสถานการณ์ที่เครื่องหมายทั้งหมดไม่อยู่ในระหว่างการติดตามมุมมองของกล้องหรือถูกปิดกั้นด้วยวัตถุ รวมทั้งยังสามารถนำไปใช้งานได้หลายแพลตฟอร์มนอกเหนือจากคอมพิวเตอร์พีซี เช่น อุปกรณ์มือถือ และสมาร์ทโฟน เป็นต้น

ดังภาพประกอบ 2.25



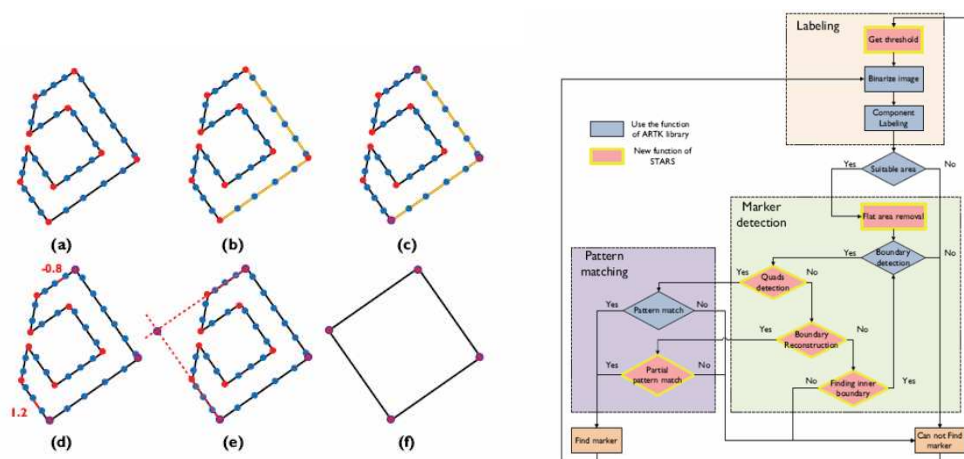
ภาพประกอบ 2.25 การนำเสนอวิธีการใหม่ของการติดตามระหว่างกล้องและเครื่องหมายเออาร์ ภายใต้เงื่อนไขสถานการณ์ถูกปิดกั้นด้วยวัตถุ (Ahyun Lee et al., 2010)

งานวิจัยของ (Jonghoon Seo et al., 2011) ได้นำเสนอวิธีการใหม่สำหรับแก้ปัญหาการกำหนดจุดมุมรอบเครื่องหมายและการปิดกั้น ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่อีกปัญหาของการติดตามพื้นฐานโดยอาศัยเครื่องหมายเออาร์ การทดลองอาศัยการปรับการคำนวณด้วยการใช้วิธีการ Multiple Keypoints โดยใช้ไลบรารี ARToolkit และ ARToolkitPlus เพื่อใช้ในการคำนวณและลดการสร้างตำแหน่งของจุดรอบเครื่องหมายใหม่ ซึ่งใช้การวัดค่าความผิดพลาดที่ 100 เฟรม ผลการทดลองพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถแก้ปัญหาได้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังพบปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากบางเงื่อนไขพิเศษในการคำนวณและลดการสร้างตำแหน่งของจุดรอบเครื่องหมายใหม่ ดังภาพประกอบ 2.26



ภาพประกอบ 2.26 การนำเสนอวิธีการใหม่สำหรับแก้ปัญหาการกำหนดจุดมุมรอบเครื่องหมายและ การปิดกั้น (Jonghoon Seo et al., 2011)

งานวิจัยของ (Bortong Chen et al., 2011) ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเทคนิควิธีการในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARToolkit โดยเรียกชื่อเทคนิคนี้ว่า START ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ โดยอาศัยการประมวลผลภาพด้วยเทคนิค Marker Detection, Boundary Detection และ The Pattern Matching เพื่อทำการปรับปรุงความแม่นยำและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตามกับไลบรารี ARToolkit และไลบรารี ARTag ภายใต้เงื่อนไขความสว่างที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า อัลกอริทึมของ Bortong Chen มีประสิทธิภาพดีกว่าไลบรารีของ ARToolkit ดังภาพประกอบ 2.27



ภาพประกอบ 2.27 การพัฒนาเทคนิควิธีการในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARToolkit (Bortong Chen et al., 2011)

งานวิจัยในข้างต้นพบว่า ปัญหาส่วนใหญ่ของการติดตามด้วยเครื่องหมายเออาร์ เกิดขึ้นจากสาเหตุจากการติดตาม การวิเคราะห์ภาพ การคำนวณมุมจตุรรอบเครื่องหมาย การปิดกั้น และการทำงานในการติดตามภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของแสงสว่าง ซึ่งในงานวิจัยข้างต้นทำการทดลองเปรียบเทียบกับไลบรารี ARToolkit ARToolkitPlus และARTag อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของความส่องสว่างก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญในการติดตาม เนื่องจากการทำค่าขีดแบ่งจะพิจารณาจากค่ากราฟแสดงค่าความถี่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำค่าขีดแบ่งที่ใช้ในการติดตามของไลบรารี ARToolkit ซึ่งใช้ค่าขีดแบ่งยังเป็นค่าคงที่ โดยใช้ได้เฉพาะในสภาวะที่มีความส่องสว่างคงที่เท่านั้น แต่ในกรณีความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลให้ค่ากราฟแสดงค่าความถี่เปลี่ยนแปลงไปด้วย จึงทำให้ค่าขีดแบ่งของไลบรารีนี้ไม่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ นอกจากนี้ในประเด็นความส่องสว่างที่มีปริมาณความส่องสว่างต่ำ และระยะทางที่มีการเปลี่ยนแปลง พบว่ายังไม่มีผู้ที่ทำการศึกษาวิจัยในประเด็นนี้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษา และพัฒนาอัลกอริทึมการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันกาลสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ โดยทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่าง และระยะทางที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ ซึ่งผลจากการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันกาลสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ สามารถปรับปรุงค่าขีดแบ่งให้มีความเหมาะสมกับปริมาณความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงได้แบบทันกาล จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการติดตามเครื่องหมายเออาร์และการประมวลผลดีขึ้น รวมทั้งยังมีความต่อเนื่องอีกด้วย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

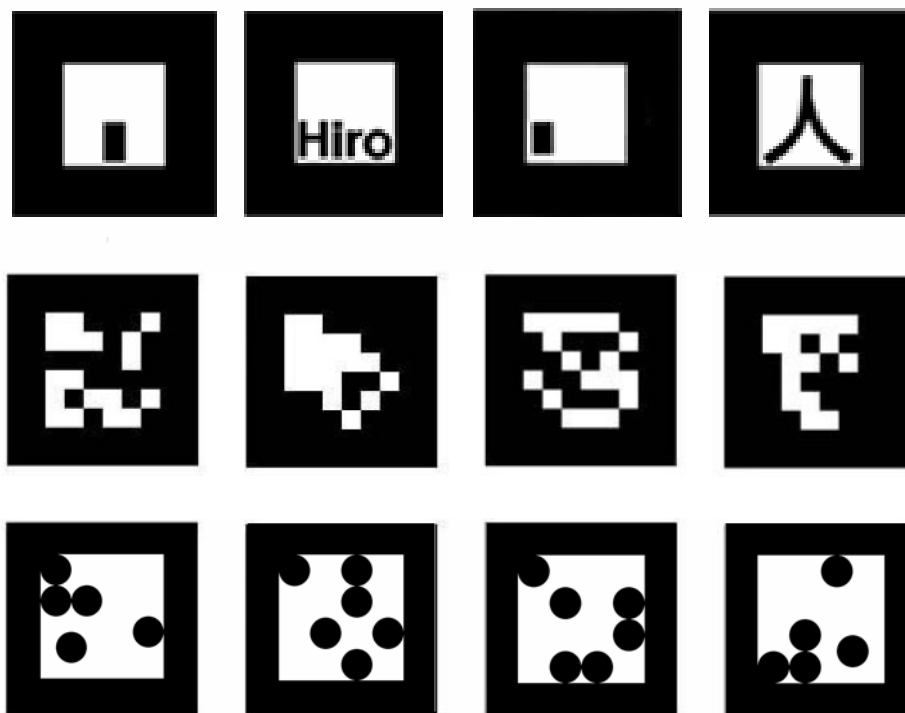
ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อศึกษา และพัฒนาอัลกอริทึมการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันกาล สำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตาม โดยนำเครื่องหมายเออาร์ชนิดเครื่องหมายเดียว จำนวน 12 ตัวอย่างมาทดลองกับโปรแกรมสำหรับทดสอบการติดตามทั้ง 3 วิธี ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลอง 4 ขั้นตอน ดังนี้

- 3.1 การเตรียมการทดลอง
- 3.2 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับทดสอบการติดตาม
- 3.3 การทดลอง และเก็บรวบรวมข้อมูล
- 3.4 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การเตรียมการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์มาตรฐานของไลบรารี ARToolkit (Kato, 2000) ARTag (Mark Fiala, 2006) และไลบรารี ARLib (Daniel Diggins, 2005) ชนิดเครื่องหมายเออาร์เดียว จำนวน 12 ตัวอย่าง ดังภาพประกอบที่ 30 โดยกำหนดตัวอย่างเครื่องหมายเป็น 3 กลุ่มตัวอย่างๆ ละ 4 ตัวอย่างดังนี้

- 3.1.1 กลุ่มตัวอย่างเครื่องหมายมาตรฐานของไลบรารี ARToolkit
- 3.1.2 กลุ่มตัวอย่างเครื่องหมายมาตรฐานของไลบรารี ARTag
- 3.1.3 กลุ่มตัวอย่างเครื่องหมายมาตรฐานของไลบรารี ARLib



ภาพประกอบ 3.1 ตัวอย่างเครื่องหมายมาตรฐานของไลบรารี
 (บน) ARToolkit (Kato, 2000)
 (กลาง) ARTag (Mark Fiala, 2006)
 (ล่าง) ARLib (Daniel Diggins, 2005)

ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ที่ใช้ในการทดลองมีรูปแบบดังนี้

1. รูปแบบไฟล์ BMP ชนิด 24 บิต
2. ความละเอียดเท่ากับ 72 พิกเซลต่อนิ้ว
3. ขนาด 8x8 เซนติเมตร

การเตรียมการอุปกรณ์ทดลองประกอบไปด้วย 2 ส่วนดังนี้

1. ซอฟต์แวร์ (Software)
 - 1.1 ไลบรารี ARToolkit เวอร์ชัน 2.72.1
 - 1.2 ไลบรารี OpenGL เวอร์ชัน 2.0
 - 1.3 ภาษา C++
 - 1.4 ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows XP SP3
2. ฮาร์ดแวร์ (Hardware)
 - 2.1 ไมโครคอมพิวเตอร์
 - 2.1.1 CPU Intel Pentium D 1.86 GHZ
 - 2.1.2 Hard disk 320 GB

2.1.3 DDR2 RAM 1 GB

2.1.4 Intel chipset VGA onboard ขนาดหน่วยความจำ 128 MB

2.2 กล้อง A4-Tech PK-5 USB 2.0 ความละเอียด 3 ล้านพิกเซล

โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของกล้อง ดังนี้

2.2.1 อัตราความเร็วข้อมูลวิดีโอที่ต่ำกว่า 30 เฟรมต่อวินาที

2.2.2 รูปแบบการบีบอัดสีและสัญญาณภาพชนิด RGB24

2.2.3 ขนาดหน้าต่างแสดงผลขนาด 640x480 จุดภาพ

2.3 เครื่องมือวัดปริมาณความส่องสว่าง (Lux Meter) Digicon LX-50

2.4 ชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าส่องสว่างชนิดปรับปริมาณความส่องสว่าง

2.5 ห้องทดลองปิดทึบขนาดเท่ากับ 2 x 2 x 2 เมตร (กว้าง x ยาว x สูง)

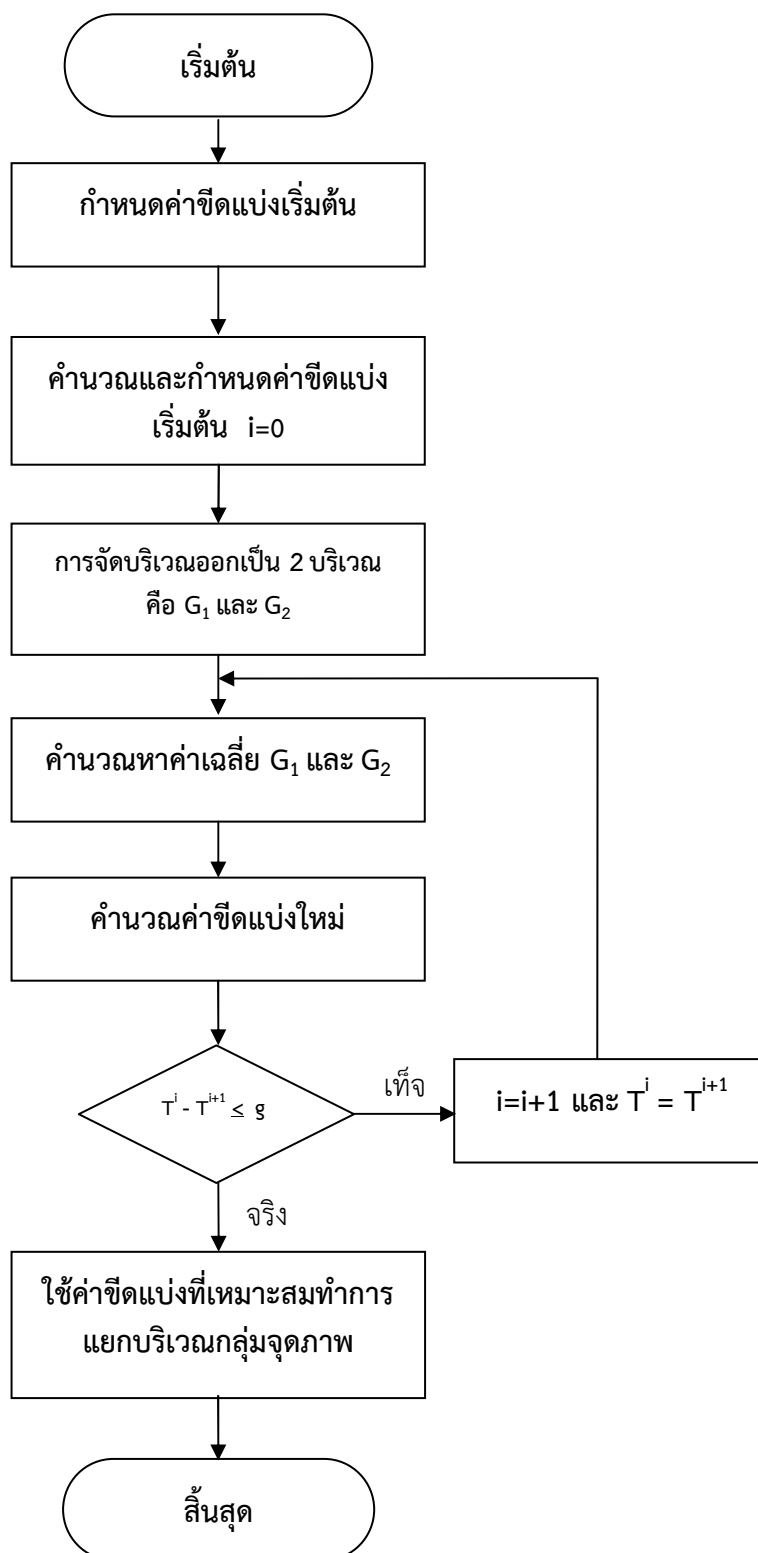
3.2 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับทดสอบการติดตาม

การพัฒนาโปรแกรมสำหรับทดสอบการติดตาม อาศัยการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++ โดยใช้ฟังก์ชันและค่าพารามิเตอร์พื้นฐานอ้างอิงกับไลบรารี ARToolkit ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาอัลกอริทึมในส่วนของกระบวนการติดตามเครื่องหมายเออาร์ (Marker Detection) ซึ่งเป็นขั้นตอนการติดตาม ค้นหา เข้ารหัส และวิเคราะห์เครื่องหมายเออาร์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการติดตาม โดยในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับทดสอบการติดตามด้วยวิธีการทำค่าขีดแบ่ง 3 วิธีการ ดังนี้

1. วิธีการค่าขีดแบ่งคงที่
2. วิธีการค่าขีดแบ่งครอบคลุม
3. วิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ

สำหรับการพัฒนาเลือกใช้วิธีการข้างต้น เนื่องจากสามารถทำงานได้ดีกับภาพชนิดขาวดำที่มีความแตกต่างของวัตถุ และพื้นหลังที่ชัดเจน ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีความเหมาะสมเมื่อนำมาใช้กับเครื่องหมายเออาร์ และเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตาม โดยในการพัฒนาอัลกอริทึมด้วยวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. กำหนดค่าขีดแบ่งเริ่มต้น
2. คำนวณและกำหนดค่าขีดแบ่งเริ่มต้น โดยกำหนดให้ $i=0$
3. แยกบริเวณกลุ่มจุดภาพด้วยการจัดกลุ่มออกเป็น 2 กลุ่ม คือ G_1 และ G_2
4. คำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าสีเทา μ_1 และ μ_2 ของกลุ่มจุดภาพ G_1 และ G_2 ตามลำดับ
5. คำนวณค่าขีดแบ่งใหม่
6. ตรวจสอบเงื่อนไข ถ้า $T^i - T^{i+1} \leq g$ แล้วเป็นเท็จ กำหนดให้ $i=i+1$ และ $T^i = T^{i+1}$ จากนั้นให้ทำงานวนซ้ำไปที่ขั้นตอนที่ 4 จนกระทั่งเงื่อนไขดังกล่าวมีค่าเป็นจริง จึงหยุดการวนซ้ำ
7. ใช้ค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมทำการแยกบริเวณกลุ่มจุดภาพ



ภาพประกอบ 3.2 ผังลำดับขั้นตอนของอัลกอริทึมวิธีการเลือกค่าขีดแบ่งอัตโนมัติ

3.3 การทดลอง และเก็บรวบรวมข้อมูล

การทดลองปรับปรุงการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันทีสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ ด้วยวิธีการทั้ง 3 วิธีการ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตาม ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

3.3.1 ความส่องสว่าง

3.3.2 ระยะทาง

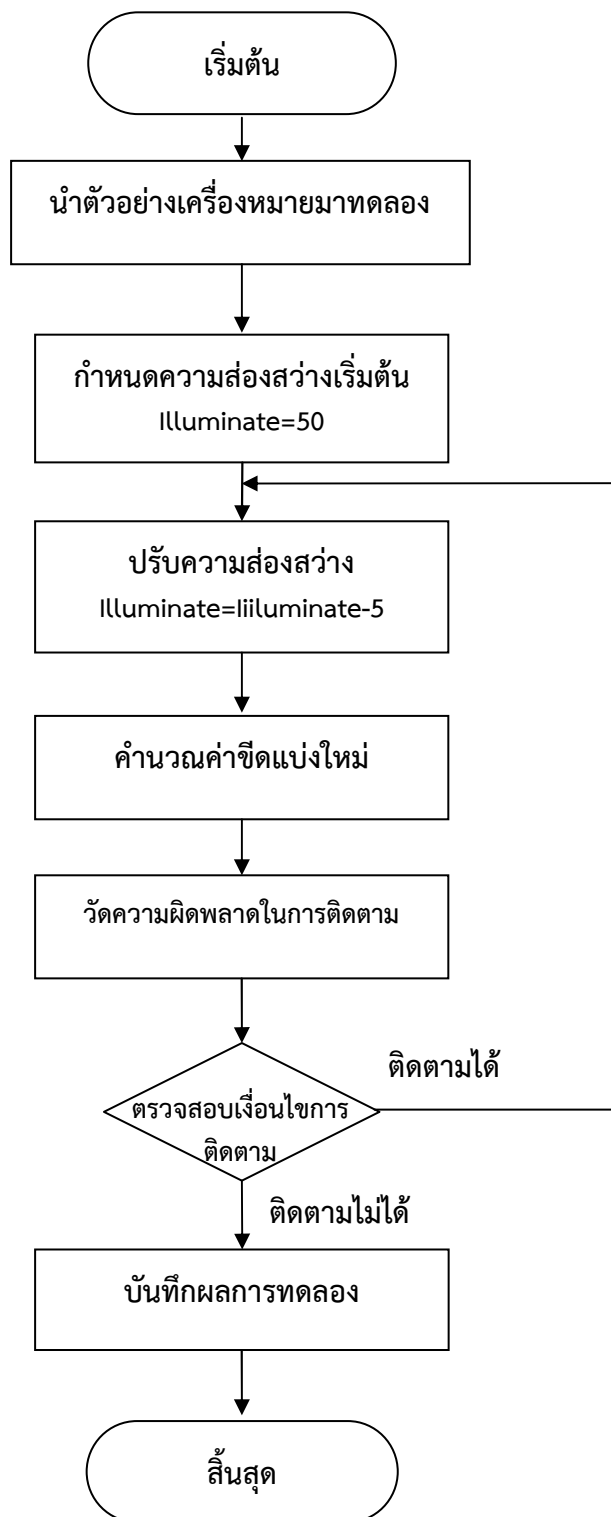
โดยกำหนดเงื่อนไขในการทำการทดลอง ดังนี้

1. ความส่องสว่างภายในอาคารที่ใช้ในการทดลองต่ำกว่า 50 ลักซ์ ตามมาตรฐาน CIE และ IEC ด้วยชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดปรับปริมาณความส่องสว่าง โดยแบ่งการปรับครั้งละ 5 ลักซ์
2. กำหนดช่วงระยะห่างจากกล้องถึงตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ตั้งแต่ 20-50 ซม. ซึ่งระยะดังกล่าวเป็นระยะที่เกิดความผิดพลาดน้อย และสามารถติดตามได้ดีในสภาวะความส่องสว่างปกติ (Kato, 2000)
3. ภาพวัตถุเสมือนจริงที่ใช้ในการทดลอง คือ สี่เหลี่ยมลูกบาศก์มาตรฐานทึบ (Solid Cube) ของไลบรารี OpenGL
4. การทดลองซ้ำ จำนวน 3 ซ้ำ
5. การวัดความผิดพลาดในการติดตามด้วยอัตราความเร็วข้อมูลวิดีโอที่ขณะทำงานเท่ากับ 300 เฟรม

การทดลองปรับปรุงการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติแบบทันทีสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการทั้ง 3 วิธี โดยนำเครื่องหมายเออาร์ชนิดเครื่องหมายเดี่ยว จำนวน 12 ตัวอย่าง มาทดลองกับโปรแกรมสำหรับทดสอบการติดตาม มีขั้นตอน ดังนี้

1. นำตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์มาตรฐาน จำนวน 12 ตัวอย่าง มาทำการทดลองกับโปรแกรมการติดตามเครื่องหมายเออาร์ทีละ 1 ตัวอย่าง
2. กำหนดความส่องสว่างเริ่มต้นเท่ากับ 50 ลักซ์
3. ปรับปริมาณความส่องสว่างลดลงครั้งละ 5 ลักซ์ ด้วยชุดอุปกรณ์อ่านและปรับปริมาณความส่องสว่าง ดังภาพประกอบ 3.4
4. ใช้โปรแกรมทดสอบการติดตามคำนวณค่าขีดแบ่งและอ่านค่าขีดแบ่งที่ได้
5. ตรวจสอบเงื่อนไข ถ้าสามารถติดตามได้ให้ทำการวนซ้ำในขั้นตอนที่ 3 จนกระทั่งถ้าไม่สามารถติดตามได้จึงหยุดการปรับค่าขีดแบ่ง และทำการบันทึกผลที่ได้จากการทดลอง ดังภาพประกอบ 3.5
6. ทำการเปลี่ยนตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ถัดไป โดยทำการทดลองเหมือนในขั้นตอนแรกจนกระทั่งครบทั้ง 12 ตัวอย่าง
7. จากนั้นทำการเปลี่ยนโปรแกรมทดสอบการติดตามจนครบทั้ง 3 วิธี โดยทำการทดลองเหมือนในขั้นตอนแรกจนกระทั่งครบทั้ง 12 ตัวอย่าง

8. นำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าขีดแบ่ง และความส่องสว่างที่มีผลต่อการติดตามเครื่องหมายเออาร์ รวมทั้งนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตาม

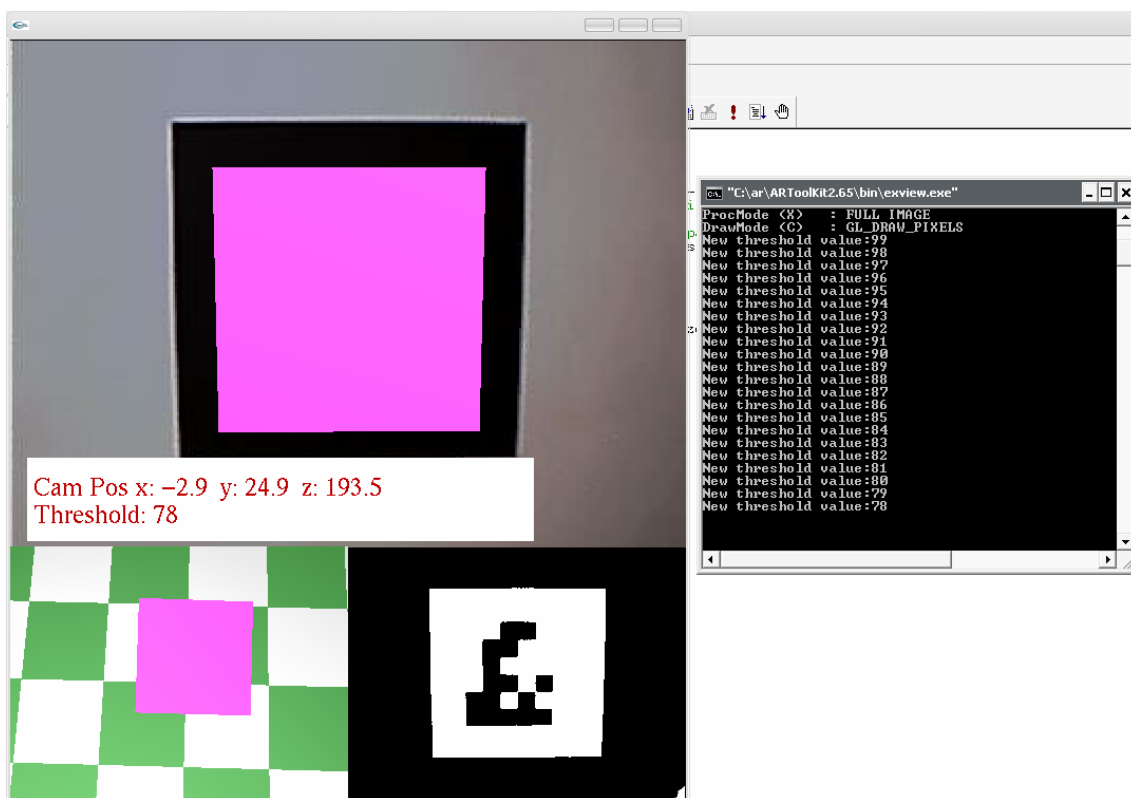


ภาพประกอบ 3.3 ฟังลำดับขั้นตอนการทดลอง

หลังจากที่ได้ทำการบันทึกค่าที่ได้จากการทดลองของแต่ละตัวอย่างแล้ว จึงทำบันทึกการเข้ารหัสในรูปแบบไฟล์เอกสาร PATT สำหรับใช้ในการกำหนดคุณลักษณะของเครื่องหมายเออาร์นั้นๆ เพื่อเป็นการตรวจสอบผลจากการทดลองการติดตาม จากนั้นจึงนำไปทดลองการประมวลผลด้วยเทคโนโลยีเออาร์ โดยใช้ภาพวัตถุเสมือนจริงมาตรฐานที่ใช้ในการทดลองเหมือนกันทุกตัวอย่าง เครื่องหมาย คือ สี่เหลี่ยมลูกบาศก์มาตรฐานทึบ (Solid Cube) ของไลบรารี OpenGL



ภาพประกอบ 3.4 ชุดอุปกรณ์อ่านและปรับปริมาณความส่องสว่าง



ภาพประกอบ 3.5 การทดลองปรับค่าขีดแบ่งด้วยโปรแกรมทดสอบการติดตาม

3.4 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 สถิติพื้นฐาน ดังนี้

3.4.1.1 ค่าเฉลี่ย (Mean)

3.4.1.2 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

3.4.2 สถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมุติฐาน ดังนี้

F-Test (ANOVA)

บทที่ 4

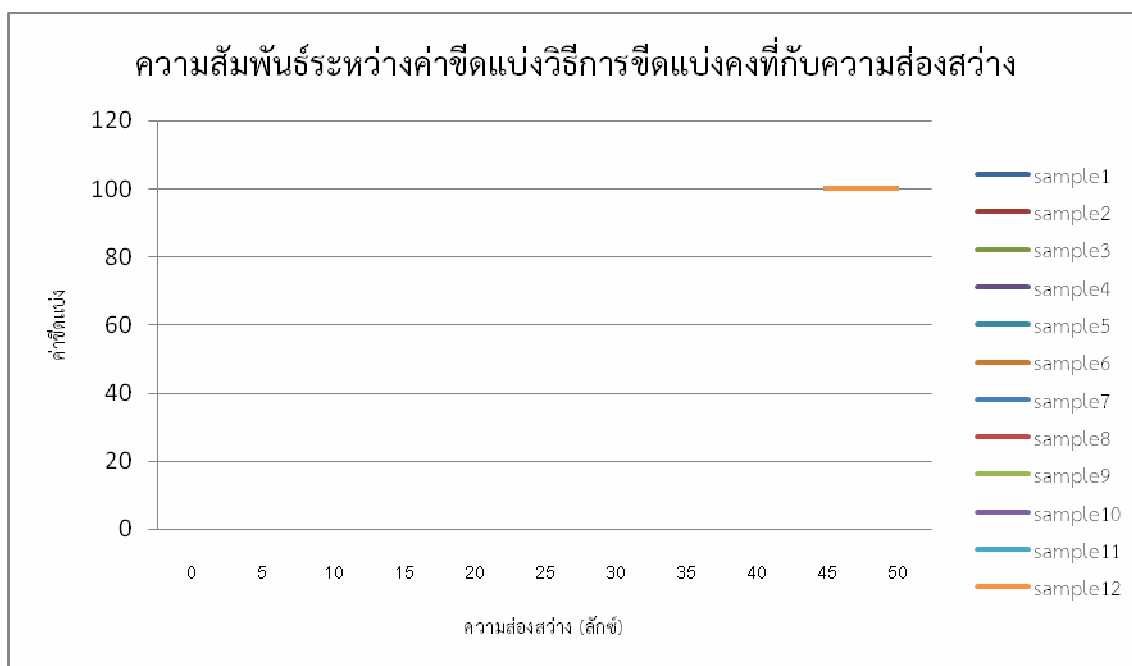
ผลการทดลองและวิจารณ์

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาและปรับปรุงการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันท่วงทีสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตาม โดยนำเครื่องหมายเออาร์ชนิดเครื่องหมายเดียว จำนวน 12 ตัวอย่าง มาทดลองกับโปรแกรมสำหรับทดสอบการปรับปรุงการเลือกระดับขีดแบ่งสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีทั้ง 3 วิธี ภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างและระยะทาง ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

- 4.1 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการค่าขีดแบ่งคงที่
- 4.2 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการค่าขีดแบ่งครอบคลุม
- 4.3 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ
- 4.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

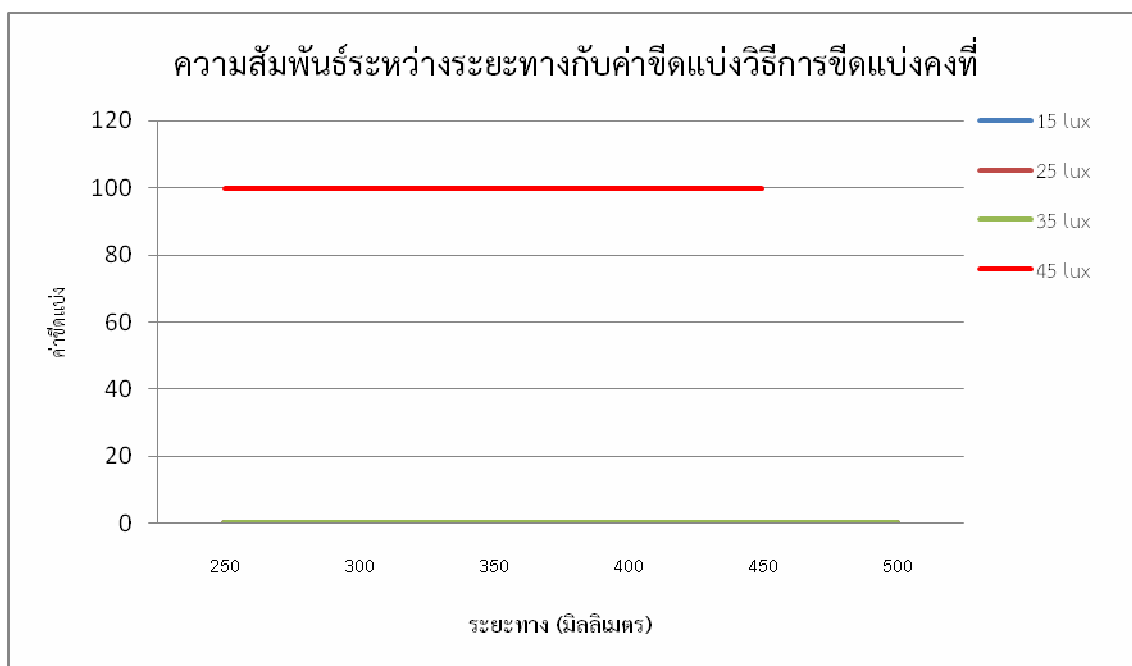
4.1 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการค่าขีดแบ่งคงที่

เนื่องจากการทำค่าขีดแบ่งที่ใช้ในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการค่าขีดแบ่งคงที่จะถูกกำหนดค่าขีดแบ่งเป็นค่าคงที่ เท่ากับ 100 ซึ่งสามารถใช้ได้เฉพาะในสภาวะที่มีความส่องสว่างปกติหรือคงที่เท่านั้น และเมื่อนำวิธีการดังกล่าวมาทำการทดลองการติดตามเครื่องหมายเออาร์ภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างที่ได้กำหนดไว้ ผลจากการทดลองพบว่า ไม่สามารถติดตามได้บางเงื่อนไข หรือหากติดตามได้ ก็ไม่สามารถติดตามได้อย่างต่อเนื่อง หรือเกิดความผิดพลาดขณะทำงาน ในการติดตามด้วยอัตราความเร็วข้อมูลวิดีโอที่ 300 เฟรม โดยมีผลการทดลอง ดังภาพประกอบ 4.1



ภาพประกอบ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการค่าขีดแบ่งคงที่กับความส่องสว่าง

จากภาพประกอบ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการค่าขีดแบ่งคงที่กับความส่องสว่าง โดยนำตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ จำนวน 12 ตัวอย่างมาทดลองการติดตามเครื่องหมายเออาร์กับวิธีการดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างที่ได้กำหนดไว้ ผลจากการทดลองพบว่า เมื่อปรับความส่องสว่าง เท่ากับ 50 ลักซ์ วิธีดังกล่าวสามารถติดตามตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ได้ทุกตัวอย่างเครื่องหมาย แต่เมื่อปรับความส่องสว่างลดลง ตัวอย่างเครื่องหมายบางตัวอย่างเริ่มเกิดความผิดพลาดขณะทำการติดตามด้วยอัตราความเร็วข้อมูลวิดีโอทัศน์ เท่ากับ 300 เฟรม จนกระทั่งเมื่อปรับความส่องสว่างต่ำกว่า 45 ลักซ์ พบว่า วิธีดังกล่าวไม่สามารถติดตามตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ได้ทุกตัวอย่างเครื่องหมาย

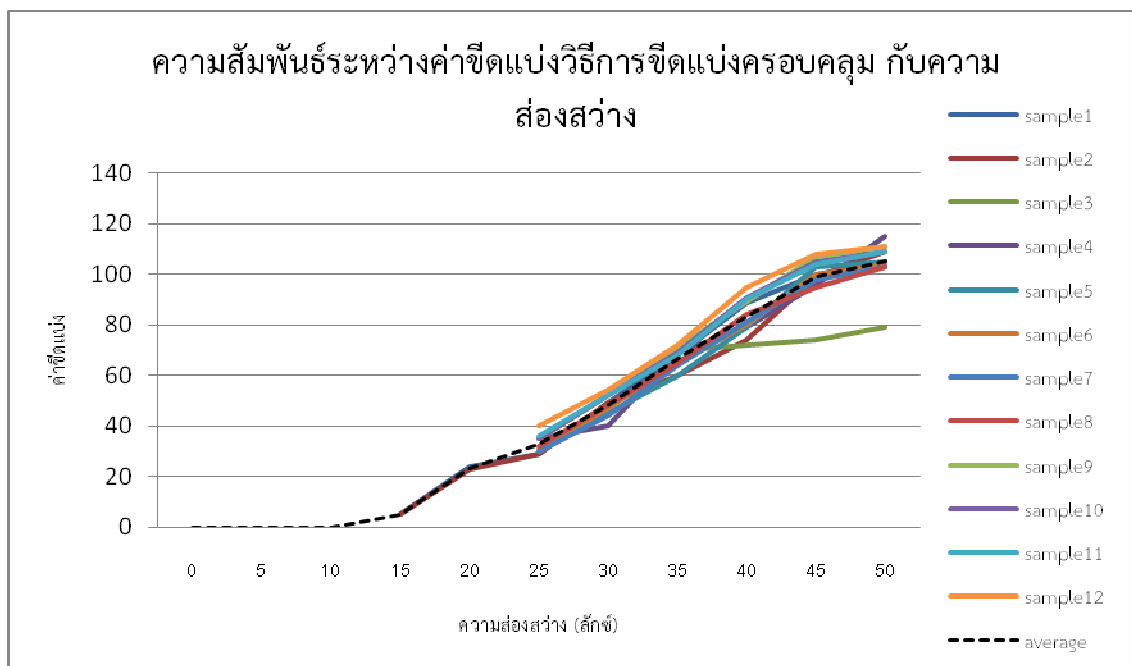


ภาพประกอบ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับค่าขีดแบ่งวิธีการขีดแบ่งคงที่

จากภาพประกอบ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับความส่องสว่าง แสดงให้เห็นว่า เมื่อนำเครื่องหมายเออาร์ชนิดเครื่องหมายเดี่ยว จำนวน 12 ตัวอย่าง มาทดลองกับโปรแกรมสำหรับทดสอบการติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการค่าขีดแบ่งคงที่ ภายใต้เงื่อนไขระยะทาง ผลการทดลองพบว่า เมื่อปรับความส่องสว่าง ตั้งแต่ 45-50 ลักซ์ ค่าขีดแบ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง เนื่องจากค่าขีดแบ่งเป็นค่าคงที่ (ค่าขีดแบ่ง เท่ากับ 100) จนกระทั่งปรับความส่องสว่างต่ำกว่า 45 ลักซ์ จึงไม่สามารถติดตามได้

4.2 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการค่าขีดแบ่งครอบคลุม

การทดลองเพื่อศึกษาและปรับปรุงการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันกาลสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตาม โดยนำเครื่องหมายเออาร์ชนิดเครื่องหมายเดี่ยว จำนวน 12 ตัวอย่าง มาทดลองกับโปรแกรมสำหรับทดสอบการปรับปรุงการเลือกระดับขีดแบ่งสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการขีดแบ่งครอบคลุม ภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่าง และระยะทาง


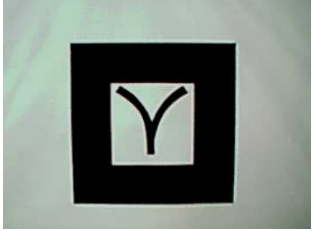
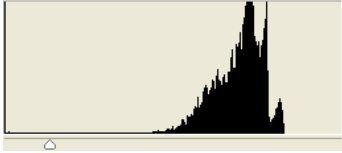

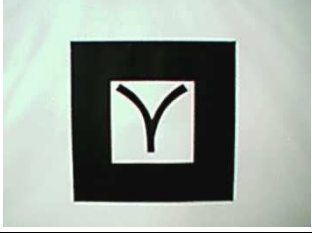
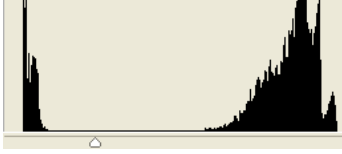

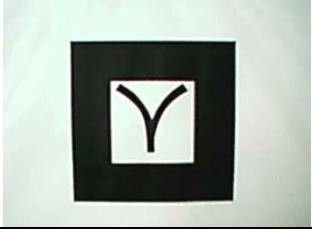
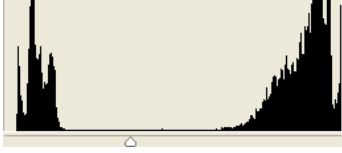



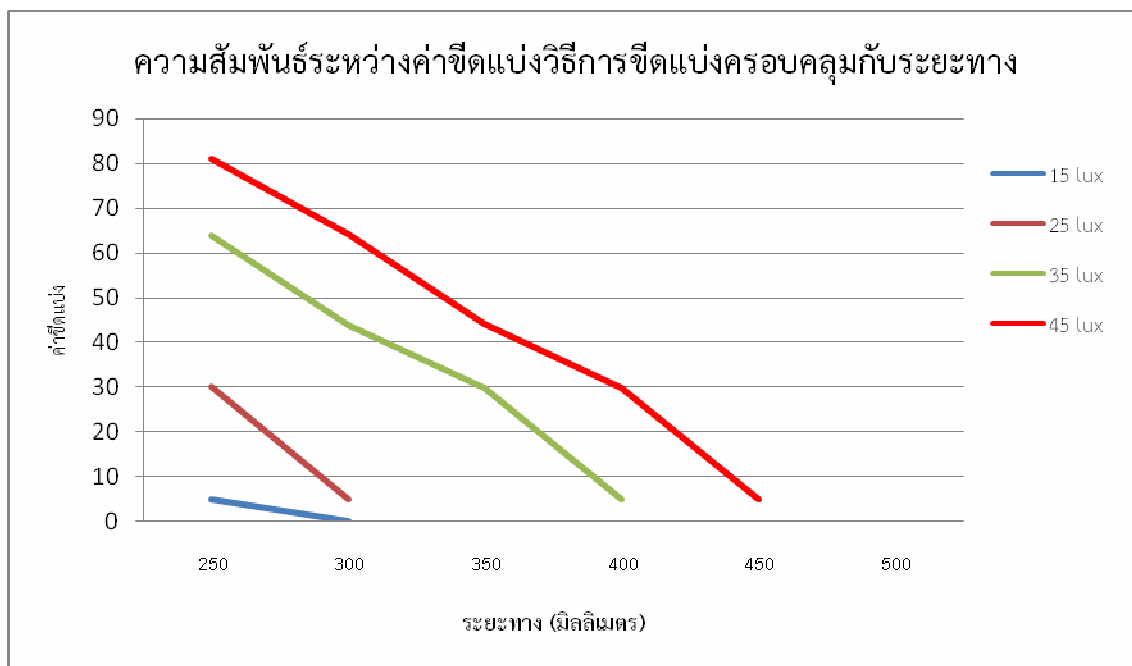
ภาพประกอบ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการขีดแบ่งครอบคลุม กับความส่องสว่าง

จากภาพประกอบ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการขีดแบ่งครอบคลุม กับความส่องสว่าง โดยนำตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ จำนวน 12 ตัวอย่างมาทดลองการติดตาม เครื่องหมายเออาร์กับวิธีการดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างที่ได้กำหนดไว้ ผลจากการทดลอง พบว่า อัตราค่าขีดแบ่งของตัวอย่างเครื่องหมายทั้งหมดแปรผันโดยตรงตามความส่องสว่าง ซึ่งเงื่อนไขความส่องสว่างต่ำสุดที่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้จำนวน 2 ตัวอย่างเครื่องหมาย คือ ตัวอย่างที่ 1 และ 2 เท่ากับ 15 ลักซ์ และค่าขีดแบ่งเฉลี่ยต่ำสุด เท่ากับ 5 และค่าขีดแบ่งเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 105.25 นอกจากนี้ยังพบว่า ช่วงความส่องสว่างเฉลี่ยที่สามารถติดตามตัวอย่างเครื่องหมายส่วนใหญ่ เริ่มตั้งแต่ 25 ลักซ์ขึ้นไป และช่วงความส่องสว่างระหว่าง 20-50 ลักซ์ ตัวอย่างเครื่องหมายมีค่าขีดแบ่งไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ช่วงความส่องสว่างต่ำกว่า 20 ลักซ์ จะมีค่าขีดแบ่งแตกต่างกัน

นอกจากนี้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าฮิสโตแกรม และการขีดแบ่ง โดยนำตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ จำนวน 12 ตัวอย่างมาทดลองการติดตามเครื่องหมายเออาร์กับวิธีการดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง มีผลการทดลองตัวอย่างเครื่องหมายที่ 4 ดังตาราง 4.1 และ ผลการทดลองตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ จำนวน 12 ตัวอย่าง (ตารางในภาคผนวก ค)

ตาราง 4.1 เปรียบเทียบค่าฮิสโตแกรม และค่าขีดแบ่งด้วยวิธีการขีดแบ่งครอบคลุม
ภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 4	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15	ติดตามไม่ได้	ติดตามไม่ได้
	25		
	35		
	45		

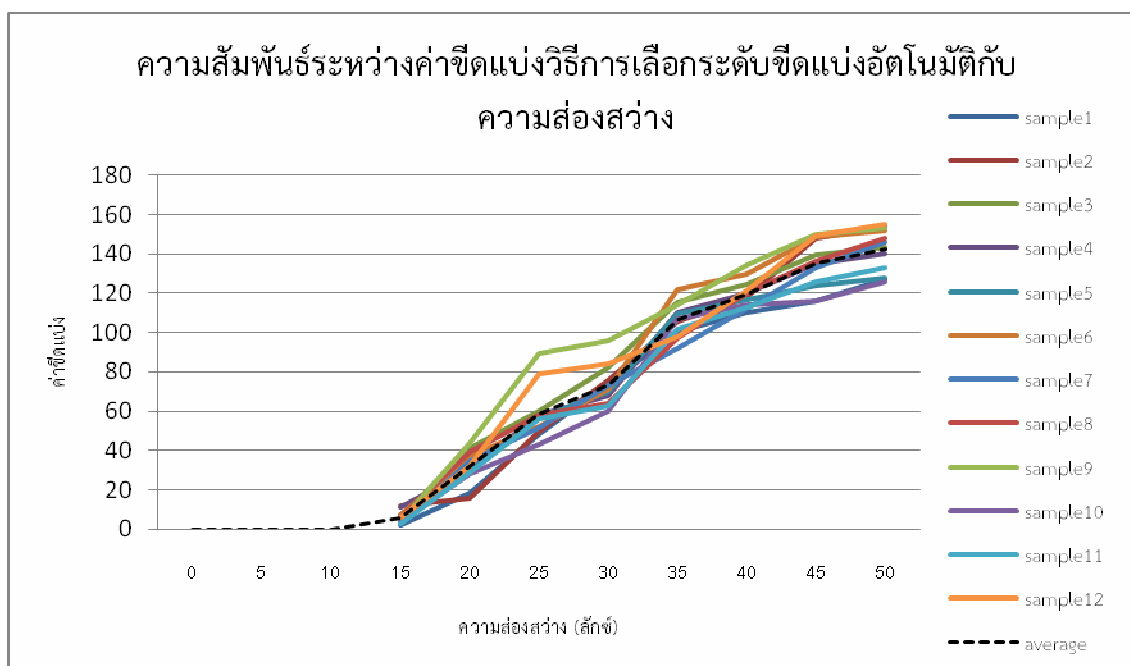


ภาพประกอบ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการขีดแบ่งครอบคลุมกับระยะทาง

จากภาพประกอบ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งกับระยะทาง โดยนำเครื่องหมายเออาร์ชนิดเครื่องหมายเดี่ยว จำนวน 12 ตัวอย่าง มาทดลองกับโปรแกรมสำหรับทดสอบการติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการขีดแบ่งครอบคลุม ภายใต้เงื่อนไขระยะทาง ผลการทดลองพบว่า ระยะทางจะแปรผันโดยตรงกับความส่องสว่างทุกช่วง ในขณะที่ระยะทางของทุกช่วงความส่องสว่างแปรผกผันกับค่าขีดแบ่งของตัวอย่างเครื่องหมายทั้งหมด และช่วงความส่องสว่าง เท่ากับ 15 ลักซ์ มีระยะทางที่สามารถติดตามได้มากที่สุด เท่ากับ 250 มิลลิเมตร ในขณะที่ช่วงความส่องสว่าง เท่ากับ 45 ลักซ์ มีระยะทางที่สามารถติดตามได้มากที่สุด เท่ากับ 450 มิลลิเมตร

4.3 การติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ

การทดลองเพื่อศึกษาและปรับปรุงการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันทีสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตาม โดยนำเครื่องหมายเออาร์ชนิดเครื่องหมายเดี่ยว จำนวน 12 ตัวอย่าง มาทดลองกับโปรแกรมสำหรับทดสอบการปรับปรุงการเลือกระดับขีดแบ่งสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ ภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่าง และระยะทาง


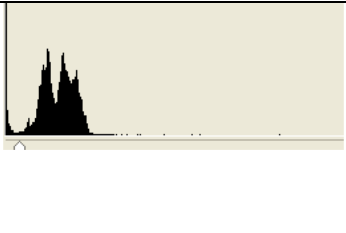

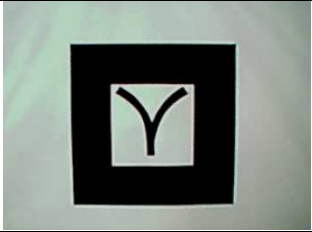
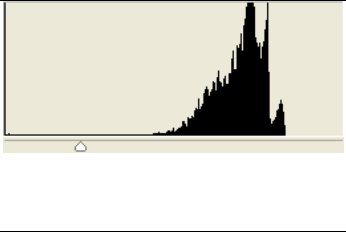


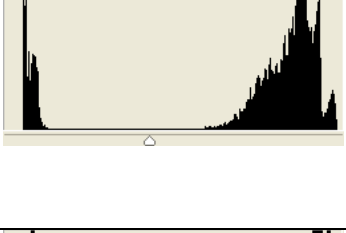

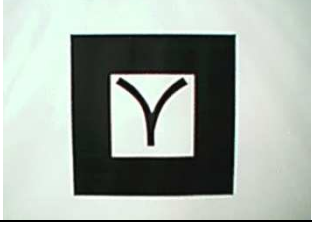
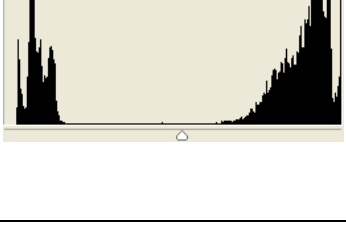



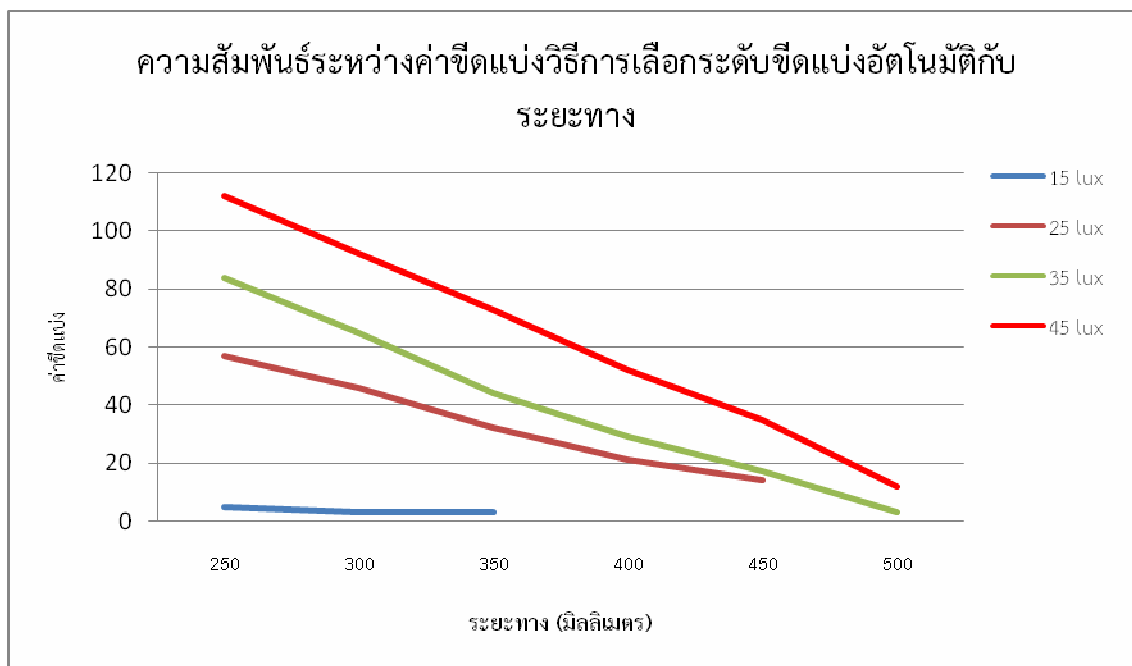
ภาพประกอบ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติกับความส่องสว่าง

จากภาพประกอบ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติกับความส่องสว่าง โดยนำตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ จำนวน 12 ตัวอย่างมาทดลองการติดตามเครื่องหมายเออาร์กับวิธีการดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างที่ได้กำหนดไว้ ผลจากการทดลองพบว่า อัตราค่าขีดแบ่งของตัวอย่างเครื่องหมายทั้งหมดแปรผันโดยตรงตามความส่องสว่าง เช่นเดียวกับกับวิธีการขีดแบ่งครอบคลุม ซึ่งเงื่อนไขความส่องสว่างต่ำสุดที่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ทุกตัวอย่างเครื่องหมาย เท่ากับ 15 ลักซ์ และค่าขีดแบ่งเฉลี่ยต่ำสุด เท่ากับ 5.92 และค่าขีดแบ่งสูงสุดเฉลี่ย เท่ากับ 142.08 นอกจากนี้ยังพบว่า ช่วงความส่องสว่างเฉลี่ยที่สามารถติดตามตัวอย่างเครื่องหมายทั้งหมดเริ่มตั้งแต่ 15 ลักซ์ขึ้นไป

นอกจากนี้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าฮิสโตแกรม และการขีดแบ่ง โดยนำตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ จำนวน 12 ตัวอย่างมาทดลองการติดตามเครื่องหมายเออาร์กับวิธีการดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง มีผลการทดลองตัวอย่างเครื่องหมายที่ 4 ดังตาราง 4.2 และผลการทดลองตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ จำนวน 12 ตัวอย่าง (ตารางในภาคผนวก ค)

ตาราง 4.2 เปรียบเทียบค่าฮิสโตแกรม และค่าขีดแบ่งด้วยวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ
ภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง

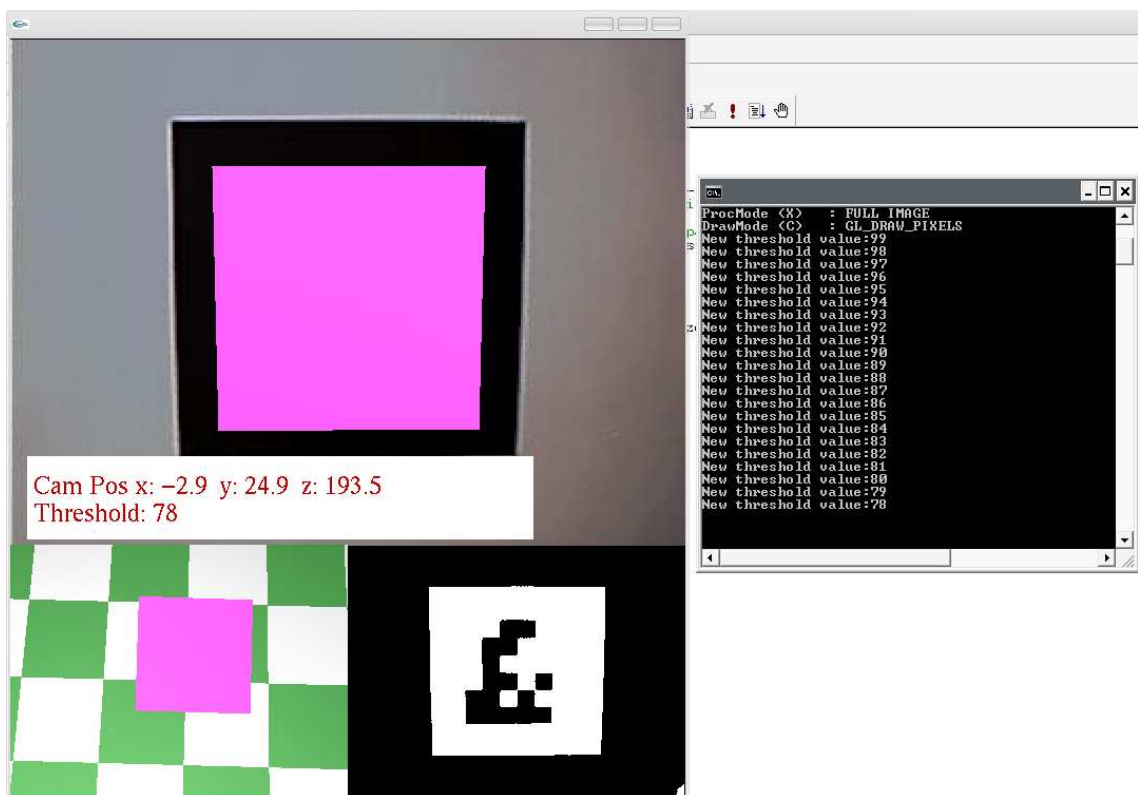
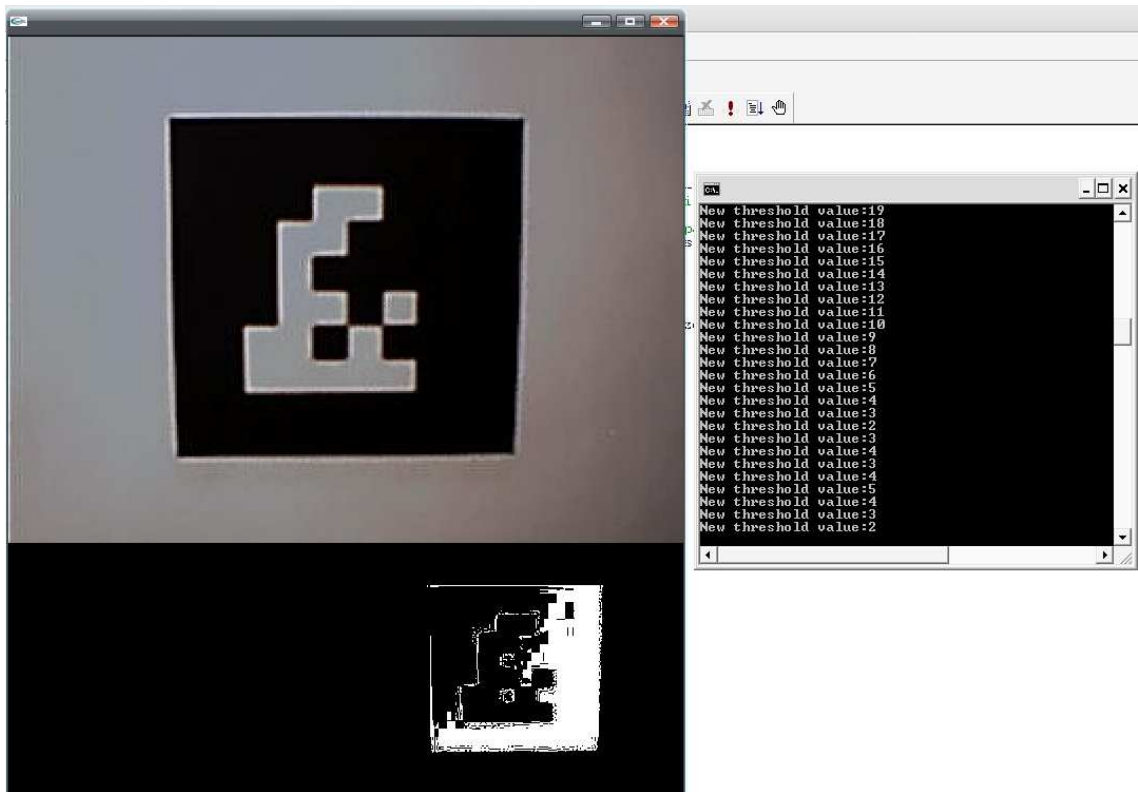
เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 4	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		



ภาพประกอบ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติกับระยะทาง

จากภาพประกอบที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งกับระยะทาง โดยนำเครื่องหมายเออาร์ชนิดเครื่องหมายเดียว จำนวน 12 ตัวอย่าง มาทดลองกับโปรแกรมสำหรับทดสอบการติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วยวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ ภายใต้เงื่อนไขระยะทาง ผลการทดลองพบว่า ระยะทางจะแปรผันโดยตรงกับความส่องสว่างทุกช่วง ในขณะที่ระยะทางของทุกช่วงความส่องสว่างแปรผกผันกับค่าขีดแบ่งของตัวอย่างเครื่องหมายทั้งหมด และช่วงความส่องสว่างเท่ากับ 15 ลักซ์ มีระยะทางที่สามารถติดตามได้มากที่สุด เท่ากับ 350 มิลลิเมตร ในขณะที่ช่วงความส่องสว่างเท่ากับ 35-45 ลักซ์ มีระยะทางที่สามารถติดตามได้มากที่สุด เท่ากับ 500 มิลลิเมตร

นอกจากนี้ เมื่อนำค่าขีดแบ่งที่ได้จากการทดลองมาปรับค่าขีดแบ่ง เพื่อใช้สำหรับทดสอบการติดตาม และการประมวลผลกราฟทั้งหมด 3 วิธีการ ภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้ง 4 ช่วงมีผลการทดลองการประมวลผล ดังภาพประกอบ 4.7



ภาพประกอบ 4.7 การทดลองการติดตามและการประมวลผลเครื่องหมายเออาร์

4.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

งานวิจัยนี้นำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ ดังนี้

4.4.1 สถิติพื้นฐาน ดังนี้

4.4.1.1 ค่าเฉลี่ย (Mean)

4.4.1.2 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

4.4.2 สถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมุติฐาน ดังนี้

F-Test (ANOVA)

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าขีดแบ่ง และความส่องสว่างของวิธีการขีดแบ่งครอบครัว โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) พบว่า ค่าขีดแบ่งมีค่า $p=0.000 < \alpha=0.05$ จึงปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 แสดงว่า ค่าขีดแบ่งโดยใช้ความส่องสว่างทั้ง 4 ช่วงทุกคู่ได้ค่าขีดแบ่งที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังภาพประกอบ 4.8

Descriptive Statistics

	N	Minimum	Maximum	Mean		Std.
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic
ILLUMINA	48	1	4	2.50	.16	1.13
Valid N (listwise)	48					

Report

THRESHOL

ILLUMINA	Mean	N	Std. Deviation
1	.83	12	1.95
2	30.17	12	10.08
3	66.75	12	3.98
4	99.08	12	8.92
Total	49.21	48	38.09

Descriptives

THRESHOL

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1	12	.83	1.95	.56	-.40	2.07	0	5
2	12	30.17	10.08	2.91	23.76	36.57	0	40
3	12	66.75	3.98	1.15	64.22	69.28	60	72
4	12	99.08	8.92	2.57	93.42	104.75	74	108
Total	48	49.21	38.09	5.50	38.15	60.27	0	108

Test of Homogeneity of Variances

THRESHOL

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.586	3	44	.206

ANOVA

THRESHOL

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	65975.417	3	21991.806	438.143	.000
Within Groups	2208.500	44	50.193		
Total	68183.917	47			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: THRESHOL

	(I) ILLUMINA	(J) ILLUMINA	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	1	2	-29.33*	2.89	.000	-37.06	-21.61
		3	-65.92*	2.89	.000	-73.64	-58.19
		4	-98.25*	2.89	.000	-105.97	-90.53
	2	1	29.33*	2.89	.000	21.61	37.06
		3	-36.58*	2.89	.000	-44.31	-28.86
		4	-68.92*	2.89	.000	-76.64	-61.19
	3	1	65.92*	2.89	.000	58.19	73.64
		2	36.58*	2.89	.000	28.86	44.31
		4	-32.33*	2.89	.000	-40.06	-24.61
	4	1	98.25*	2.89	.000	90.53	105.97
		2	68.92*	2.89	.000	61.19	76.64
		3	32.33*	2.89	.000	24.61	40.06
LSD	1	2	-29.33*	2.89	.000	-35.16	-23.50
		3	-65.92*	2.89	.000	-71.75	-60.09
		4	-98.25*	2.89	.000	-104.08	-92.42
	2	1	29.33*	2.89	.000	23.50	35.16
		3	-36.58*	2.89	.000	-42.41	-30.75
		4	-68.92*	2.89	.000	-74.75	-63.09
	3	1	65.92*	2.89	.000	60.09	71.75
		2	36.58*	2.89	.000	30.75	42.41
		4	-32.33*	2.89	.000	-38.16	-26.50
	4	1	98.25*	2.89	.000	92.42	104.08
		2	68.92*	2.89	.000	63.09	74.75
		3	32.33*	2.89	.000	26.50	38.16

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ภาพประกอบ 4.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ วิธีการชั่งแบ่งครอบครัว

สำหรับการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าขีดแบ่งและความส่องสว่างของวิธีการการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมา โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) พบว่า ค่าขีดแบ่งมีค่า $p=0.000 < \alpha=0.05$ จึงปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 แสดงว่า ค่าขีดแบ่งโดยใช้ความส่องสว่างทั้ง 4 ช่วงทุกคู่ได้ค่าขีดแบ่งที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังภาพประกอบ 4.9

Descriptive Statistics

	N	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std.
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic
ILLUMINA	48	1	4	120	2.50	.16	1.13
Valid N (listwise)	48						

Report

THRESHOL

ILLUMINA	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error of Mean	Minimum	Maximum
1	5.92	12	3.09	.89	2	12
2	58.50	12	13.03	3.76	43	89
3	106.08	12	8.67	2.50	92	122
4	135.08	12	12.54	3.62	116	150
Total	76.40	48	50.51	7.29	2	150

Descriptives

THRESHOL

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1	12	5.92	3.09	.89	3.95	7.88	2	12
2	12	58.50	13.03	3.76	50.22	66.78	43	89
3	12	106.08	8.67	2.50	100.57	111.59	92	122
4	12	135.08	12.54	3.62	127.11	143.05	116	150
Total	48	76.40	50.51	7.29	61.73	91.06	2	150

Test of Homogeneity of Variances

THRESHOL

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
3.506	3	44	.023

ANOVA

THRESHOL

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	115357.7	3	38452.576	373.347	.000
Within Groups	4531.750	44	102.994		
Total	119889.5	47			

Multiple Comparisons

Dependent Variable: THRESHOL

	(I) ILLUMINA	(J) ILLUMINA	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Tukey HSD	1	2	-52.58*	4.14	.000	-63.65	-41.52
		3	-100.17*	4.14	.000	-111.23	-89.10
		4	-129.17*	4.14	.000	-140.23	-118.10
	2	1	52.58*	4.14	.000	41.52	63.65
		3	-47.58*	4.14	.000	-58.65	-36.52
		4	-76.58*	4.14	.000	-87.65	-65.52
	3	1	100.17*	4.14	.000	89.10	111.23
		2	47.58*	4.14	.000	36.52	58.65
		4	-29.00*	4.14	.000	-40.06	-17.94
	4	1	129.17*	4.14	.000	118.10	140.23
		2	76.58*	4.14	.000	65.52	87.65
		3	29.00*	4.14	.000	17.94	40.06
LSD	1	2	-52.58*	4.14	.000	-60.93	-44.23
		3	-100.17*	4.14	.000	-108.52	-91.82
		4	-129.17*	4.14	.000	-137.52	-120.82
	2	1	52.58*	4.14	.000	44.23	60.93
		3	-47.58*	4.14	.000	-55.93	-39.23
		4	-76.58*	4.14	.000	-84.93	-68.23
	3	1	100.17*	4.14	.000	91.82	108.52
		2	47.58*	4.14	.000	39.23	55.93
		4	-29.00*	4.14	.000	-37.35	-20.65
	4	1	129.17*	4.14	.000	120.82	137.52
		2	76.58*	4.14	.000	68.23	84.93
		3	29.00*	4.14	.000	20.65	37.35

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ภาพประกอบ 4.9 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ วิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาอัลกอริทึมการเลือกระดับขีดแบ่งแบบทันกาลสำหรับการติดตามเครื่องหมายเออาร์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ โดยนำเครื่องหมายเออาร์ ชนิดเครื่องหมายเดียว จำนวน 12 ตัวอย่างทดลองกับอัลกอริทึม 3 วิธีการ ได้แก่ วิธีการค่าขีดแบ่งคงที่ , วิธีการค่าขีดแบ่งครอบคลุม และ วิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ ภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่าง และระยะทาง โดยการพัฒนาอัลกอริทึมอาศัยการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++ และใช้ฟังก์ชันและค่าพารามิเตอร์พื้นฐานอ้างอิงกับไลบรารี ARToolkit และวัดความผิดพลาดในการติดตามด้วยอัตราความเร็วข้อมูลวิดีโอที่สแกนขณะที่ทำงาน เท่ากับ 300 เฟรม และนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

5.2 สรุปผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่าง

การทดลองการติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วย 3 วิธีการ ภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่าง โดยกำหนดความส่องสว่างเป็นชนิดความส่องสว่างภายในอาคาร และใช้ความส่องสว่างต่ำกว่า 50 ลักซ์ ซึ่งวัดความผิดพลาดในการติดตามด้วยอัตราความเร็วข้อมูลวิดีโอที่สแกนขณะที่ทำงาน เท่ากับ 300 เฟรม พบว่า วิธีการที่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ดีมากที่สุด ได้แก่ วิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ และวิธีการ ขีดแบ่งครอบคลุม ตามลำดับ และมีอัตราค่าขีดแบ่งของตัวอย่างเครื่องหมายทั้งหมดแปรผันโดยตรงตามความส่องสว่าง ขณะที่วิธีการค่าขีดแบ่งคงที่ มีค่าขีดแบ่งคงที่จึงไม่สามารถติดตามได้ภายใต้เงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว รวมทั้งยังพบว่า วิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ มีค่าขีดแบ่งเฉลี่ยต่ำสุด เท่ากับ 5.92 และยังสามารถติดตามตัวอย่างเครื่องหมายได้ทั้งหมด ในขณะที่วิธีการขีดแบ่งครอบคลุมสามารถติดตามได้ที่ความส่องสว่างเฉลี่ยต่ำสุดได้เพียง 2 ตัวอย่างเครื่องหมายเท่านั้น

5.3 สรุปผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขระยะทาง

การทดลองการติดตามเครื่องหมายเออาร์ด้วย 3 วิธีการ ภายใต้เงื่อนไขระยะทาง โดยกำหนดระยะทางที่ใช้ในการทดลองระหว่าง 200-500 มิลลิเมตร ซึ่งวัดความผิดพลาดในการติดตามด้วยอัตราความเร็วข้อมูลวิดีโอที่สแกนขณะที่ทำงาน เท่ากับ 300 เฟรม พบว่า วิธีการที่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ดีมากที่สุด ได้แก่ วิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ และวิธีการขีดแบ่งครอบคลุม ตามลำดับ โดยทั้ง 2 วิธีการระยะทางจะแปรผันโดยตรงกับความส่องสว่างทุกช่วง ในขณะที่ระยะทางของทุกช่วงความส่องสว่างแปรผันกับค่าขีดแบ่งของตัวอย่างเครื่องหมายทั้งหมด ซึ่งวิธีการวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ สามารถติดตามได้ทุกช่วงความส่องสว่าง และได้ระยะทางดีกว่า 2 วิธีการ เนื่องจาก

สามารถคำนวณค่าขีดแบ่งได้เหมาะสมกว่า กล่าวคือ ช่วงความส่องสว่าง เท่ากับ 15 ลักซ์พบว่า มีระยะทางที่สามารถติดตามได้มากที่สุด เท่ากับ 350 มิลลิเมตร และช่วงความส่องสว่าง เท่ากับ 35-45 ลักซ์ มีระยะทางที่สามารถติดตามได้มากที่สุด เท่ากับ 500 มิลลิเมตร ขณะที่วิธีการ ทำค่าขีดแบ่งที่มีค่าขีดแบ่งคงที่ จึงไม่สามารถติดตามได้ภายใต้เงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว นอกจากนี้ เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าขีดแบ่งและความส่องสว่างทั้ง 2 วิธีการ โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) พบว่า ค่าขีดแบ่งมีค่า $p=0.000 < \alpha=0.05$ จึงปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 แสดงว่า ค่าขีดแบ่งโดยใช้ความส่องสว่างทั้ง 4 ช่วงทุกคู่ได้ค่าขีดแบ่งที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ดังนั้นวิธีการเลือกระดับขีดแบ่งอัตโนมัติ เป็นวิธีการที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขทั้ง 2 เงื่อนไข โดยสามารถนำมาใช้ในการทำค่าขีดแบ่งเหมาะสมที่สามารถเปลี่ยนแปลงตามความส่องสว่าง และ ระยะทาง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการติดตามและการประมวลผลได้ดี มีความต่อเนื่องขึ้น แม้ว่าความส่องสว่างจะมีการเปลี่ยนแปลงก็ตาม โดยเฉพาะการติดตามเครื่องหมายเออาร์ที่มีความส่องสว่างที่มีค่าต่ำ

5.4 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากวิธีการขีดแบ่ง เป็นวิธีการพื้นฐานในการแบ่งแยกกลุ่มจุดภาพของกระบวนการประมวลผลภาพดิจิทัล และมีความเหมาะสมเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องหมายเออาร์ ชนิดเครื่องหมายเดี่ยว (Single Marker) ทั้งนี้สามารถนำวิธีการอื่นๆ เพื่อแยกกลุ่มจุดภาพของกระบวนการประมวลผลภาพดิจิทัล มาใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพในการติดตามกับเครื่องหมายเออาร์ ชนิดเครื่องหมายเดี่ยว และเครื่องหมายเออาร์ ชนิดหลายเครื่องหมาย (Multi Markers) นอกจากนี้ควรศึกษา และประยุกต์เพื่อพัฒนากับแพลตฟอร์ม และระบบปฏิบัติการอื่นๆ เช่น Mobile device, Linux เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- Abhilash Pandya, Mohammad-Reza Siadat, Greg Auner, Mohammad Kalash, R.Darin Ellis. (2004). "Development and Human Factors Analysis of Neuronavigation vs. Augmented Reality," *Electrical and Computer Engineering Dept, MI USA. : Wayne State University.*
- Ahyun Lee, Jae-Young Lee, Seok-Han Lee, Jong-Soo Choi. (2011). "Markerless augmented reality system based on planar object tracking " *Frontiers of Computer Vision (FCV), 17th Korea-Japan Joint Workshop on Digital Object Identifier: 10.1109/FCV.2011.5739718*, pp. 1-4.
- Borting Chen, Chia-Chi Wu, Yi-Chi Huang and Yu-Lun Huang. (2011). "START: A Select Thresholding Augmented Reality Toolkit," *Proceeding of 2011 8th Asian Control Conference(ASCC), Kaohsiung, Taiwan*, pp. 293-298, May 15-18,
- Chinthammit, R. et al. (2001). "Head Tracking using the Virtual Retinal Display," *Second IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality*. pp. 235-242.
- Chong, J.W.S., Ong, SK., Nee, A.Y.C., & Youcef-Youmi, K. (2009). "Robot Programming using Augmented Reality: An Interactive Method for Planning Collision-free Paths," *Robotic and Computer-integrated Manufacturing*, 25(3), 689-701, june.
- Claudio Kirner, Member IEEE, Ezequiel R. Zorzal and Tereza G. Kirner. (2006). *Case Studies on the Development of Game Using Augmented Reality* [Online]. Available from: <http://www.mendeley.com/research/case-studies-development-games-using-augmented-reality/> [Cited 1March 2006].
- Dam, A. Van., Forsberg, A., Laidlaw, D., Laviola, J. & Simpson, R.. (2000). "Immersive VR for Scientific Visualization: A Progress Report," *IEEE Computer Graphics and Applications*, 20(6), 26-52.
- Daniel Diggins. (2005). "ARLib: A C++ Augmented Reality Software Development Kit," Master Thesis, M.Sc.Computer Animation N.C.C.A Bournemouth University.
- Deniel, F. Abawi and Joachim Bienwald. (2004). "Accuracy in Optical Tracking with Fiducial Markers: An Accuracy Function for ARToolkit," *Proceedings of the Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality(ISMAR 2004)*.
- Donald Hearn, M. Pauline Baker. (2004). "Computer Graphics with OpenGL," *Peason Prentice*. New Jersey: USA.

- Eva Hornecker and Thomas Psik. September. (2005). "Using ARToolKit Markers to Build Tangible Prototypes and Simulate Other Technologies," *Proceeding INTERACT'05 Proceedings of the 2005 IFIP TC13 international conference on Human-Computer Interaction*, Rome: Italy.
- Gonzalez, R. C. et al. (2004). "Digital Image Processing," in *Chapter 10*, 2 nd ed.; S.l.: Prentice Hall.
- Gordan, G., Billinghamurst, M., Bell. M., Woodfill. J., Kowalik. B., Erendi. A. & Tilander, J. (2002). "The Use of Dense Stereo Range Data in Augmented Reality," In *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2002)*, 30 September. - 1 October, 2002, Darmstadt, Germany, IEEE Press, Los Alamitos, CA, pp. 14-23.
- Hirokazu, Kato & Billinghamurst, Mark. (1999). "Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System," *Augmented Reality, 1999. (IWAR '99) Proceedings. 2nd IEEE and ACM International Workshop*, pp. 85-94.
- Hirokazu, Kato, Mark Billinghamurst & Iran Poupyrev. (2000). "Virtual Object Manipulation on a Table-top AR Environment," *Proceedings of the International Symposium on Augmented Reality (ISAR'2000)*, pp. 111-119.
- Hongfei Wu, Fengjing Shao, Rencheng Sun. (2010). "Research of quickly identifying markers on Augmented Reality," *Advanced Management Science (ICAMS), 2010 IEEE International Conference*, pp. 671-675.
- International Commission on Illumination (CIE). (2007). "CIE Colorimetry-Part2: Standard illuminant for Colorimetry," *ISO 11664-2:2007(E)/CIE S 014-2/E:2006*. Vienna, Austria.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2005). "General lighting illumination level. 2005," *IEC 61892-2 International Standard*. Geneva 20, Switzerland.
- Jia Jun, Qi Yue, and Zuo Qing. (2010). "An Extended Marker-base Tracking System for Augmented Reality," In : *2010 Second International Conference on Modeling, Simulation and Visualization Method*. pp. 94-97. China: Beihang University.
- Jonghoon Seo, Jinwook Shim, Ji Hye Choi, James Park and Tack-don Han. (2011). "Enhancing Marker-based AR Technology," *Virtual and Mixed Reality, Part I, HCII (2011)*, 97-104.

- Jozef Novak-Marcincin. (2007). "Application of the Virtual Reality Modeling Language for Design of Automate Workspaces," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 31, 2007, 161-163.
- Krishnamurthy, N. (2002). *Introduction to Computer Graphic*. New York: McGraw-Hill.
- Mark, Fiala. (2006). "ARTag Rev2h," *Institute of Information Technology*.
Canada: NRC.
- Martin Hirzer. (2008). "Marker Detection for Augmented Reality Applications", *Institute For Computer Graphics and Vision*. Brooklyn, New York, USA. : Graz University of Technology, Polytechnic University.
- Mukundan, J. Gu, R. & Billinghamurst, M. (2008). "Development of Computer Vision Algorithms Using J2ME for Mobile Phone Applications," Master Thesis, M.Sc. *Dept. Computer Science and Software Engineering*. New Zealand : University of Canterbury.
- Michael Haller Erwin Stauder and Juergen Zauner. (2005). "AMIRE-ES: Authoring Mixed Reality once, run it anywhere," *Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI 2005)*, 22-27 July, Nevada USA.
- Milgram, P. & Kishino, F. (1994). "A Taxonomy of Mixed Reality Visual Display," *IEICE Transaction on Information Systems*, E77-D(12), pp. 1321-1329.
- Owal, A. (2006). "Light Sense : Enabling Spatially Aware Handheld Interactive Devices," *Proceedings of ISMAR 2006 IEEE and ACM international Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Santa Barbara, CA, 22-25 October, 2006. 119-122.
- Papagiannakis, G., Singh, G. & Thalmann, N.M. (2008). "A Survey of Mobile and Wireless Technology for Augmented Reality Systems: Comp. Anim. Virtual worlds 2008," *Wiley InterScience*, 19, 3-22.
- Qingming Huang, Wen Gao, Wenjian Cai. (2005). "Thresholding technique with adaptive window selection for uneven lighting image," *Pattern Recognition Letters*, 26(6), 801-808, May.
- Rashid, O., Bamford. W., Coulton. P., Edwards, R. & Scheible, J. (2006). "PAC-LAN: Mixed-reality Gaming with RFID Enabled Mobile Phones," *ACM Computers in Entertainment*, 4(4), October.
- Silva, R., Oliveira, C. & Giraldo, A. (2001). *Introduction to Augmented Reality*. S.l.: s.n.
- Semwal, SK & Carroll, D. (2004). *Collage of Patterns*. ICAT, USA. : Dept. Computer Science, University of Colorado.

- Steven, J. Henderson and Steven, Feiner. (2009). "Evaluating the Benefits of Augmented Reality for Task Localization in Maintenance of an Armored Personal Carrier Turret," *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2009 Science and Technology Proceedings*, 19-22 October, 2009. Florida, USA, pp. 135-144.
- Thomas Pintaric. (2003). "An Adaptive Thresholding Algorithm for the Augmented Reality Toolkit," *Proceedings of the 9th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI 2003)*, pp. 71.
- Wagner, D., & Schmalstieg, D. (2008). *ARToolkit Plus for Pose Tracking on Mobile Devices : Computer Vision Winter Workshop 2007*. Austria: s.n.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บทความวิจัยที่ได้รับการพิจารณาให้ตีพิมพ์

กฤตชัย บุญศิวนนท์, วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล และนิวัตร อังควิษฐพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม,

อำเภอกันทรวิชัย, จังหวัดมหาสารคาม 44150, E-mail: wor_nui@yahoo.com

บทคัดย่อ

ไลบรารี ARToolkit เป็นไลบรารีที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันต่างๆ ของเทคโนโลยีเออาร์ (Augmented Reality : AR) ซึ่งอาศัยพื้นฐานการติดตามด้วยเครื่องหมายเออาร์ และใช้เทคนิคการทำค่าขีดแบ่ง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ เซ้ารหัสภาพ และติดตามเครื่องหมายเออาร์ อย่างไรก็ตาม ไลบรารีนี้ใช้ค่าขีดแบ่งชนิดคงที่ จึงสามารถติดตามเครื่องหมายได้ดีเฉพาะในกรณีที่มีความส่องสว่างคงที่เท่านั้น แต่ไม่สามารถติดตามเครื่องหมาย และประมวลผลได้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของความส่องสว่าง เนื่องจากค่าขีดแบ่งไม่เปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของความส่องสว่าง ด้วยสาเหตุข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของค่าขีดแบ่ง และความส่องสว่างที่มีต่อการติดตามเครื่องหมายเออาร์ โดยนำตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์มาตรฐานของไลบรารี ARToolkit ชนิดเครื่องหมายเออาร์เดี่ยว (Single Marker) จำนวน 4 ตัวอย่าง นำมาทดลองปรับการทำค่าขีดแบ่งภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความส่องสว่าง โดยแบ่งความส่องสว่างออกเป็น 3 ช่วง และวัดความผิดพลาดของการติดตามในขณะที่ทำงานด้วยอัตราความเร็วของข้อมูลวิดีโอที่ 300 เฟรม ด้วยโปรแกรมทดสอบการติดตามเครื่องหมายเออาร์ที่เขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++ และการเขียนโปรแกรมอ้างอิงไลบรารี ARToolkit ซึ่งในการทดลองค่าขีดแบ่งใช้วิธีการแบบ Global Thresholding และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งและความส่องสว่าง ผลจากการทดลองพบว่า ค่าขีดแบ่งมีความสัมพันธ์แปรผันโดยตรงกับความส่องสว่าง โดยมีความส่องสว่างต่ำสุดที่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ เท่ากับ 15 ลักซ์ และความส่องสว่างสูงสุด เท่ากับ 300 ลักซ์ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งในช่วงที่ 1 เท่ากับ 169.88 ในช่วงที่ 2 เท่ากับ 140.5 ในช่วงที่ 3 เท่ากับ 51.63 และค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งทั้งหมด 3 ช่วง เท่ากับ 120.67 และการวิเคราะห์ผลทางสถิติในการหาความสัมพันธ์ของค่าขีดแบ่งและความส่องสว่างพบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งโดยใช้ความส่องสว่างทั้ง 3 ช่วง ทุกคู่ ได้ค่าขีดแบ่งที่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นผลที่ได้จากการทดลอง สามารถนำไปปรับค่าขีดแบ่งให้มีความเหมาะสมกับความส่องสว่าง แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงความส่องสว่างก็ตาม ซึ่งส่งผลต่อการติดตามเครื่องหมายเออาร์ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น และทำให้การติดตามมีความต่อเนื่อง รวมทั้งยังทำให้ประมวลผลได้สมบูรณ์อีกด้วย

คำสำคัญ คำขีดแบ่ง, ความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง, การติดตามเครื่องหมายเออาร์, เทคโนโลยีเออาร์

1. บทนำ

เทคโนโลยีเออาร์ (Augmented Reality: AR)[1-3] มีความสามารถในการแสดงกราฟิกจำลองเสมือนจริงที่มีลักษณะ 3 มิติผสานซ้อนทับกับสภาพแวดล้อมจริง โดยการใช้เทคนิคการแสดงผลวิดีโอทัศน์ ในรูปแบบการส่งข้อมูลสัญญาณวิดีโอแบบต่อเนื่อง ชนิดสัญญาณวิดีโอทันกาล (Live-video Streams) และเทคนิคการหาค่าขีดแบ่ง ในการติดตามตำแหน่งของกล้องกับเครื่องหมายเออาร์ เพื่อใช้ในการคำนวณตำแหน่งในการสร้างกราฟิกเสมือนจริง โดยเทคโนโลยีนี้สามารถทำงานได้หลายแพลตฟอร์ม จึงได้มีการนำไปศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

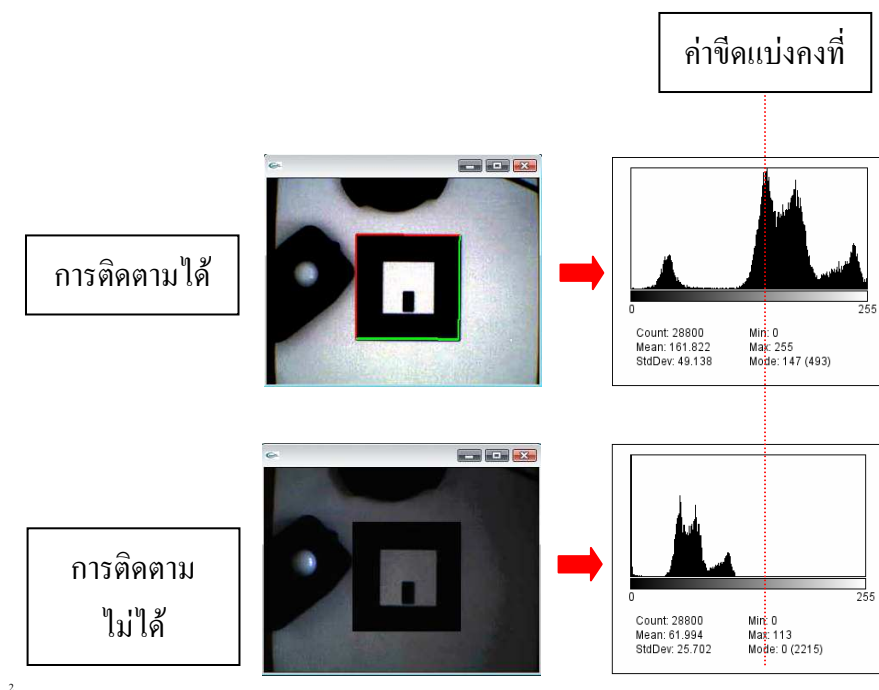
ไลบรารี ARToolkit [4] เป็นไลบรารีที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันต่างๆ ของเทคโนโลยีเออาร์ ใช้พื้นฐานการติดตามด้วยเครื่องหมายเออาร์ (Marker Tracking Base) ซึ่งอาศัยเทคนิควิธีการแสดงวิดีโอทัศน์ (Computer Vision) และกระบวนการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) คือ การหาค่าขีดแบ่ง (Thresholding) เพื่อใช้ในการรู้จำ เข้ารหัสภาพ และการติดตามเครื่องหมายเออาร์ รวมทั้งใช้ในการคำนวณตำแหน่งของกล้องกับเครื่องหมายเออาร์ นอกจากนี้ไลบรารี ARToolKit ยังเป็นกระบวนการที่ทำหน้าที่เข้ารหัสภาพ (Binarizes) ให้เป็นข้อมูลรหัสทวิภาค โดยทำการเข้ารหัสจากภาพสีมาเป็นภาพขาวดำด้วยการใช้เทคนิคขีดแบ่งแบบค่าคงที่ (Fixed Thresholding) ในขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพ จึงทำให้ไลบรารีนี้ทำงานได้รวดเร็วและสามารถติดตามได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ความส่องสว่างไม่คงที่ จะทำให้ผลที่ได้จากการทำงานของไลบรารีนี้ยังไม่น่าเชื่อถือ [5]

การรู้จำเข้ารหัสภาพ และการติดตามเครื่องหมายเออาร์ จึงนับได้ว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญของเทคโนโลยีเออาร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้พื้นฐานการติดตามด้วยเครื่องหมายเออาร์ จึงได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง เช่น การศึกษาความแม่นยำในการติดตามด้วยการใช้อุปกรณ์แสดงผลชนิดสวมใส่ HMD [6] โดยทำการศึกษาในประเด็นขนาด และความลาดเอียงของเครื่องหมายเออาร์ โดยใช้ไลบรารี ARToolkit ผลจากการทดลองพบว่า ระยะทางที่ได้แปรผันตามขนาดของเครื่องหมาย และความลาดเอียงที่มีผลในการติดตาม ตั้งแต่มุม 0° ถึง 85° ในขณะที่ระยะทาง และมุมที่เกิดความผิดพลาดมากที่สุดในการติดตาม คือ ระยะทาง 50 เซนติเมตร และมุม 60° รวมทั้งในการศึกษา และพัฒนาวิธีการปรับปรุงการติดตาม เพื่อแก้ไขปัญหาในการติดตามจากผลกระทบจากแสงสะท้อน (Reflection) บนพื้นผิวของเครื่องหมายเออาร์ [8] โดยทำการ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตามกับวิธีการมาตรฐานของไลบรารี ARToolkit ผลจากการทดลอง พบว่าวิธีการปรับปรุงข้างต้นส่งผลให้การติดตามดีขึ้น ถึงแม้ว่าจะเกิดแสงสะท้อนบนพื้นผิว

เครื่องหมายเออาร์ก็ตาม และในการศึกษา และพัฒนาเทคนิควิธีการในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ของไลบรารี ARTag ชนิดหลายเครื่องหมาย (Multi Marker) [9] โดยอาศัยการปรับปรุงการติดตามด้วยเทคนิคการหาเส้นขอบรูปภาพ (Edge Detection) เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการติดตาม ผลจากการทดลองพบว่า เทคนิควิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพดีขึ้น รวมทั้งมีประสิทธิภาพดีกว่าไลบรารีของ ARToolkitPlus นอกจากนี้ยังมีการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการวิเคราะห์ภาพ [10] โดยในการทดลองได้สร้างเครื่องหมายเออาร์ใหม่ขึ้นมา และทำการกำหนดระเบียบวิธีการใหม่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ภาพเครื่องหมาย โดยพัฒนาอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ และระบุคุณลักษณะของเครื่องหมายเออาร์ (Identification Marker) ซึ่งนำมาทดลองวิเคราะห์ภาพเปรียบเทียบการเข้ารหัสภาพกับไลบรารี ARToolkit รวมทั้งยังทดลองภายใต้เงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงของแสงสว่าง ผลการทดลองพบว่า เครื่องหมาย และอัลกอริทึมดังกล่าวสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทำงานในการติดตามได้รวดเร็วเพิ่มขึ้นมากกว่าไลบรารี ARToolkit แม้ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของแสงสว่างก็ตาม ในขณะที่ไลบรารี ARToolkit พบว่าเกิดความผิดพลาดขึ้นในระหว่างการทำงานภายใต้เงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงของแสงสว่าง

จากงานวิจัยข้างต้น พบว่าปัญหาส่วนใหญ่ที่เป็นสาเหตุก่อให้เกิดความผิดพลาดในการติดตาม และการประมวลผล เกี่ยวข้องกับข้อจำกัด และปัจจัยต่างๆ ของไลบรารี ARToolkit นอกจากนี้ยังพบว่า ในประเด็นการติดตามภายใต้เงื่อนไขที่มีการเปลี่ยนแปลงของความส่องสว่างก็เป็นสาเหตุที่สำคัญอีกหนึ่งสาเหตุ ซึ่งส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการติดตามด้วยเช่นกัน เนื่องจากการทำค่าขีดแบ่งจะพิจารณาจากค่ากราฟแสดงค่าความถี่ (Histogram) ซึ่งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของความส่องสว่าง ค่ากราฟแสดงค่าความถี่ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในขณะที่ไลบรารี ARToolkit ใช้ค่าขีดแบ่งชนิดคงที่ จึงไม่สามารถปรับค่าขีดแบ่งตามกราฟแสดงค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงได้ จึงส่งผลให้ไม่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ และประมวลผลได้ตามลำดับ ดังรูปที่ 1



2.

รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของค่ากราฟแสดงค่าความถี่ และความส่องสว่าง

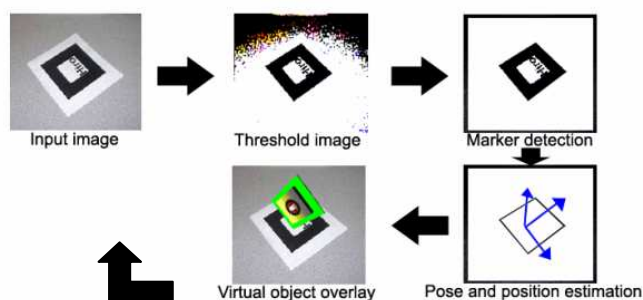
ด้วยสาเหตุข้างต้น รวมทั้งพบว่ายังไม่มีผู้ทำการวิจัยในประเด็นผลกระทบของค่าขีดแบ่ง และความส่องสว่างที่ไม่คงที่ในการติดตามด้วยไลบรารี ARToolkit งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอผลกระทบของค่าขีดแบ่งและความส่องสว่างที่มีต่อการติดตามเครื่องหมายเออาร์ โดยนำตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์มาตรฐานของไลบรารี ARToolkit จำนวน 4 ตัวอย่างทดลองภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความส่องสว่าง ซึ่งแบ่งความส่องสว่างออกเป็น 3 ช่วง และทดลองปรับการทำค่าขีดแบ่ง เพื่อหาค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่ง ที่มีผลต่อการติดตามเครื่องหมายเออาร์ และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่ง และความส่องสว่าง ซึ่งสามารถนำค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมไปใช้กับความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการติดตามเครื่องหมายเออาร์ดีขึ้น และยังส่งผลให้การติดตาม และการประมวลผลมีความต่อเนื่องอีกด้วย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทำงานของเทคโนโลยีเออาร์

การทำงานของเทคโนโลยีเออาร์ อาศัยเทคนิคการทำค่าขีดแบ่ง เพื่อใช้สำหรับรู้จำ ติดตาม เครื่องหมายเออาร์ การคำนวณค่าแบ่งระหว่างกล้อง และเครื่องหมายเออาร์ และค่าแบ่งที่ใช้วารสารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าปีที่ 4 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2555 Journal of Practical Electrical Engineering, Vol. 4, No. 1, 2012

เครื่องหมายเออาร์ (Identify Marker) เปรียบเทียบกับเทมเพลตในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ จากนั้นจึงทำการสร้างภาพกราฟิกเสมือนจริง และนำไปแสดงบนอุปกรณ์แสดงผล โดยอาศัยวิธีการแสดงผลทางคอมพิวเตอร์และวิดีโอทัศน์ ซึ่งขั้นตอนการทำงานของเทคโนโลยีนี้จะทำงานในลักษณะวนซ้ำไปมาตลอดจนกว่าจะสิ้นสุดการใช้งาน ดังรูปที่ 2

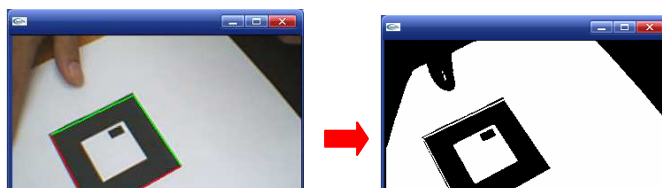


รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของไลบรารี ARToolkit [7]

สำหรับการติดตามเพื่อเข้ารหัสด้วยไลบรารี ARToolkit นั้น อาศัยวิธีการแปลงจากภาพสีเป็นภาพขาวดำ โดยใช้เทคนิคการแยกบริเวณจุดภาพ (Segmentation) ด้วยวิธีการทำค่าขีดแบ่ง แบบคงที่ (Fixed Thresholding) ซึ่งสามารถทำงานได้ดีกับภาพชนิดขาวดำที่มีความแตกต่างของวัตถุและพื้นหลังที่ชัดเจน ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีความเหมาะสม เมื่อนำมาใช้กับเครื่องหมายเออาร์ จากนั้นจึงทำการเข้ารหัสเป็นรหัสทวิภาคในรูปแบบไฟล์นามสกุล PATT เพื่อใช้ในการระบุคุณลักษณะเป็นรหัสทวิภาคของแต่ละเครื่องหมายเออาร์ไม่ให้ซ้ำกัน เพื่อนำไปใช้ในการประมวลผลต่อไป [7]

2.2 การทำค่าขีดแบ่ง

การทำค่าขีดแบ่งแบบ Global Thresholding [11] เป็นวิธีการหนึ่งในกระบวนการประมวลผลภาพระดับต่ำ ซึ่งทำหน้าที่จัดการแยกจุดภาพ (Pixel) โดยจะสร้างภาพขึ้นมาใหม่ในลักษณะเป็นรหัสภาพเลขฐานสองหรือเป็นลักษณะภาพขาวดำ (Binary Image) ดังรูปที่ 4



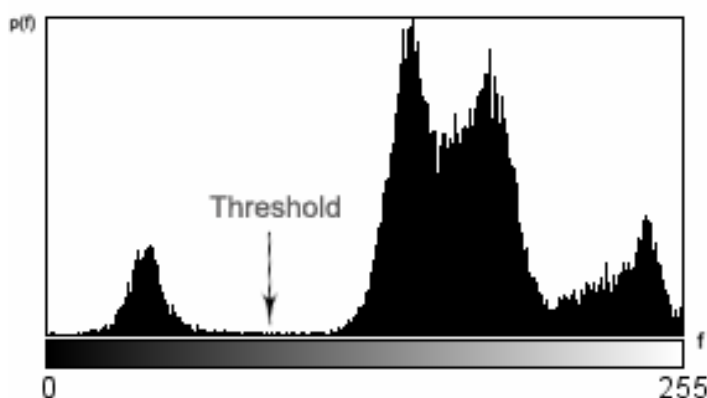
วารสารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2555 Journal of Practical Electrical Engineering, Vol. 4, No. 1, 2012

การทำค่าขีดแบ่งในแต่ละจุดภาพ มีค่า 2 ค่า คือ 0 และ 1 หรือ 0 และ 255 โดยกำหนดให้ค่า 0 แทนจุดภาพสีดำ และค่า 1 หรือ 255 แทนจุดภาพสีขาว ซึ่งอาศัยการเปรียบเทียบกับค่าขีดแบ่งที่ได้กำหนดเริ่มต้น โดยทำการแยกกลุ่มของจุดภาพว่าเป็นวัตถุเดียวกันหรือเป็นภาพพื้นหลัง ถ้ามีค่ามากกว่าค่าขีดแบ่ง จะทำการเปลี่ยนค่าจุดภาพในตำแหน่งนั้นให้เป็นค่าสูงสุดหรือเป็นภาพวัตถุ และถ้ามีค่าน้อยกว่าค่าขีดแบ่ง จะทำการเปลี่ยนค่าจุดภาพในตำแหน่งนั้นให้เป็นค่าต่ำสุดหรือเป็นภาพพื้นหลัง สามารถคำนวณค่าขีดแบ่งได้จากสมการที่(1)

$$T = T[f(x,y)] \quad (1)$$

โดยที่ T คือ ค่าขีดแบ่ง แบบ Global Thresholding
 $f(x,y)$ คือ ระดับข้อมูลภาพขาวดำ (Gray-Level) ณ ตำแหน่งที่ x, y

โดยปกติในการแยกวัตถุออกจากพื้นหลังด้วยวิธีการทำค่าขีดแบ่งแบบ Global Thresholding จะพิจารณาจากค่ากราฟแสดงค่าความถี่ (Histogram) โดยการเลือกค่าขีดแบ่งจะเลือกจากจุดต่ำสุดของกราฟแสดงค่าความถี่ ที่อยู่ระหว่างจุดสูงสุด (Peaks) ดังรูปที่ 5 สามารถคำนวณค่าขีดแบ่งได้จากสมการที่(2)



รูปที่ 5 การเลือกค่าขีดแบ่งจากกราฟแสดงค่าความถี่ [11]

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{ถ้า } f(x,y) > T \text{ (กลุ่มจุดภาพวัตถุ)} \\ 0 & \text{อื่นๆ หรือ } f(x,y) \leq T \text{ (กลุ่มจุดภาพพื้นหลัง)} \end{cases} \quad (2)$$

โดยที่ $g(x,y)$ คือ ข้อมูลภาพค่าขีดแบ่ง ณ ตำแหน่งที่ x, y
 $f(x,y)$ คือ ระดับข้อมูลภาพขาวดำ (Gray-Level) ณ ตำแหน่งที่ x, y
 T คือ ค่าขีดแบ่ง แบบ Global Thresholding

2.3 ความส่องสว่าง

ความส่องสว่าง (Illuminance) คือ ปริมาณแสงที่กระทบลงบนวัตถุต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็น ลูเมนต่อตารางเมตรหรือลักซ์ (Lux) ซึ่งมาตรฐานของ CIE [12] และ IEC 61892-2 [13] ได้กำหนดมาตรฐานความส่องสว่างภายในอาคารตามข้อกำหนด โดยกำหนดขึ้นตามประเภทของพื้นที่หรือกิจกรรมดังตารางที่ 1

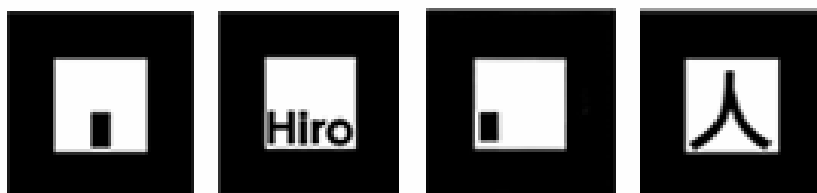
ตารางที่ 1 ความส่องสว่างตามมาตรฐานของ CIE [12] และ IEC [13]

พื้นที่ต่างๆ	มาตรฐาน CIE (ลักซ์)	มาตรฐาน IEC (ลักซ์)
ห้องประชุม	300-500-750	200-300-500
ห้องทำงานทั่วไป	300-500-750	200-300-500
ห้องคอมพิวเตอร์	300-500-750	200-300-500
ห้องสมุด	300-500-750	200-300-500
ห้องเก็บของ	100-150-200	100-150-200
ห้องน้ำ	100-150-200	100-150-200
บันได	100-150-200	100-150-200
ลิฟต์	100-150-200	100-150-200
ทางเดิน	50-100-150	100-150-200

3. การเตรียมอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 การเตรียมอุปกรณ์

งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์มาตรฐานของไลบรารี ARToolkit [7] ชนิดเครื่องหมายเออาร์เดี่ยว (Single Marker) รูปแบบไฟล์ของตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์เป็น BMP ชนิด 24 บิต ความละเอียดเท่ากับ 72 พิกเซลต่อนิ้ว ขนาด 8x8 ซม. จำนวน 4 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์มาตรฐาน [7]

ในงานวิจัยนี้อาศัยการเขียนโปรแกรมทดสอบการติดตามด้วยภาษา C++ และการเขียนโปรแกรมอ้างอิงไลบรารี ARToolkit เวอร์ชัน 2.72.1 โดยใช้วิธีการทำค่าขีดแบ่ง แบบ Global Thresholding เพื่อใช้ในขั้นตอนการเข้ารหัส และติดตาม เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถทำงานได้ดีกับภาพชนิดขาวดำที่มีความแตกต่างของวัตถุ และพื้นหลังที่ชัดเจน รวมทั้งสามารถทำงานได้ดีภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในการวัดความผิดพลาดของการติดตามในขณะที่ทำงาน ใช้อัตราความเร็วของข้อมูลวิดีโอทส์น(Frame rate) ที่ 300 เฟรม โดยทำการทดสอบบนไมโครคอมพิวเตอร์ภายใต้ระบบปฏิบัติการ Windows XP โดยมีคุณลักษณะของเครื่องดังนี้ CPU Intel Pentium D 1.86 GHZ, Hard disk 320 GB, DDR2 RAM 1 GB, Intel chipset VGA onboard 128 MB, กล้อง USB 2.0 ชนิดความละเอียด 3 ล้านพิกเซล, เครื่องมือสำหรับวัดความส่องสว่าง(Lux Meter) ยี่ห้อ Digicon รุ่น LX-50, ชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าส่องสว่างชนิดปรับความส่องสว่างได้, ห้องทดลองปิดทึบขนาดเท่ากับ 2 x 2 x 2 เมตร (กว้าง x ยาว x สูง)

3.2 วิธีการวิจัย

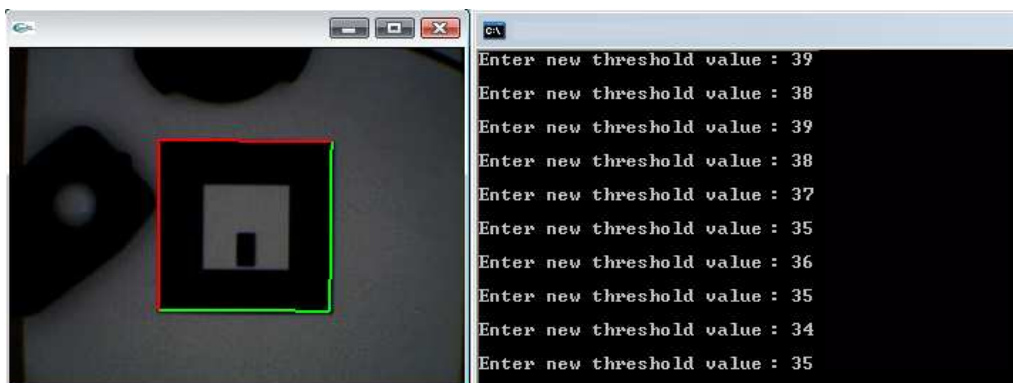
การศึกษาผลกระทบของค่าขีดแบ่ง และปริมาณความส่องสว่าง ที่มีผลต่อการติดตามเครื่องหมายเออาร์ ใช้ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์มาตรฐาน จำนวน 4 ตัวอย่าง โดยนำมาทำการทดลองกับโปรแกรมทดสอบการติดตามที่ละ 1 เครื่องหมายเออาร์ ซึ่งกำหนดระยะห่างระหว่างกล้องกับตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ เท่ากับ 40 ซม. ซึ่งเป็นระยะที่เกิดความผิดพลาดน้อย และสามารถติดตามได้ดีในสภาวะความส่องสว่างคงที่ [6] จากนั้นทำการปรับความส่องสว่าง ตั้งแต่ 0-300 ลักซ์ ตาม

มาตรฐาน CIE [12] และ IEC [13] ด้วยชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดปรับความส่องสว่าง โดยแบ่งการปรับความส่องสว่างออกเป็น 3 ช่วง เพื่อเป็นตัวแทนของประเภทของพื้นที่ต่างๆ คือ 300-200 ลักซ์วารสารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าปีที่ 4 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2555 Journal of Practical Electrical Engineering, Vol. 4, No. 1, 2012



รูปที่ 6 การทดลองปรับความส่องสว่าง

สำหรับการปรับค่าขีดแบ่งด้วยโปรแกรมทดสอบการติดตามเครื่องหมายเออาร์ โดยปรับเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0-255 ครั้งละ 1 ค่า และปรับลดลงครั้งละ 1 ค่า ตามลำดับ และวัดความผิดพลาดของการติดตามในขณะที่ทำงานด้วยอัตราความเร็วของข้อมูลวิดีโอไอทีสน์ที่ 300 เฟรมหรือความสามารถในการติดตามได้คงที่ภายใน 10 วินาที ซึ่งในการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ จำนวน 3 ซ้ำ และทำการบันทึกค่าขีดแบ่งและความส่องสว่างที่ได้จากการทดลองในแต่ละครั้ง ดังรูปที่ 7 จนกระทั่งไม่สามารถติดตามได้จึงหยุดการปรับค่า จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ โดยทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนแรกจนกระทั่งครบทั้ง 4 ตัวอย่าง และนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่ง และความส่องสว่างที่มีผลต่อการติดตามเครื่องหมายเออาร์

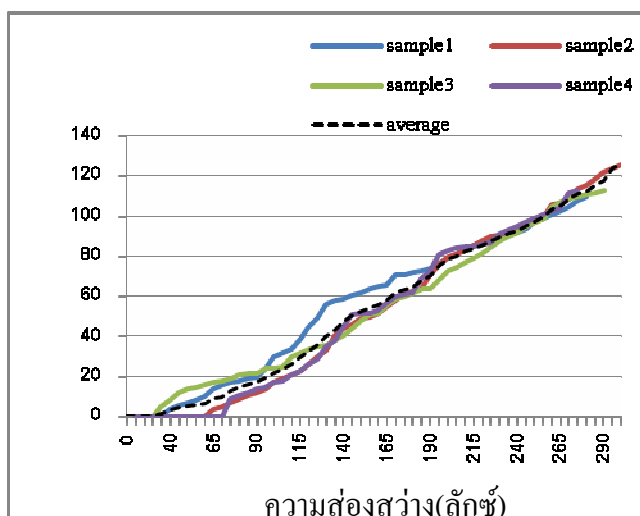


รูปที่ 7 การทดลองปรับค่าขีดแบ่ง

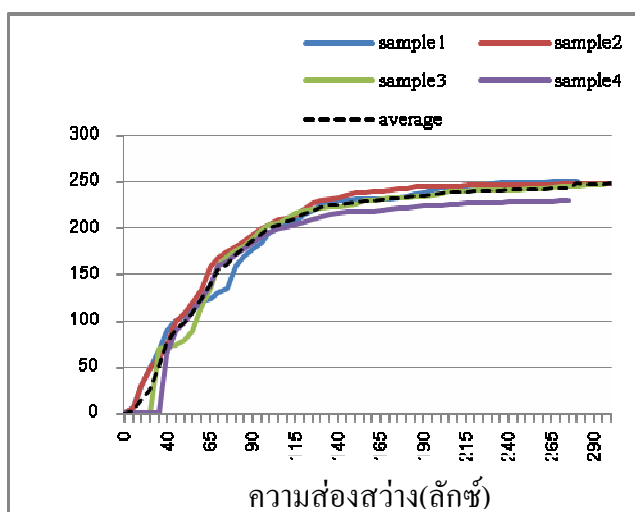
3. ผลการทดลอง

วารสารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2555 Journal of Practical Electrical Engineering, Vol. 4, No. 1, 2012

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งต่ำสุด สูงสุด และความส่องสว่าง มีผลการทดลอง ดังรูปที่ 8-9 ซึ่งจากรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งต่ำสุดและความส่องสว่าง ผลการทดลองพบว่า อัตราค่าขีดแบ่งของตัวอย่างทั้งหมดจะแปรผันโดยตรงตามความส่องสว่าง โดยที่เงื่อนไขความส่องสว่างต่ำสุดที่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ เท่ากับ 35 ลักซ์ มีค่าขีดแบ่งต่ำสุด เท่ากับ 5 ในขณะที่ความส่องสว่างสูงสุดเท่ากับ 300 ลักซ์ มีค่าขีดแบ่ง เท่ากับ 126 และจากรูปที่ 9 พบว่าอัตราค่าขีดแบ่งของตัวอย่างทั้งหมดจะแปรผันโดยตรงตามความส่องสว่างเช่นกัน โดยที่เงื่อนไขความส่องสว่างต่ำสุดที่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ เท่ากับ 15 ลักซ์ มีค่าขีดแบ่งต่ำสุด เท่ากับ 5 ในขณะที่ความส่องสว่างสูงสุด เท่ากับ 300 ลักซ์ มีค่าขีดแบ่ง เท่ากับ 249



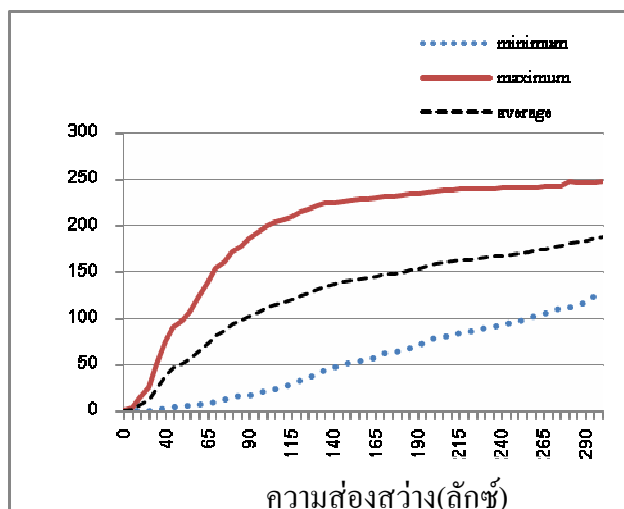
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งต่ำสุดและความส่องสว่าง



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งสูงสุดและความส่องสว่าง

วารสารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2555 Journal of Practical Electrical Engineering, Vol. 4, No. 1, 2012

ให้ค่าขีดแบ่งสูงสุดมีความชันของกราฟมากกว่าค่าขีดแบ่งต่ำสุด และมีแนวโน้มคงที่หลังจากปรับความส่องสว่างดังกล่าว จึงเห็นได้ว่า ความส่องสว่างไม่มีผลกระทบต่อค่าขีดแบ่งสูงสุด ในขณะที่ค่าขีดแบ่งต่ำสุดมีความชันของกราฟเกือบจะคงที่ แม้ว่าจะมีการปรับปริมาณความสว่างเพิ่มขึ้นก็ตาม



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งต่ำสุด ค่าขีดแบ่งสูงสุด และความส่องสว่าง

จากรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งต่ำสุด ค่าขีดแบ่งสูงสุด และความส่องสว่าง ผลการทดลองพบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งเป็นค่าที่เหมาะสม ที่สามารถนำไปใช้เป็นค่าขีดแบ่งในแต่ละช่วงความส่องสว่างได้ ซึ่งส่งผลให้สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ดีขึ้น

ตารางที่ 2 ผลของค่าขีดแบ่งกับความส่องสว่างทั้ง 3 ช่วง

ความส่องสว่าง (ลักซ์)	ค่าขีดแบ่งสูงสุด	ค่าขีดแบ่งต่ำสุด	ค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่ง (\bar{x}_{Total})
ช่วงที่ 1 (250 ลักซ์)			
ตัวอย่างที่ 1	250	97	173.5
ตัวอย่างที่ 2	248	97	172.5
ค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งช่วงที่ 1 (\bar{x}_1)	249	97	173
ช่วงที่ 2 (150 ลักซ์)			
ตัวอย่างที่ 1	231	62	146.5
ตัวอย่างที่ 2	239	49	144
ตัวอย่างที่ 3	226	48	137
ตัวอย่างที่ 4	217	52	134.5
ค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งช่วงที่ 2 (\bar{x}_2)	228.25	52.75	140.5
ช่วงที่ 3 (50 ลักซ์)			
ตัวอย่างที่ 1	105	7	56
ตัวอย่างที่ 2	109	0	54.5
ตัวอย่างที่ 3	79	14	46.5
ตัวอย่างที่ 4	99	0	49.5
ค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งช่วงที่ 3 (\bar{x}_3)	98	5.25	51.63
ค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งทั้งหมด (\bar{x}_{Total})	189.5	51.83	120.67

วารสารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2555 Journal of Practical Electrical Engineering, Vol. 4, No. 1, 2012

จากตารางที่ 2 แสดงผลของค่าขีดแบ่งที่ได้ทำการปรับความส่องสว่าง โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง เพื่อเป็นตัวแทนของประเภทของพื้นที่ต่างๆ ซึ่งใช้ค่าเฉลี่ยของความส่องสว่างในแต่ละช่วง เท่ากับ 250, 150 และ 50 นำมาทดลองเปรียบเทียบกับตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ จำนวน 4 เครื่องหมาย พบว่า ค่าขีดแบ่งสูงสุด ค่าขีดแบ่งต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่ง ที่สามารถติดตามได้ในช่วงที่ 1 (\bar{x}_1) เท่ากับ 242.25, 97.5 และ 169.88 ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 (\bar{x}_2) เท่ากับ 228.25, 52.75 และ 140.5 ตามลำดับ ในช่วงที่ 3 (\bar{x}_3) เท่ากับ 98, 5.25 และ 51.63 ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งสูงสุด ค่าขีดแบ่งต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งทั้งหมด 3 ช่วง (\bar{x}_{Total}) เท่ากับ 189.5, 51.83 และ 120.67 ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติในการหาความสัมพันธ์ของค่าขีดแบ่ง และความส่องสว่าง ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) พบว่า ค่าขีดแบ่งสูงสุด และค่าขีดแบ่งต่ำสุดมีค่า $p=0.000 < \alpha=0.05$ ทั้ง 2 ค่า จึงปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 แสดงว่า ค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งโดยใช้ความส่องสว่างทั้ง 3 ช่วง อย่างน้อย 1 คู่ ได้ค่าขีดแบ่งที่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังรูปที่ 12

Descriptives

		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
MAX	1	4	242.25	9.95	4.97	226.42	258.08	228	250
	2	4	228.25	9.22	4.61	213.59	242.91	217	239
	3	4	98.00	13.32	6.66	76.81	119.19	79	109
	Total	12	189.50	68.56	19.79	145.94	233.06	79	250
MIN	1	4	97.50	1.00	.50	95.91	99.09	97	99
	2	4	52.75	6.40	3.20	42.57	62.93	48	62
	3	4	5.25	6.70	3.35	-5.41	15.91	0	14
	Total	12	51.83	39.64	11.44	26.65	77.02	0	99

Test of Homogeneity of Variances

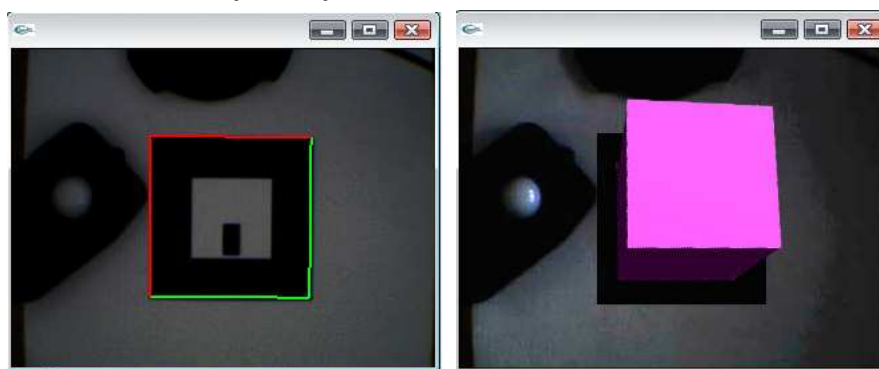
	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
MAX	.237	2	9	.793
MIN	3.426	2	9	.078

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
MAX	Between Groups	50625.500	2	25312.750	210.258	.000
	Within Groups	1083.500	9	120.389		
	Total	51709.000	11			
MIN	Between Groups	17025.167	2	8512.583	294.101	.000
	Within Groups	260.500	9	28.944		
	Total	17285.667	11			

รูปที่ 12 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

สำหรับการนำค่าขีดแบ่งที่ได้จากการทดลองปรับค่าขีดแบ่ง และความส่องสว่างของตัวอย่าง เครื่องหมายเออาร์ทั้งหมดนั้น มาใช้ทดสอบการติดตาม และการประมวลผลกราฟิก ภายใต้เงื่อนไข ความส่องสว่างทั้ง 3 ช่วง พบว่า การติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ดีขึ้น และมีความต่อเนื่อง รวมทั้งยัง ทำให้สามารถประมวลผลได้สมบูรณ์ ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 การติดตามและการประมวลผลได้สมบูรณ์

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของค่าขีดแบ่ง ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของความส่องสว่าง ที่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ โดยใช้ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์ จำนวน 4 เครื่องหมาย เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าขีดแบ่งต่ำสุด สูงสุด พบว่าค่าขีดแบ่งมีความสัมพันธ์แปรผัน โดยตรงกับความส่องสว่าง โดยมีความส่องสว่างต่ำสุดที่สามารถติดตามเครื่องหมายเออาร์ได้ เท่ากับ 15 ลักซ์ และความส่องสว่างสูงสุด เท่ากับ 300 ลักซ์ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งที่สามารถติดตามได้ในช่วงที่ 1 (\bar{x}_1) เท่ากับ 169.88 ในช่วงที่ 2 (\bar{x}_2) เท่ากับ 140.5 ในช่วงที่ 3 (\bar{x}_3) เท่ากับ 51.63 และค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งสูงสุด ค่าขีดแบ่งต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งทั้งหมด 3 ช่วง (\bar{x}_{Total}) เท่ากับ 120.67 ซึ่งค่าขีดแบ่งที่ได้ข้างต้นสามารถนำไปใช้ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของความส่องสว่างที่แตกต่างกันได้ในขณะที่ไลบรารี ARToolkit ซึ่งมีค่าขีดแบ่งคงที่ จึงสามารถใช้ได้เฉพาะเงื่อนไขความส่องสว่างคงที่เท่านั้น นอกจากนี้เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติในการหาความสัมพันธ์ของค่าขีดแบ่ง และความส่องสว่าง พบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าขีดแบ่งโดยใช้ความส่องสว่างทั้ง 3 ช่วง อย่างน้อย 1 คู่ ได้ค่าขีดแบ่งที่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นผลที่ได้จากการทดลอง สามารถนำค่าขีดแบ่งที่มีความเหมาะสม ไปใช้ได้กับความส่องสว่าง แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของความส่องสว่างก็ตาม ส่งผลให้การติดตามเครื่องหมายเออาร์มีประสิทธิภาพดีขึ้น และทำให้การติดตามมีความต่อเนื่อง รวมทั้งยังทำให้สามารถประมวลผลได้สมบูรณ์อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

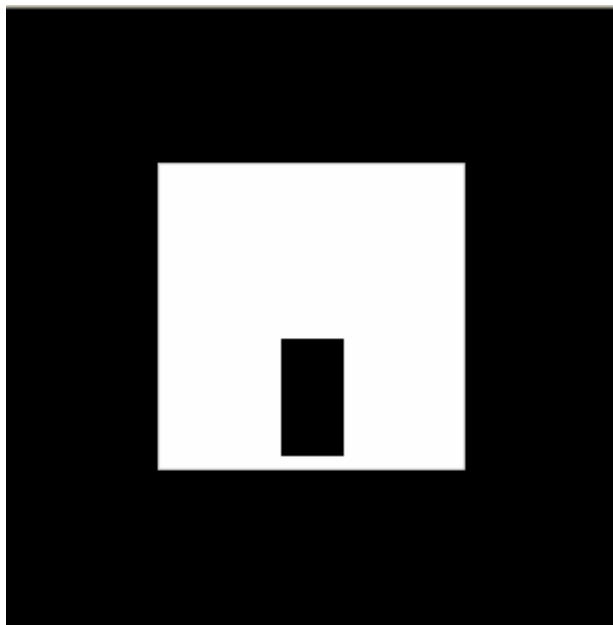
- [1] R. Azuma et al., "A Survey of Augmented Reality.," *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.6, no.4, pp. 355-385, 1997.
- [2] R. Silva, C. Oliveira and A. Giraldi, "Introduction to Augmented Reality.," *National Laboratory for Scientific Computation*.
- [3] Claudio Kirner, Member IEEE, Ezequiel R. Zorzal and T. G. Kirner, "Case Studies on the Development of Game Using Augmented Reality.," *Methodist University* , 2006.
- [4] D. Wagner and D. Schmalstieg, "ARToolkitPlus for pose tracking on mobile devices.," *Proceedings of 12th Computer Vision Winter Workshop(CVWW)*, 2007, 2, 15, pp. 6-8, 2007.

- [5] Bortong Chen, Chia-Chi Wu, Yi-Chi Huang and Yu-Lun Huang, “START: A Selective Thresholding Augmented Reality Toolkit.”, *Proceedings of 2011 8th Asian Control Conference(ASCC)*, Kaohsiung, Taiwan, May 15-18, pp. 293-298, 2011.
- [6] Hirokazu Kato and Mark Billinghurst, “Marker Tracking and HMD Calibration for Video-base Augmented Reality Conferencing System.”, *Proceedings of IWAR 99*, pp. 85-94, 1999.
- [7] Hirokazu Kato, Mark Billinghurst and Iran Poupyerv, “ARToolKit User manual version 2.33”, *Human Interface Technology Lab, University of Washington*, 2000.
- [8] Thomas Pintaric, “An Adaptive Thresholding Algorithm for the Augmented reality Toolkit.”, *Vienna University of Technology*, 2003.
- [9] Martin Hirzer, “Marker Detection for Augmented Reality Applications.”, *Inst. For Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology, Polytechnic University, Brooklyn, NY*, 2008.
- [10] Hongfei Wu, Fengjing Shao, Rencheng Sun, “Research of quickly identifying markers on Augmented Reality.”, *Advanced Management Science(ICAMS), 2010 IEEE International Conference*, 3, pp. 671-675, 2010.
- [11] R. C. Gonzalez et al., “Digital Image Processing.”, in Chapter 10, 2nd ed.; Prentice Hall, 2004.
- [12] International Commission on Illumination(CIE), “CIE Colorimetry-Part2: Standard illuminant for Colorimetry.”, *ISO 11664-2:2007(E)/CIE S 014-2/E:2006*. Vienna, Austria, 2007.
- [13] International Electrotechnical Commission (IEC), “General lighting illumination level. 2005”. *IEC 61892-2 International Standard*. Geneva 20, Switzerland, 2005.

บทความนี้ส่งเข้ามาเมื่อ 16 กันยายน 2554 และได้รับพิจารณาให้ตีพิมพ์เมื่อ 11 มกราคม 2555

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์

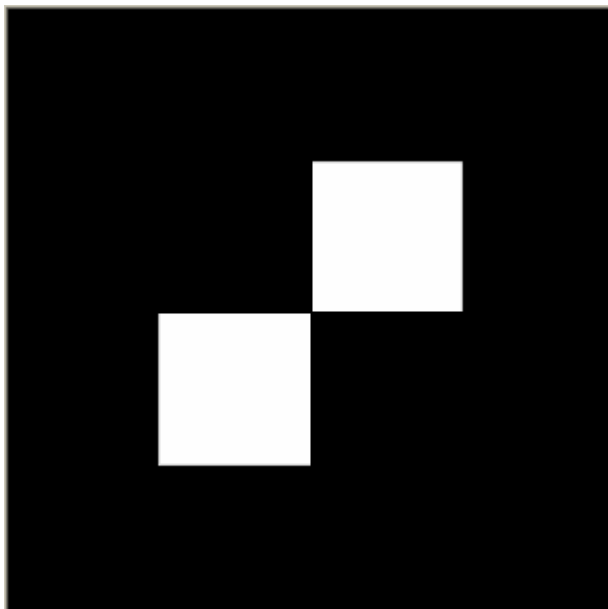
ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์แบบที่ 1 (patt.sample1)



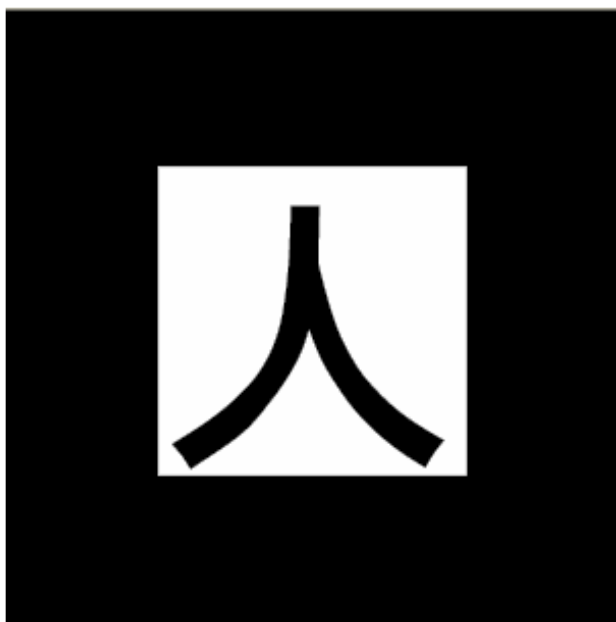
ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์แบบที่ 2 (patt.sample2)



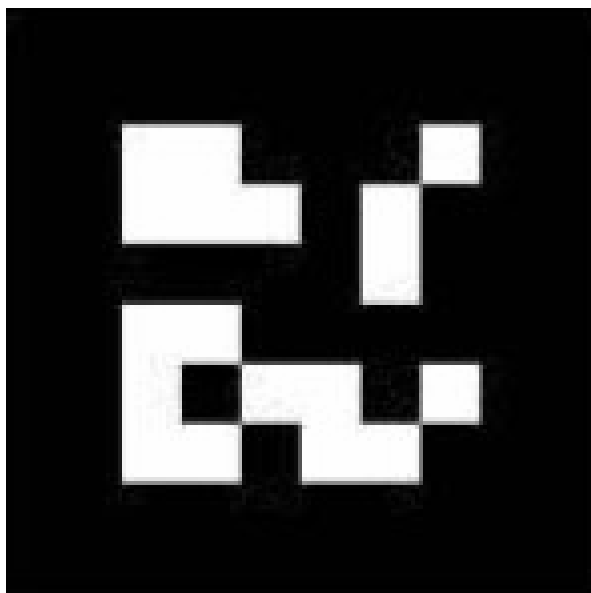
ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์แบบที่ 3 (patt.sample3)



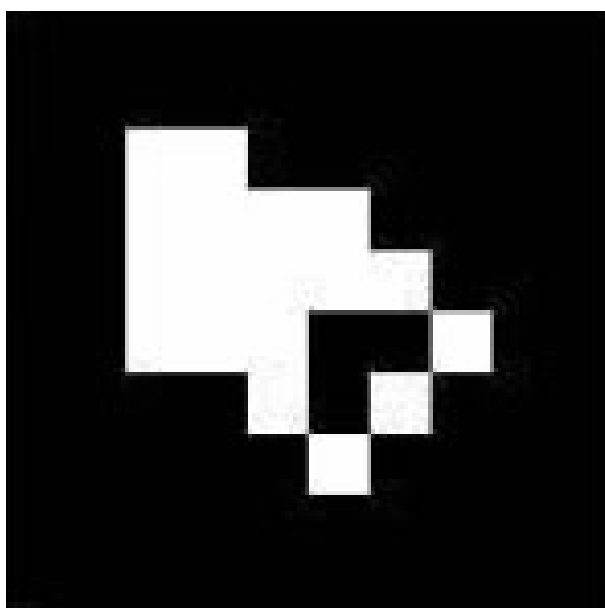
ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์แบบที่ 4 (patt.sample4)



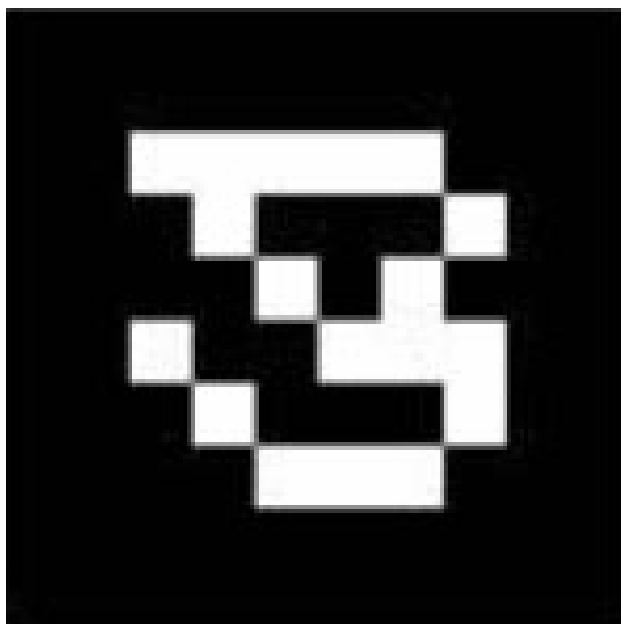
ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์แบบที่ 5 (patt.sample5)



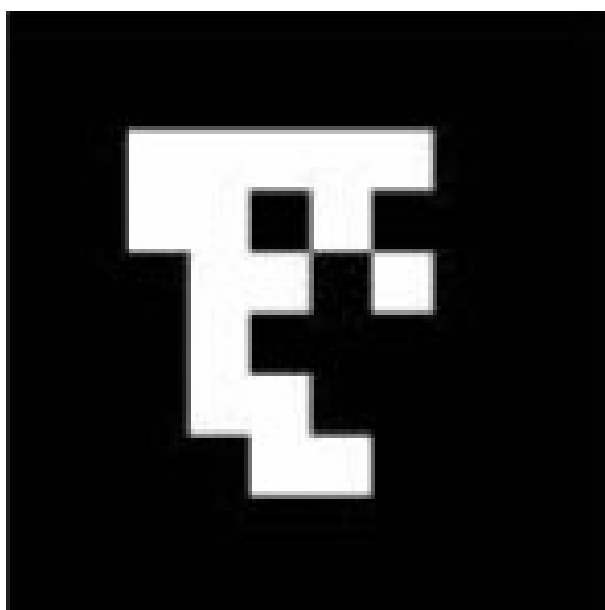
ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์แบบที่ 6 (patt.sample6)



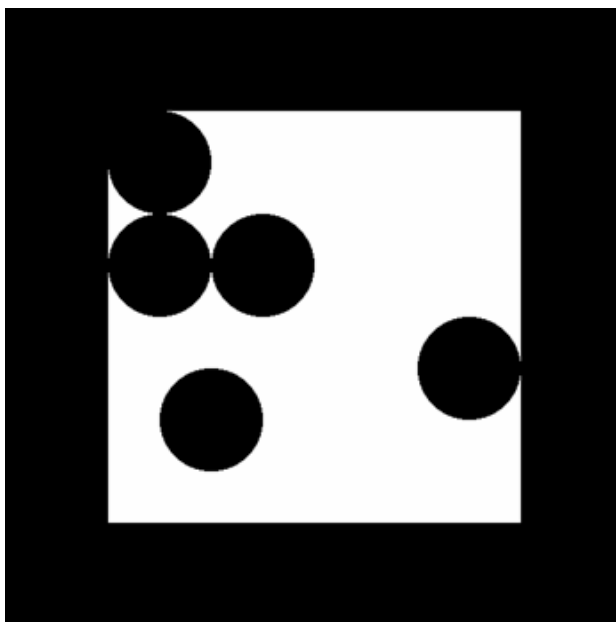
ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์แบบที่ 7 (patt.sample7)



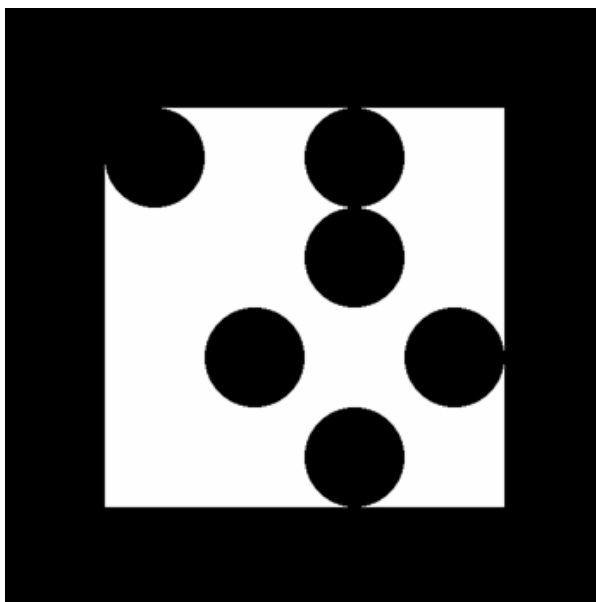
ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์แบบที่ 8 (patt.sample8)



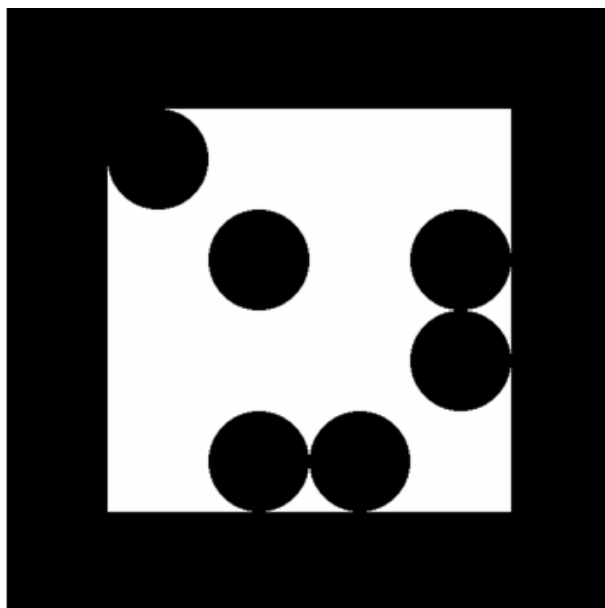
ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์แบบที่ 9 (patt.sample9)



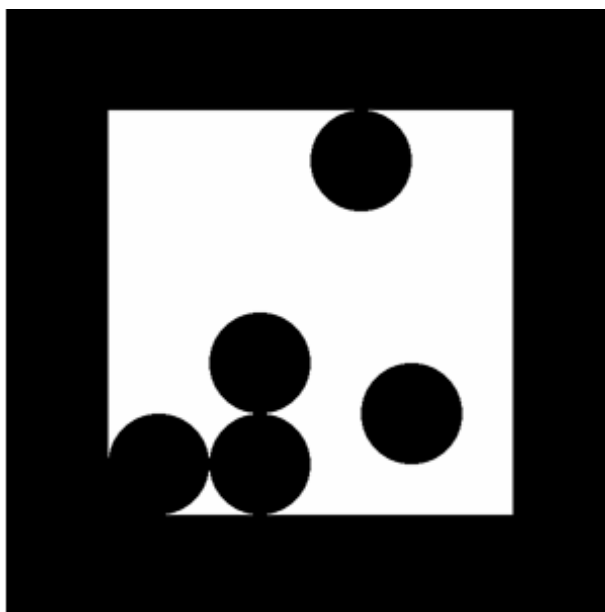
ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์แบบที่ 10 (patt.sample10)



ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์แบบที่ 11 (patt.sample11)

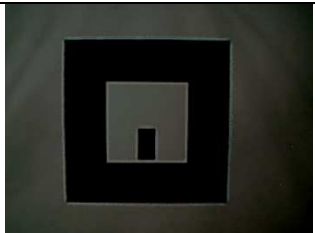
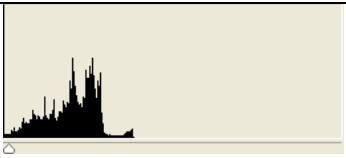
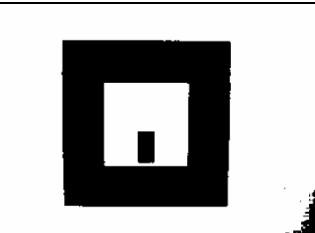
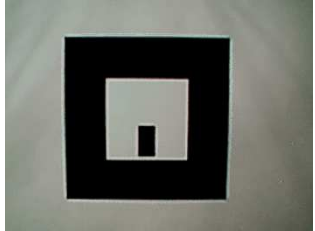
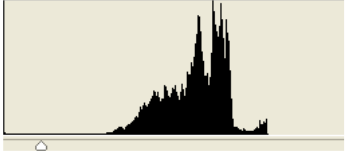
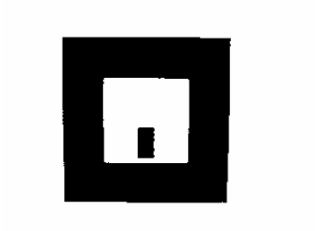
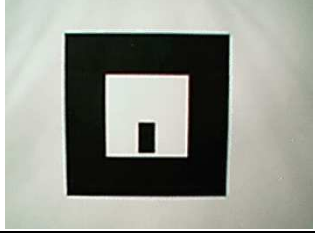
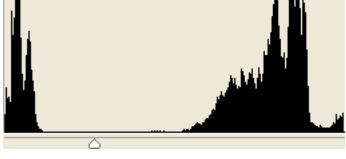
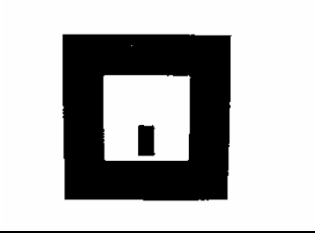
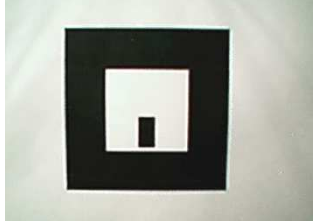
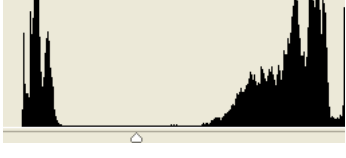
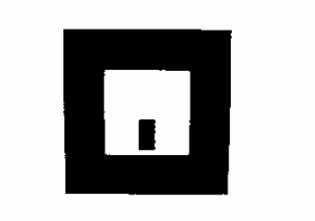






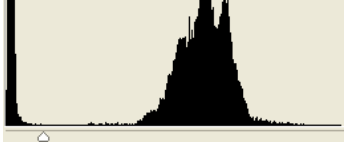


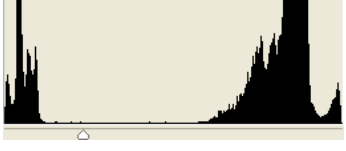




ตัวอย่างเครื่องหมายเออาร์แบบที่ 12 (patt.sample12)

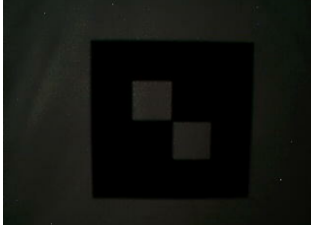
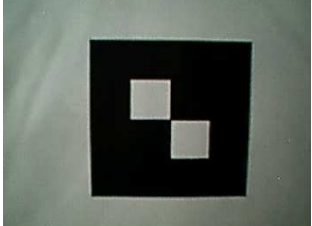
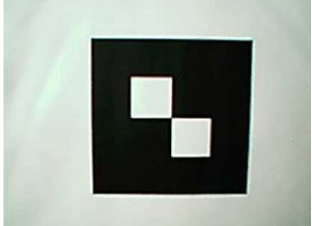
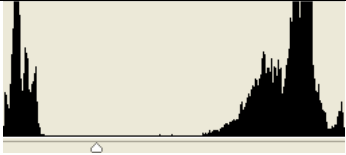

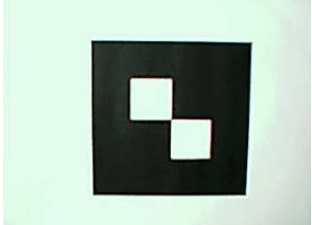
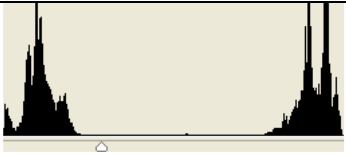



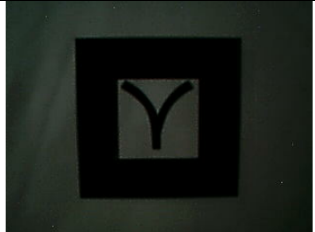
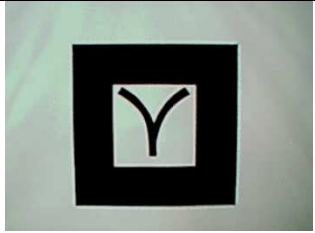
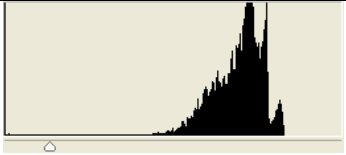

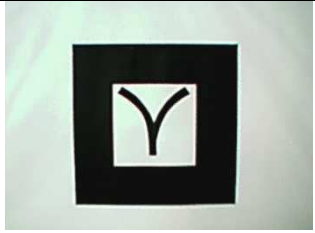
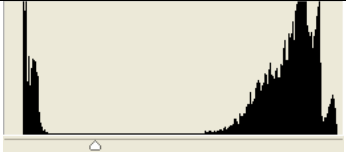

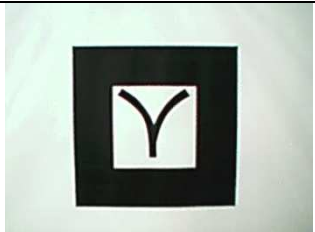
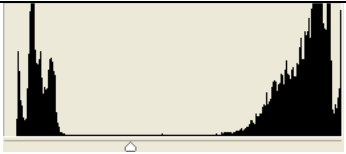

ภาคผนวก ค
ตารางเปรียบเทียบค่าฮิสโตแกรม และการขีดแบ่ง ภายใต้เงื่อนไขความส่องสว่างที่มีการ
เปลี่ยนแปลง

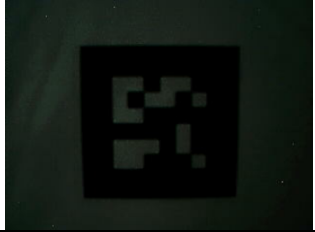
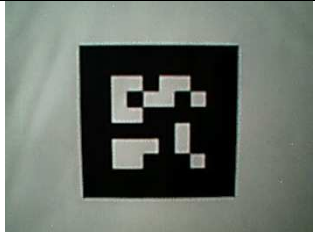
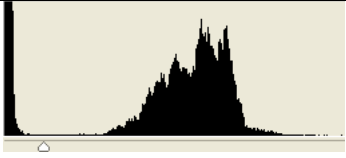

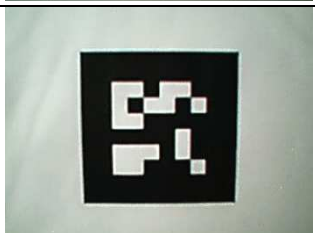
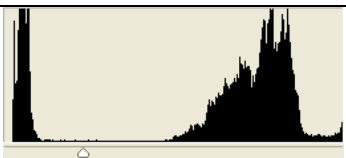

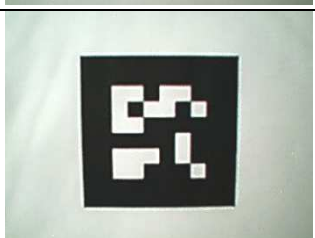
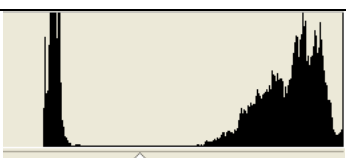

การติดตามตัวอย่างเครื่องหมายด้วยวิธี Global Thresholding


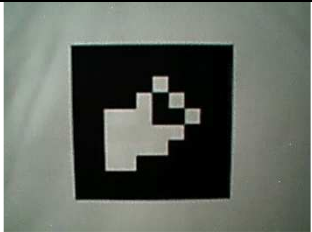
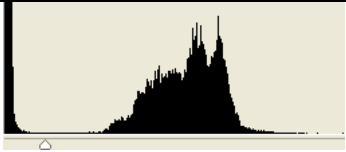


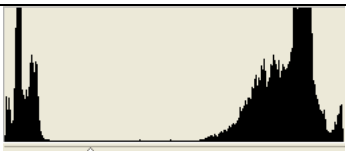

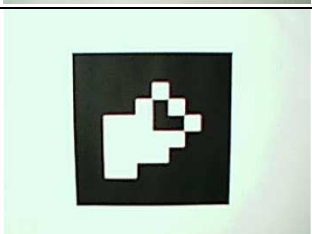
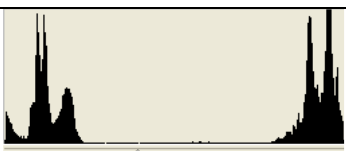

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 1	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		


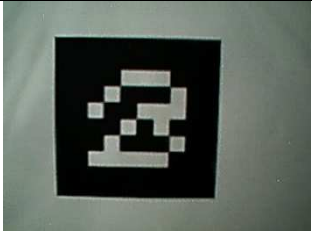
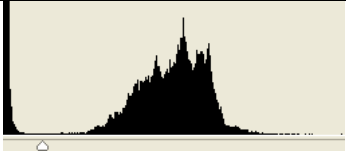

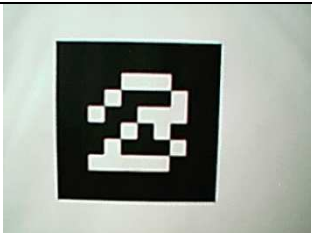
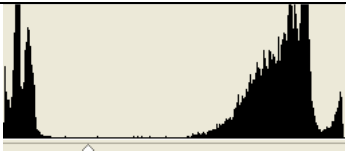

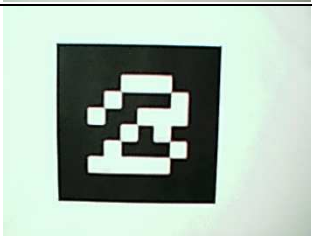
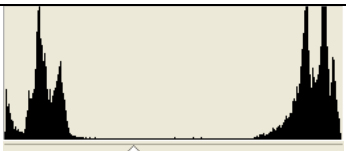

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 2	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		


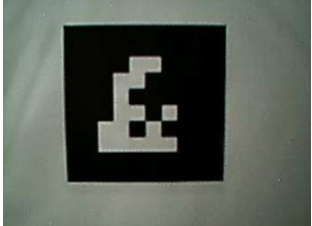
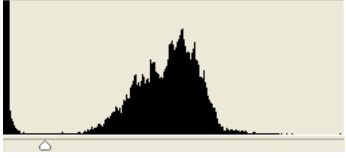

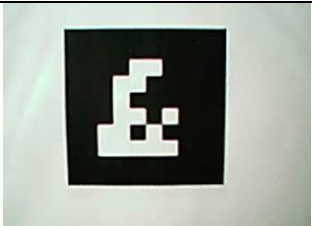
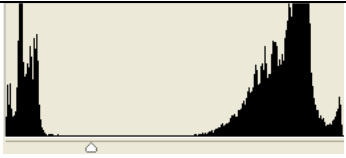


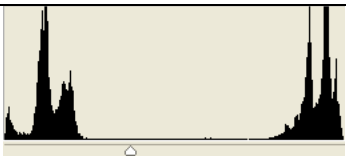

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 3	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15	ติดตามไม่ได้	ติดตามไม่ได้
	25	ติดตามไม่ได้	ติดตามไม่ได้
	35		
	45		

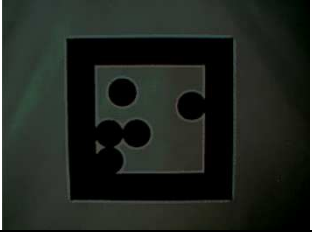
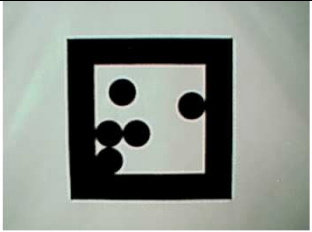
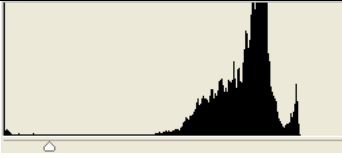

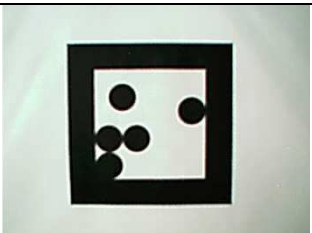
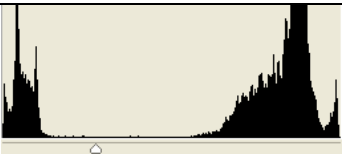

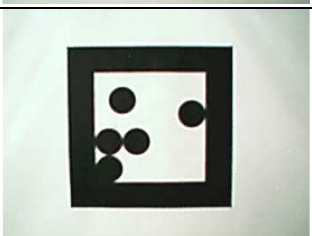
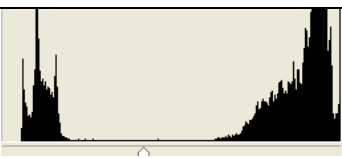
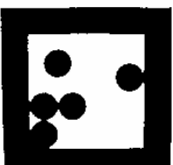
เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 4	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15	ติดตามไม่ได้	ติดตามไม่ได้
	25		
	35		
	45		

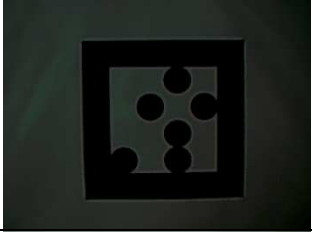
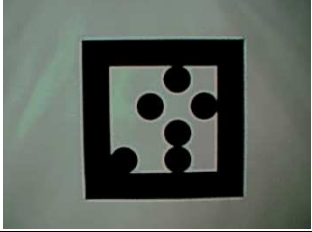
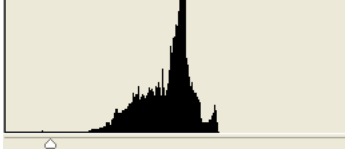
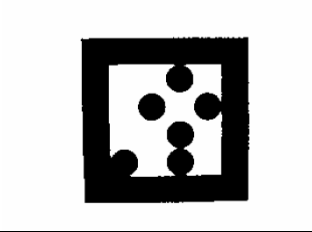
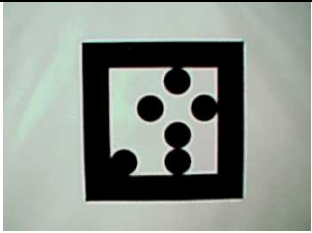
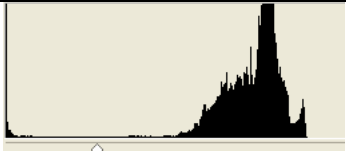
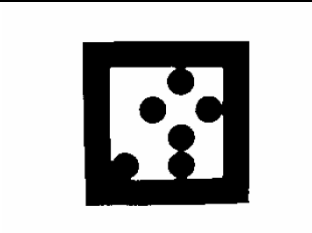
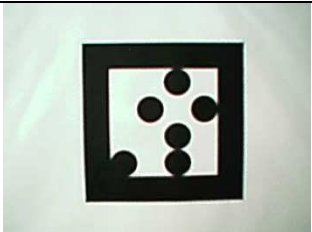
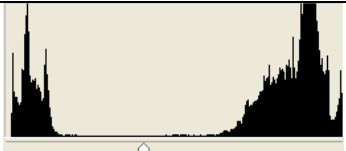
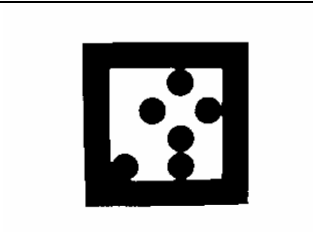
เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 5	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15	ติดตามไม่ได้	ติดตามไม่ได้
	25		
	35		
	45		


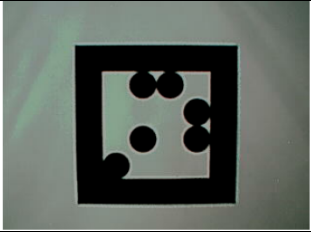
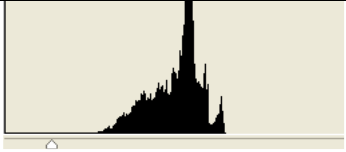
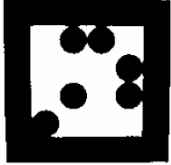
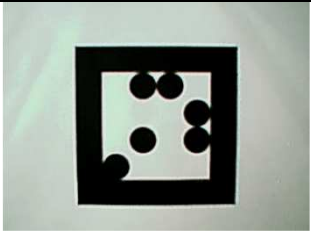
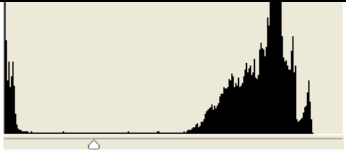

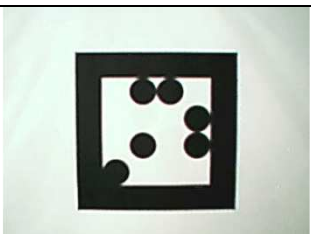
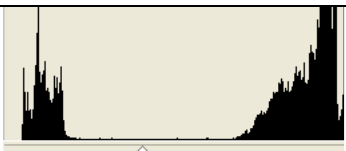

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 6	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15	ติดตามไม่ได้	ติดตามไม่ได้
	25		
	35		
	45		

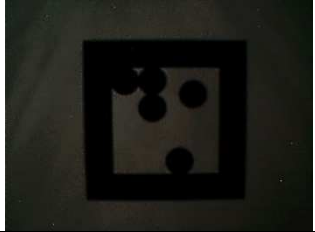
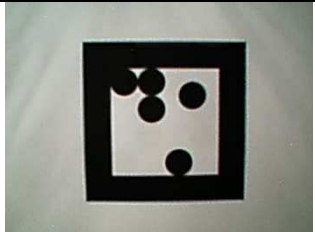
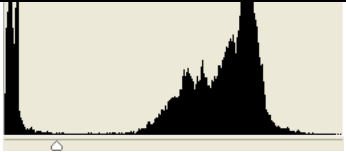

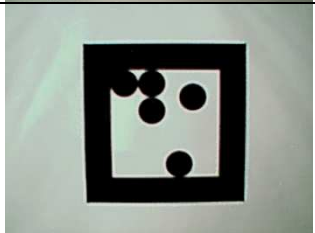
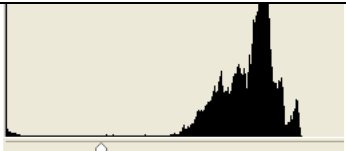
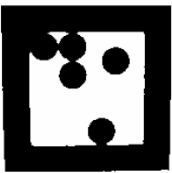
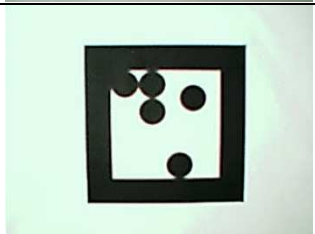
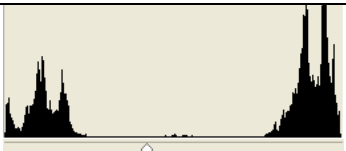
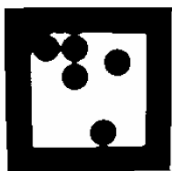
เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 7	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15	ติดตามไม่ได้	ติดตามไม่ได้
	25		
	35		
	45		

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 8	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15	ติดตามไม่ได้	ติดตามไม่ได้
	25		
	35		
	45		

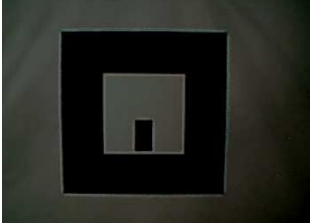
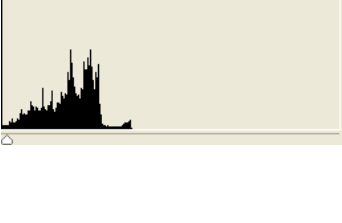

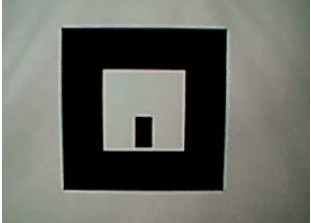
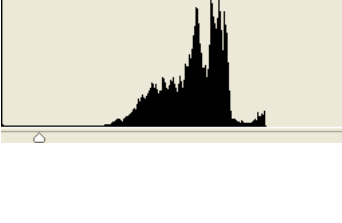
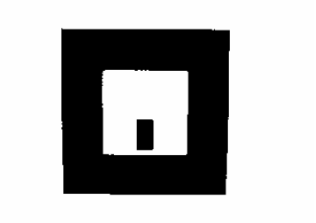
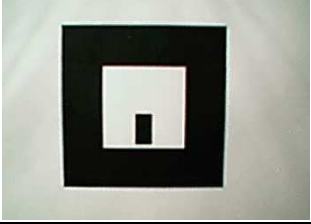
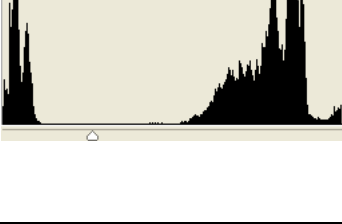
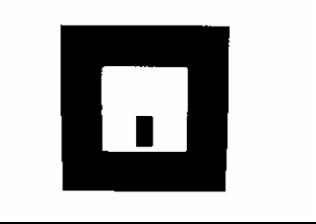
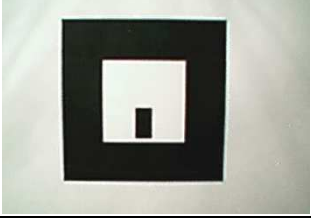
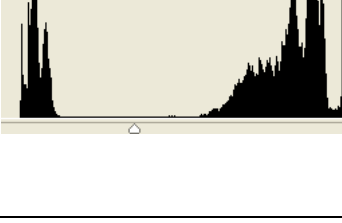
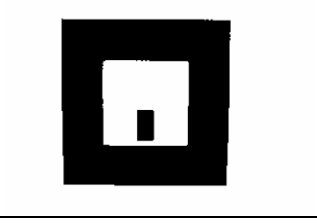
เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 9	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15	ติดตามไม่ได้	ติดตามไม่ได้
	25		
	35		
	45		





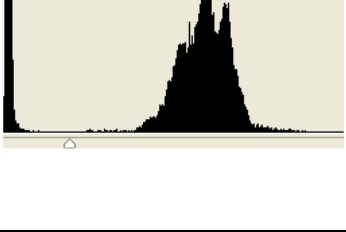


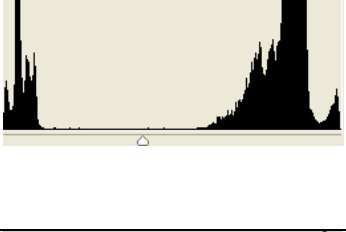
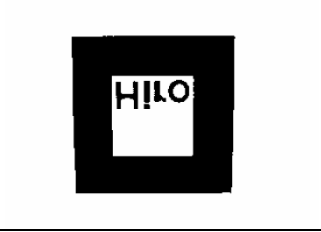

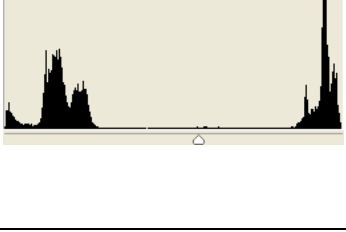
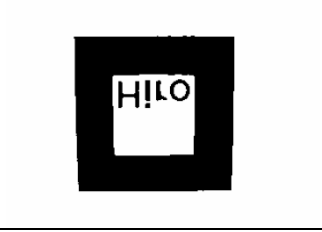
เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 10	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15	ติดตามไม่ได้	ติดตามไม่ได้
	25		
	35		
	45		

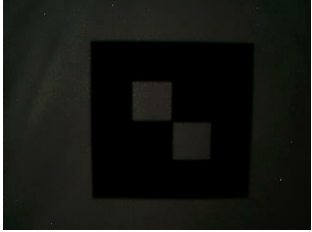
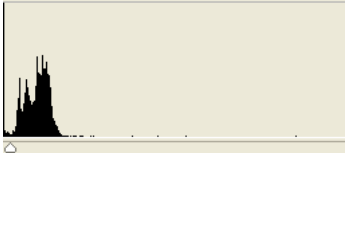
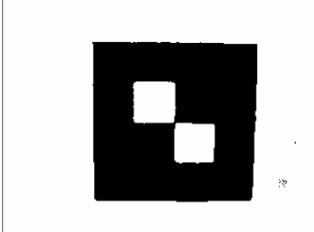
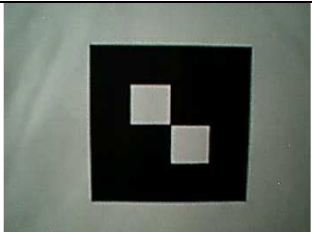
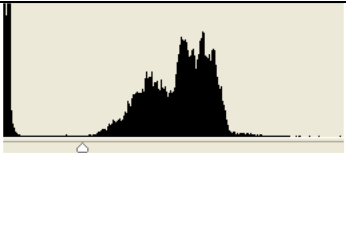
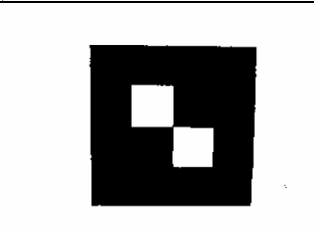
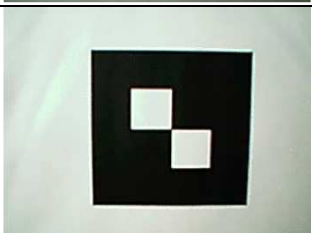
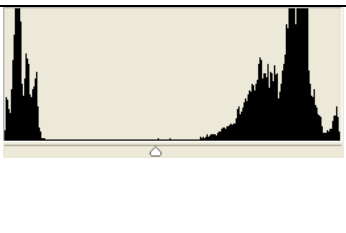
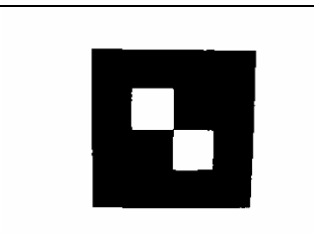
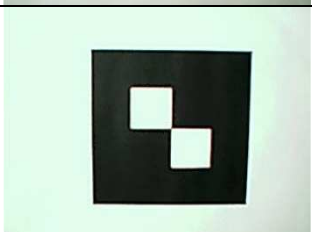
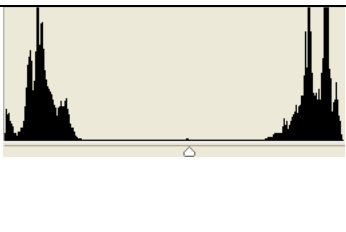
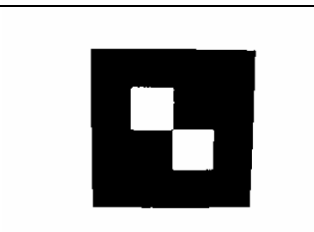
เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 11	ความ สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15	ติดตามไม่ได้	ติดตามไม่ได้
	25		
	35		
	45		

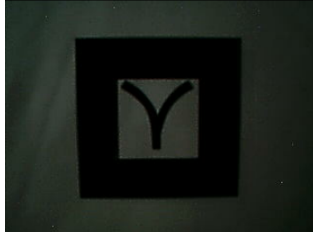
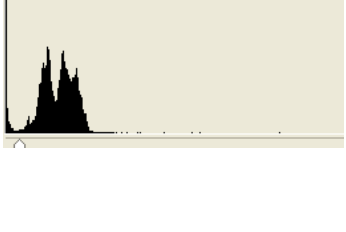


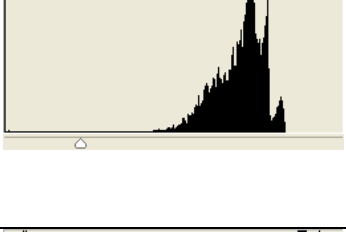

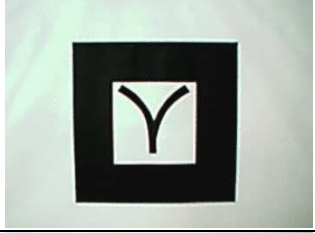
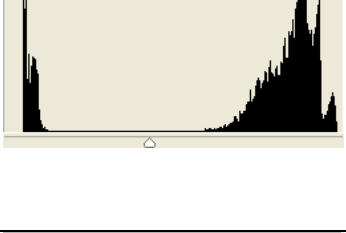

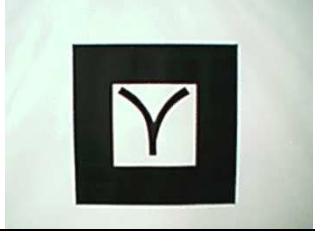
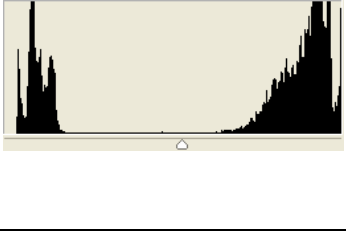

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 12	ความ สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15	ติดตามไม่ได้	ติดตามไม่ได้
	25		
	35		
	45		


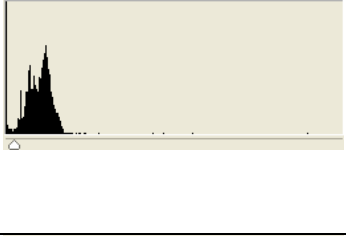
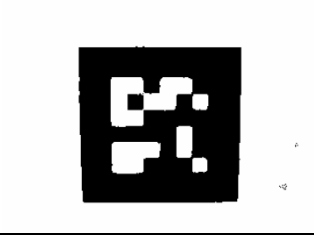
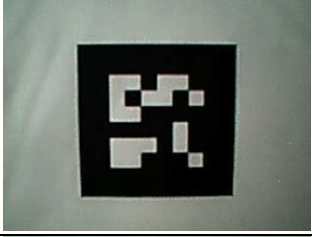
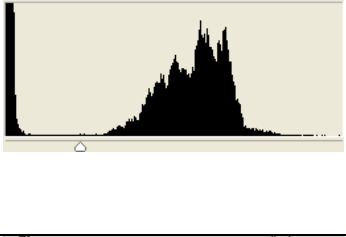
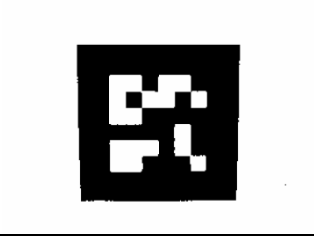
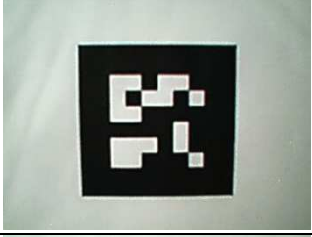
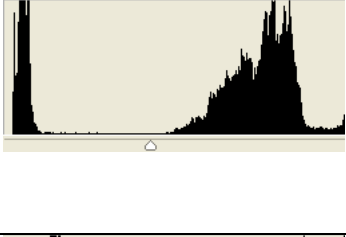
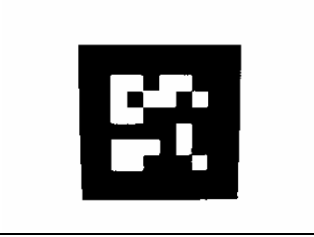
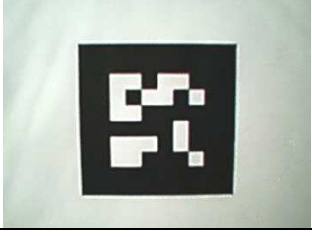
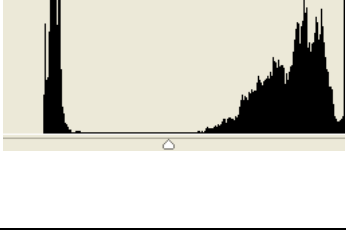
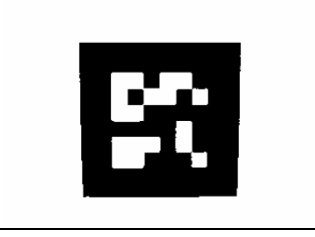
การติดตามตัวอย่างเครื่องหมายด้วยวิธี Automatic Threshold Level Selection


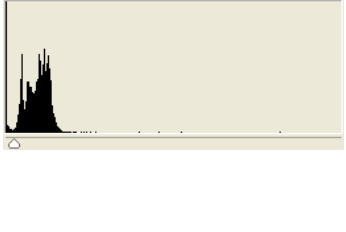

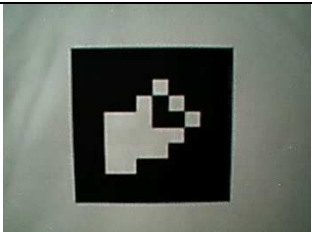
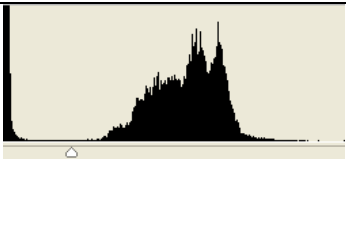


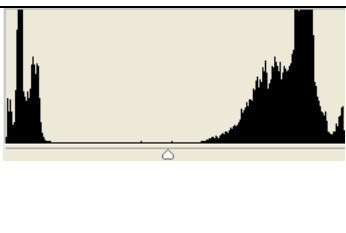


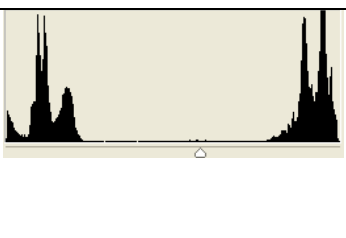

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 1	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		


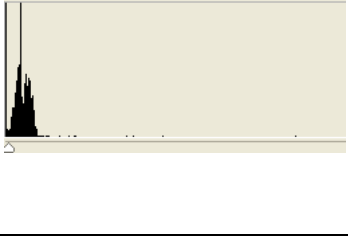
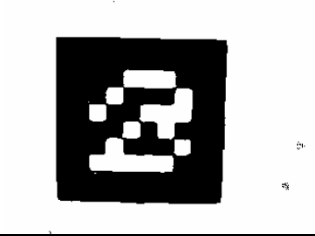
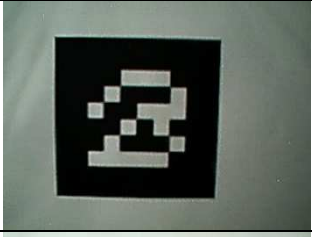
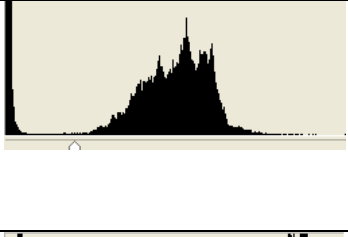
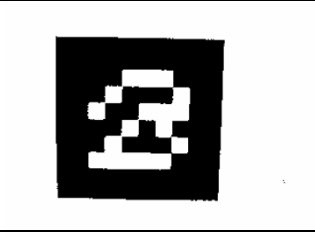
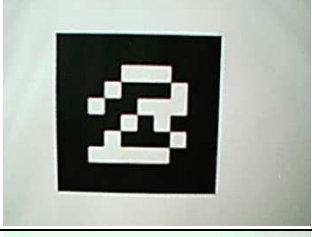
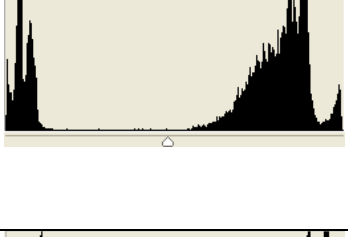
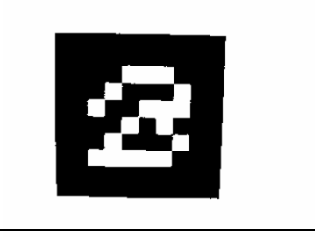
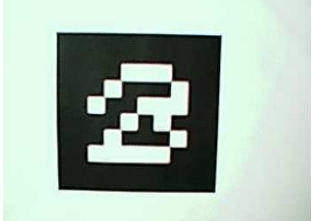
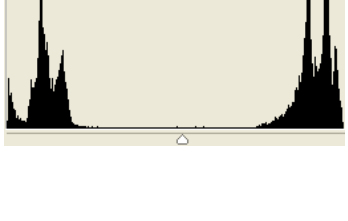

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 2	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		


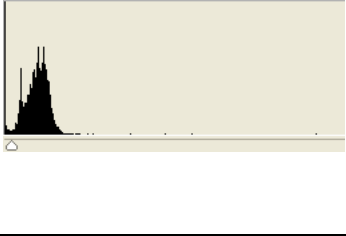

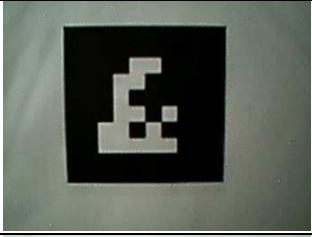
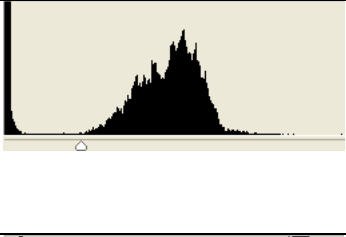

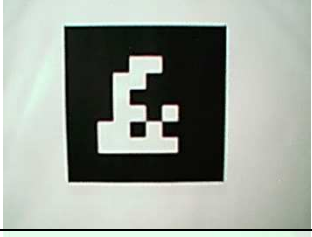
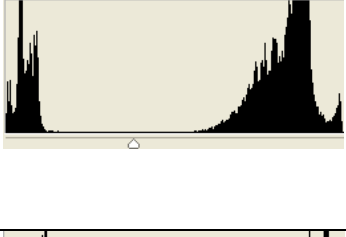

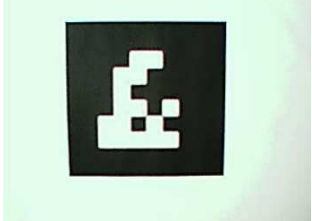
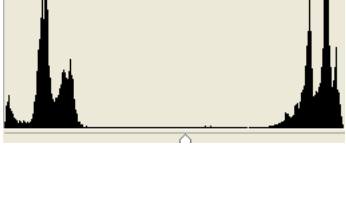

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 3	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		

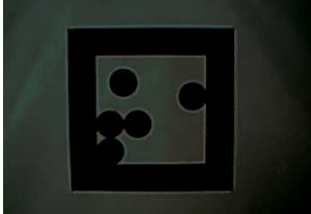
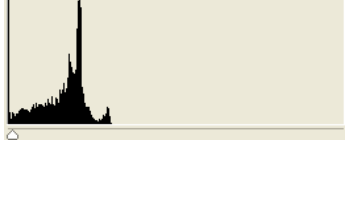
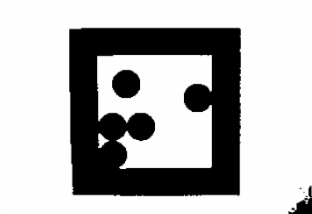
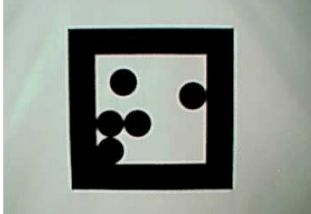
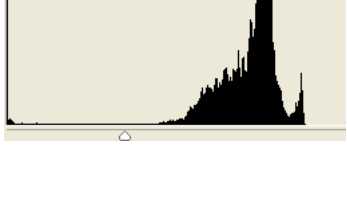
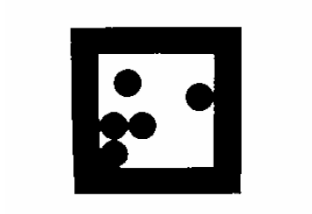
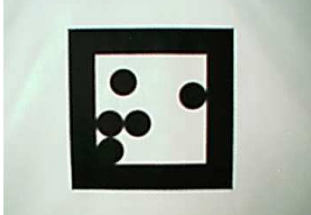
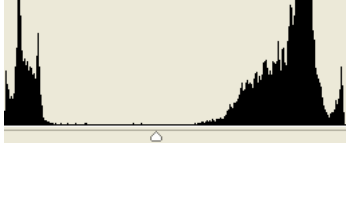
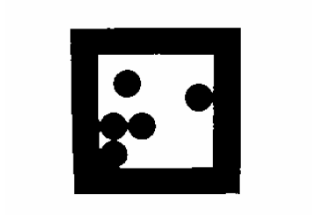
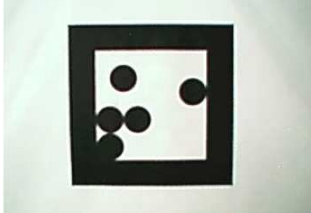
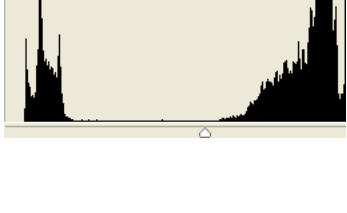
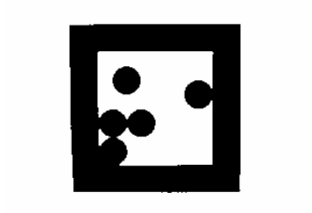
เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 4	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		

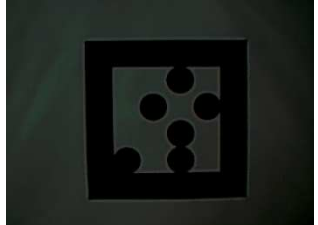
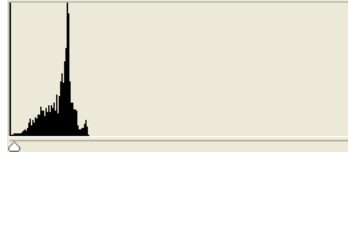
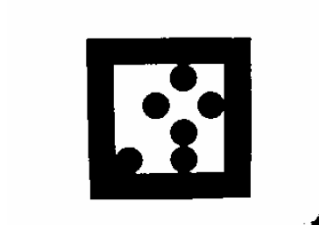
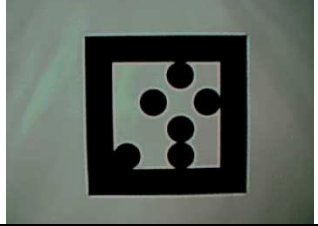
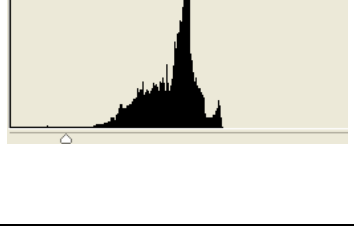
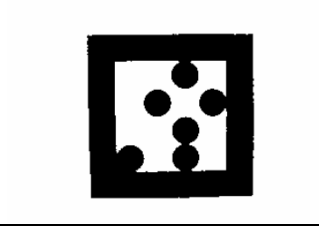
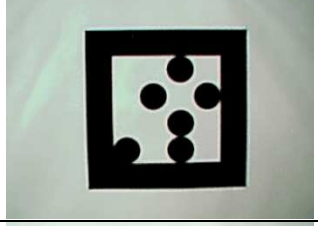
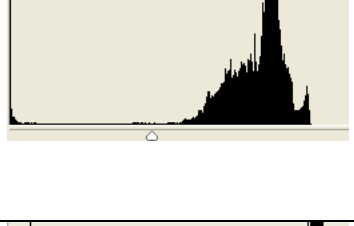
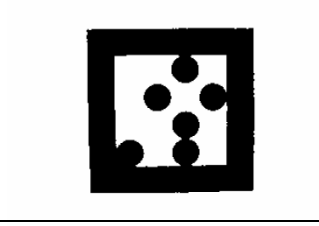
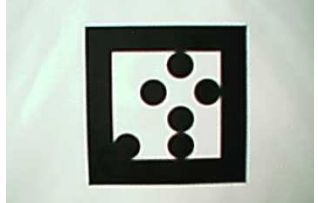
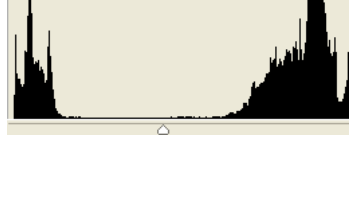
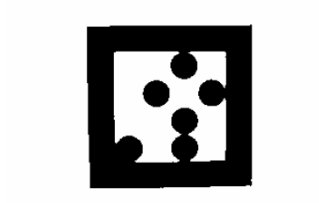
เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 5	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		


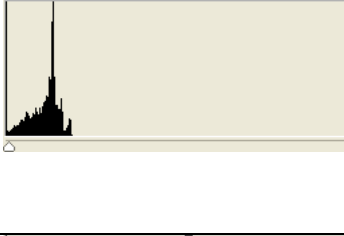
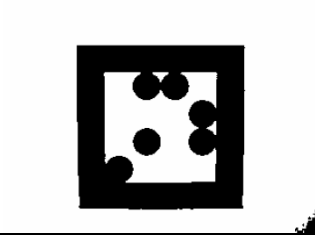
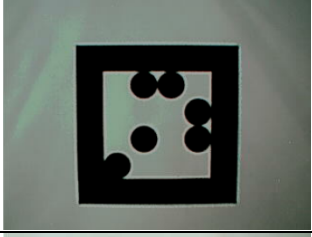
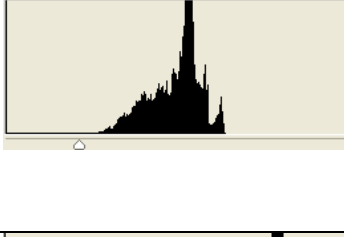
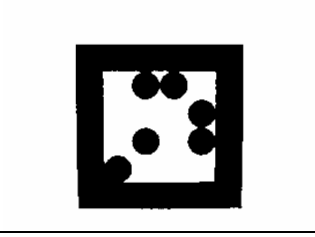
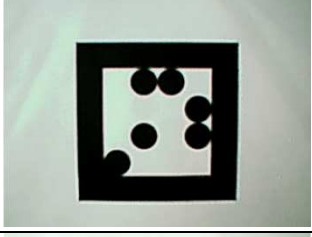
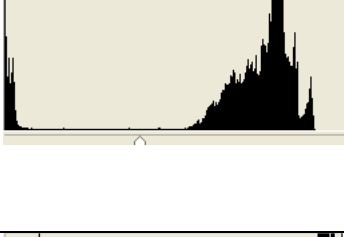
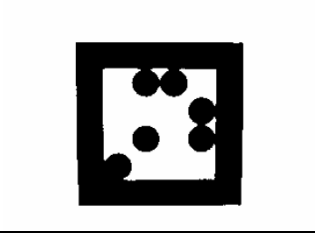
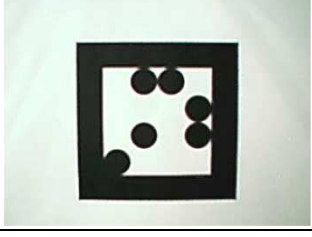
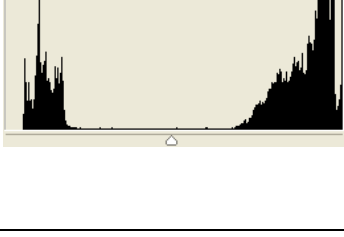
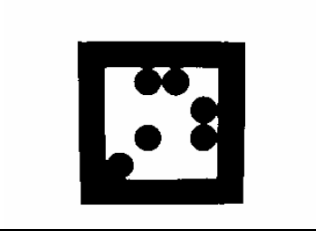
เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 6	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		

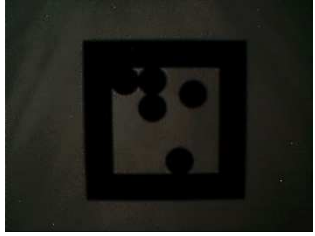
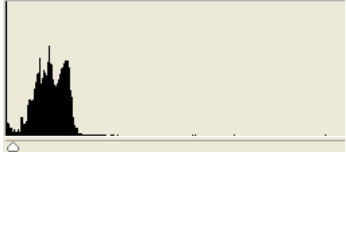

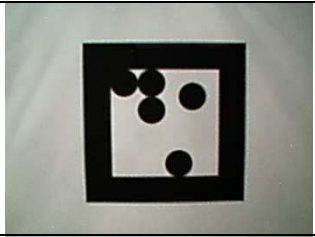
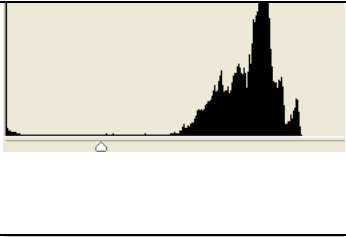
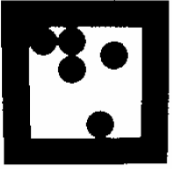
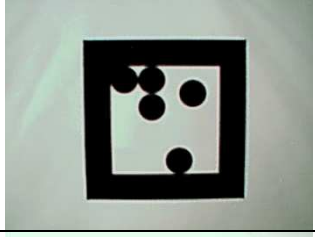
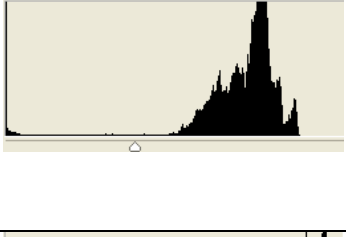
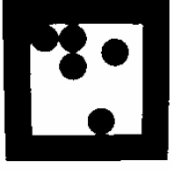
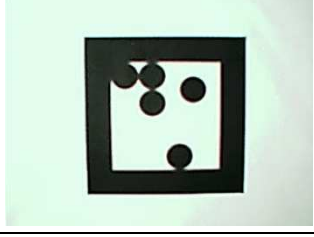
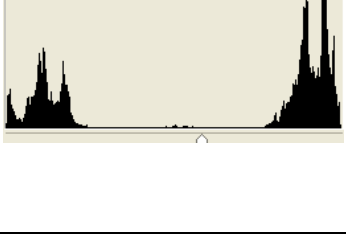
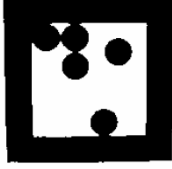
เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 7	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 8	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 9	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 10	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 11	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		

เฟรมนำเข้า ตัวอย่างเครื่องหมายที่ 12	ความ ส่อง สว่าง (ลักซ์)	ภาพฮิสโตแกรม	ผลการขีดแบ่ง
	15		
	25		
	35		
	45		

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ	นายกฤตชัย บุญศิวนนท์
วัน เดือน ปี เกิด	วันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ. 2519
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2535 มัธยมศึกษาตอนต้น แผนวิทย์-คณิต โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล พ.ศ. 2538 มัธยมศึกษาตอนปลาย แผนวิทย์-คณิต โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล พ.ศ. 2542 ปริญญาตรี วท.บ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ. 2554 ปริญญาโท วศ.ม. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำแหน่ง สถานที่ทำงาน	อาจารย์ประจำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสาน
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้	บ้านเลขที่ 93/3 ถนนร่วมจิตต์ ตำบลหมากแข้ง อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000
ผลงานวิจัย	“ผลกระทบของค่าขีดแบ่ง และความส่องสว่างที่มีต่อการติดตาม เครื่องหมายเออาร์,” 2555, วารสารปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, Vol.4, No.1, pp.1-14,
ผลงานวิชาการ	“โลกเสมือนผสมผสานสภาพแวดล้อมจริง”, 2553, วารสาร Engineering Today, Vol.8, No.94, pp.32-34 “การพัฒนาเทคโนโลยีเออาร์ สำหรับงานวิศวกรรมโยธา”, 2554, วารสารโยธาสาร, Vol.23, No.1, pp.16-23