

การพัฒนาระบบฉายภาพมุมมองสามมิติ



นาย ณฤทธิ์ บุญให้เจริญ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A STEREOSCOPIC PROJECTION SYSTEM



Mr. Narit Boonhajaroen

ศูนย์วิทยทรัพยากร

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

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University.

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาระบบฉายภาพมุมมองสามมิติ

โดย

นาย ณฤทธิ์ บุญให้เจริญ

สาขาวิชา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

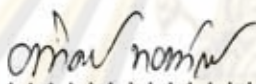
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

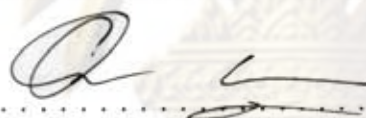
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถวิทย์ สุดแสง

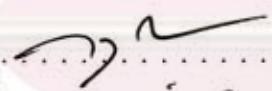
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนรินทร์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ทองทักษ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถวิทย์ สุดแสง)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ โคตรจรัส)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.วิวัฒน์ วงศ์วราวิภัทร์)

ศูนย์ทรัพยากรทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณฤทธิ์ บุญให้เจริญ : การพัฒนาระบบฉายภาพมุมมองสามมิติ (Development of A Stereoscopic Projection System). อ.ที่ปรึกษา : (ผศ.ดร.อรรถวิทย์ สุดแสง , 124 หน้า.

จอแสดงผลภาพสามมิติแบบสองตาคืออุปกรณ์แสดงผลที่สามารถฉายภาพสามมิติซึ่งผู้ชมสามารถรับรู้ความลึกและความนูนของภาพที่ปรากฏได้ ในระบบจอสามมิติระดับสูง เพื่อให้เกิดการรับชมที่สมจริงการแสดงภาพสามมิติจึงนิยมแสดงผลบนจอฉายภาพขนาดใหญ่ อีกทั้งการประยุกต์ระบบติดตามตำแหน่งศีรษะช่วยให้ระบบสามารถวาดภาพสามมิติโดยมีความสัมพันธ์กับมุมมองของผู้ชม ทว่าระบบแสดงผลสามมิติระดับสูงในปัจจุบันนั้นมีราคาที่สูงสำหรับผู้บริโภคทั่วไป เนื่องจากประกอบจากเครื่องฉายภาพและระบบติดตามตำแหน่งศีรษะซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยเฉพาะ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาเทคนิคซึ่งช่วยให้เครื่องฉายภาพโดยทั่วไปสามารถฉายภาพสามมิติร่วมกับระบบติดตามตำแหน่งศีรษะซึ่งประกอบจากอุปกรณ์ราคาถูกลงได้

โดยทั่วไปเทคนิคหนึ่งในการฉายภาพสามมิติคือการใช้ระบบแว่นชัตเตอร์ ซึ่งชัตเตอร์ทั้งสองที่ติดตั้งอยู่บนแว่นจะทำการสลับกันบดบังแสงของตาแต่ละข้างโดยมีจังหวะที่สัมพันธ์กับการปรากฏของภาพ ทำให้เห็นภาพที่ปรากฏเป็นสามมิติ ทว่าในการประยุกต์ใช้แว่นชัตเตอร์กับเครื่องฉายภาพที่มีตามท้องตลาดอาจประสบกับอุปสรรคต่างๆ ได้ เนื่องจากจังหวะการทำงานของชัตเตอร์ซึ่งใช้สัญญาณขาเข้าของเครื่องฉายภาพอาจไม่สัมพันธ์กับจังหวะการปรากฏของภาพ ซึ่งเกิดการประวิงในเครื่องฉาย ทำให้เกิดแนวคิดที่จะสร้างจังหวะควบคุมแว่นชัตเตอร์จากการปรากฏของภาพโดยตรง หลักการทำงานที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้จึงประกอบด้วยการแทรกสัญญาณสัญญาณลักษณะที่บ่งบอกข้างของดวงตาลงในสัญญาณภาพ ซึ่งจะปรากฏเป็นสัญญาณลักษณะและถูกตรวจจับได้โดยอุปกรณ์ซึ่งติดตั้งบนหน้าจอ จังหวะการปรากฏที่ตรวจจับได้จะถูกส่งไปควบคุมแว่นชัตเตอร์โดยตรงสำหรับการติดตามตำแหน่งศีรษะ การประยุกต์ใช้กล้องอินฟราเรดราคาถูกร่วมกับการฝังอุปกรณ์กำเนิดแสงอินฟราเรดไว้บนฉากฉายภาพ จะทำให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งของศีรษะหรือมุมมองของผู้ชมได้จากตำแหน่งและรูปแบบของภาพที่กล้องถ่ายได้ ระบบที่ได้นำเสนอและถูกพัฒนาขึ้นแสดงให้เห็นความสามารถในการฉายภาพสามมิติแบบสองตาที่มีความสัมพันธ์กับมุมมองของผู้ชม ด้วยต้นทุนระบบที่ต่ำกว่าระบบแสดงผลภาพสามมิติระดับสูงโดยทั่วไป

ภาควิชา . . . วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

สาขาวิชา . . . วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา . . .

2552

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

##487 06590 21 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS : VIRTUAL REALITY / CAVE / HEAD TRACKER / KALMAN FILTER /
SENSOR FUSION

NARIT BOONHAIJAROEN : Development of A Stereoscopic Projection System. ADVISOR : ASST. PROF. ATTAWITH SUDSANG , 124 pp.

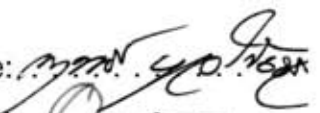
A stereoscopic display is a device that allows its viewer to perceive depth from the displayed image. To enhance viewing experience, a high-end stereoscopic display often relies on a projection system to create large display area, and a head tracking device to provide the current viewing position and direction so that the displayed image can be rendered accordingly. At present, such high-end systems are extremely expensive due to the high price of proprietary projectors and head trackers. The objective of this thesis is to present a new technique that enables off-the-shelf projectors to be used for stereoscopic projection, together with a head tracking system constructed from low-cost components.

A popular means for creating stereoscopic effect is to use active LCD shutter glasses. Shutter glasses can be controlled to alternately block each eye so that the two eyes are exposed to different images. Unfortunately, directly using shutter glasses with an ordinary projector normally fails to give the stereoscopic effect because the shutter timing which is derived from the video input of the projector is not properly synchronized with the displayed image that is subject to unpredictable delay of the projector. Our solution is to bypass this delay. The proposed technique inserts a small marker in the video input to indicate which eye the image is intended for. An optical detector attached to the projector screen then detects this marker and sends the output to control the shutter glasses. For head tracking, a low-cost infrared camera is attached to the shutter glasses and infrared beacons are placed throughout the projector screen. The observed infrared pattern obtained by the camera is matched with the beacon locations to compute the viewing position and direction. The proposed stereoscopic projection system is constructed. Preliminary test results show that the system is capable of stereoscopic projection with correct head tracking information at a fraction of the price of a high-end system.

Department: . . Computer Engineering

Field of Study: Computer Engineering

Academic Year: 2009

Student's Signature: 

Advisor's Signature: 

กิตติกรรมประกาศ

อันความสำเร็จของงานวิจัยชิ้นนี้คงจะเกิดไม่ได้หากปราศจากการจุดประกายของ อ.ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อรรณวิทย์ สุธแสง อีกทั้งความท้อทายทางวิศวกรรมต่างๆที่ประสบในงานวิจัยนี้ ก็ไม่สามารถผ่านพ้นได้ด้วยดีหากปราศจากความช่วยเหลือของพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาฯ ขอขอบคุณพี่แด่สำหรับคำแนะนำต่างๆ พี่พีมสำหรับความรู้และทฤษฎีเชิงลึกทางด้านคณิตศาสตร์และ Photogrammetry ขอขอบคุณอันสำหรับความเข้าใจในระบบพิกัดต่างๆ ขอขอบคุณ โต้ด หนึ่ง ใจ พี่ใหม่ พี่ปอก และที่ขาดไม่ได้คือพี่ฟูสำหรับบรรยากาศอันอบอุ่นในแลป ISL2 รวมทั้งทุกๆ ท่านที่อาจไม่ได้กล่าวมาในที่นี้

สุดท้ายที่สำคัญที่สุดคือการสนับสนุนจาก คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้โอกาสผมได้เรียนปริญญาโท ทั้งเพื่อวิชาความรู้และเวลาสำหรับการพักผ่อนมองชีวิต ตลอดงานวิจัยที่ผ่านมาแม้ว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ แต่ก็คงจะเป็นเพียงส่วนหนึ่งของประสบการณ์และสิ่งดีๆ ที่เกิดขึ้นตลอดการทำวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	13
1.3 เป้าหมายและขอบเขตของการพัฒนา	13
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	13
2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	14
2.1 พื้นฐานของระบบฉายภาพสามมิติ	14
2.1.1 เทคนิคแว่นสองสีสามมิติแอนะกลีฟ (Two-color Anaglyph Glasses)	17
2.1.2 เทคโนโลยี ChromaDepth	18
2.1.3 เทคนิคการใช้แผ่นกรองโพลาไรส์ (Polarizing Glasses)	20
2.1.4 เทคโนโลยี LCD	21
2.1.5 เทคนิคการใช้แว่นชัตเตอร์ (Shutter Glasses)	22
2.1.6 เทคโนโลยี DMD (Digital Micromirror Device)	26
2.2 ระบบ CAVE	28
2.3 งานวิจัยและการพัฒนาของระบบติดตามตำแหน่ง	28
2.3.1 ระบบติดตามตำแหน่ง Tracker System	28
2.3.2 ระบบติดตามตำแหน่งเชิงกล	32
2.3.3 ระบบติดตามตำแหน่งโดยคลื่นเสียงความถี่สูง	33
2.3.4 ระบบการติดตามตำแหน่งโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	34
2.3.5 ระบบระบุตำแหน่งโดยใช้แสง	36
2.3.6 ระบบการติดตามตำแหน่งรูปแบบอื่นๆ	40
3 แนวคิดและการออกแบบ	41
3.1 ระบบประสานจังหวะการทำงานของแว่นชัตเตอร์	42
3.2 ระบบติดตามและระบุตำแหน่งศีรษะของผู้ชม	43
4 การพัฒนาระบบประสานจังหวะการทำงานของแว่นชัตเตอร์	44
4.1 อุปกรณ์แทรกสัญลักษณ์ (Marker Insertion Box)	44
4.1.1 การทำงาน	44
4.1.2 วงจรดิจิทัล	45
4.1.3 วงจรแอนะล็อก	48

บทที่	หน้า
4.2	50
4.2.1	50
4.2.2	50
4.2.3	52
4.2.4	53
4.2.5	54
4.3	55
4.3.1	57
4.3.2	58
4.3.3	59
5	60
5.1	60
5.1.1	60
5.1.2	61
5.1.3	61
5.2	63
5.3	64
5.3.1	64
5.3.2	66
5.3.3	66
5.3.4	66
5.3.5	72
5.3.6	73
5.4	77
5.4.1	77
6	79
6.1	79
6.2	81
6.3	82
6.4	83
7	84
7.1	84
7.2	86
8	89
8.1	89
8.1.1	89
8.1.2	90

	หน้า
8.1.3 อภิปรายผล	91
8.2 การทดสอบวัดความแม่นยำของอุปกรณ์ระบุตำแหน่ง	91
8.2.1 การทดสอบเชิงสถิติ	91
8.2.2 การทดสอบเชิงพลวัต	94
8.2.3 อภิปรายผล	95
8.3 สรุปผล	95
รายการอ้างอิง	96
ภาคผนวก	100
ภาคผนวก ก วงจรที่ได้รับการพัฒนา	101
ก.1 วงจรแทรกสัญญาณสัญญาณ	101
ก.2 วงจรตรวจจับสัญญาณ	102
ก.3 วงจรควบคุมแวน	103
ภาคผนวก ข การวาดภาพสามมิติและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	104
ข.1 เรขาคณิตของการฉายภาพสามมิติ (Projective Geometry)	104
ข.2 การแปลงพิกัด (Transformation)	106
ข.3 สมการของ Rodrigues	107
ข.4 ระบบมือซ้ายและระบบมือขวา	108
ข.5 OpenGL	108
ข.6 ขั้นตอนการทำงานของ OpenGL	108
ข.7 ระบบเมทริกซ์ใน OpenGL	109
ข.8 การคำนวณ Frustum	110
ข.9 Frustum	111
ภาคผนวก ค ฮาร์ดแวร์	112
ค.0.1 อุปกรณ์ CPLD และการใช้งาน	112
ค.1 ภาษา Verilog	113
ค.2 I ² C บัส	114
ภาคผนวก ง งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	116
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	124

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 เปรียบเทียบระบบติดตามและระบุตำแหน่งรูปแบบต่างๆ	31
2.2 ผลกระทบจากระบบติดตามตำแหน่งชั่วคราว	32
2.3 เปรียบเทียบระบบติดตามตำแหน่งด้วยสนามแม่เหล็ก	35
4.1 ความสามารถในการขับโหลดของวงจรรวม MAX3238	58
4.2 คำสั่งในการปรับแก้พารามิเตอร์ควบคุมแวนซ์เตอร์	59
8.1 ผลการทดสอบเชิงสถิติ	92



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 Xerox Alto PC	1
1.2 การใช้งานระบบจอแสดงผลสามมิติในงานทางด้านวิศวกรรม	2
1.3 การใช้งานระบบจอแสดงผลสามมิติในงานทางด้านการศึกษา	3
1.4 การใช้งานระบบจอแสดงผลสามมิติในงานทางด้านการแพทย์	4
1.5 เกมส์สามมิติ	5
1.6 Wheatstone's stereoscope	6
1.7 Heilig's Sensorama	7
1.8 The Ultimate Display	8
1.9 ระบบ CAVE	8
1.10 ระบบแสดงผลสามมิติแบบหลายบุคคล	9
1.11 ระบบ Shutter Glasses	10
1.12 ระบบติดตามตำแหน่งศีรษะที่ใช้ในงาน The Ultimate Display	11
(ก) ระบบติดตามตำแหน่งศีรษะแบบแบบกลไกจักรกล	11
(ข) ระบบติดตามตำแหน่งศีรษะแบบคลื่นเสียงความถี่สูง	11
1.13 เครื่องควบคุมระยะไกล Wiimote	12
2.1 โบสถ์ Basilica of Santo Spirito	14
2.2 Perspective study for the Adoration of the Magi	15
2.3 หลักการฉายภาพสามมิติแบบสองตา	15
2.4 กล้องทัศนมิติของ Chales Wheatstone	16
2.5 กล้องมองภาพสามมิติของ Holmes	16
2.6 แวนสองสีสามมิติแอนะกลีฟ	17
2.7 ภาพสามมิติแอนะกลีฟ	17
2.8 เทคโนโลยี ChromaDepth	18
2.9 ตัวอย่างรูปภาพและการประยุกต์ของเทคโนโลยี ChromaDepth	19
2.10 เทคนิคการใช้แผ่นกรองโพลาไรส์	20
(ก) การติดตั้งแผ่นกรองโพลาไรส์สำหรับเครื่องฉายภาพ	20
(ข) แวนโพลาไรส์	20
2.11 หลักการทำงานของระบบฉายภาพสามมิติแบบใช้แผ่นกรองโพลาไรส์	20
2.12 เทคนิคการใช้แผ่นกรองโพลาไรส์	21
2.13 หลักการทำงานของ LCD	22
2.14 แวนซีตเตอร์	23
2.15 หลักการทำงานของแวนซีตเตอร์	23
2.16 ความผิดเพี้ยน Keystone ที่เกิดในการฉายภาพสามมิติแบบสองตา	24
2.17 เรขาคณิตของการวาดภาพของตาแต่ละข้าง	25
2.18 การเพิ่มช่วงเวลาที 3 ในการประวิงการปิดเปิดของแวน	26
2.19 เทคโนโลยี DMD	27

ภาพประกอบ	หน้า
2.20 วัสดุจากเครื่องฉายภาพ DMD	27
2.21 ระบบ CAVE	28
2.22 ระบบระบุตำแหน่งเชิงกล	32
(ก) The Ultimate Display	32
(ข) Fish Tank VR	32
2.23 โครงข่ายระบบตัวรับเสียงความถี่สูง	33
2.24 โครงข่ายระบบตัวรับเสียงความถี่สูงแบบไร้ตัวประสานจังหวะ	34
2.25 อุปกรณ์ติดตามตำแหน่งด้วยสนามแม่เหล็กของบริษัท Biosense Catheter และ NDI Aurora	34
2.26 ระบบ Motion Capture ที่ใช้มาร์คเกอร์อินฟราเรด	37
2.27 ระบบติดตามตำแหน่งโดยใช้มาร์คเกอร์สามจุด	37
2.28 ระบบติดตามตำแหน่งโดยการหาจุดตัดของลำเลเซอร์	38
2.29 หลักการทำงานของระบบติดตามตำแหน่งโดยการควบคุมการปิดเปิดของ LED	38
2.30 ไดโอดไวแสงแบบหลายหน่วย	39
2.31 ระบบระบุตำแหน่งเชิงแสงโดยการติดตั้งกล้องบนศีรษะ	39
2.32 ระบบถ่ายภาพสามมิติ SwissRanger TM	40
3.1 ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	41
3.2 แสดงการเปรียบเทียบระบบโดยทั่วไปกับระบบที่นำเสนอ	43
(ก) ระบบโดยทั่วไป	43
(ข) ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	43
3.3 แนวคิดระบบติดตามตำแหน่งศีรษะของผู้ชม	43
4.1 อุปกรณ์แทรกสัญญาณ	44
4.2 แผนภูมิการทำงานของอุปกรณ์แทรกสัญญาณภาพ	45
4.3 วงจรทางแอนะล็อกของอุปกรณ์แทรกสัญญาณภาพ	48
4.4 วงจรสลับสายแบบแอนะล็อก MAX4028	49
4.5 วงจรทางแอนะล็อกของอุปกรณ์ตรวจจับแสง	50
4.6 การรบกวนของแสงภายนอก	51
4.7 ผลการตอบสนองต่อแสง (I_{cvsE_e}) ของทรานซิสเตอร์ไวแสง PT67-21C	51
4.8 วงจรการประยุกต์ใช้งานโฟโตทรานซิสเตอร์	52
4.9 เปรียบเทียบการกระจายแสงของ TSAL7400 และ TSAL6200	53
(ก) การกระจายแสงของ TSAL7400	53
(ข) การกระจายแสงของ TSAL6200	53
4.10 ขอบเขตการทำงานของ TSAL7400	54
4.11 สัญญาณขาออกของภาคขับ LED	54
4.12 รหัสที่ใช้ในการควบคุมแวน	54
4.13 วงจรตัวควบคุมแวน	55

ภาพประกอบ	หน้า
4.14 การถอดรหัสอินฟราเรด	56
4.15 การเพิ่มช่วงเวลาที 3 ในการประวิงการปิดเปิดของแวน	57
4.16 โมดูล Zigbee	59
5.1 Wiimote	60
5.2 ขั้นตอนการหาพิกัดของศีรษะ	64
5.3 ตารางค่าระยะเวลาของการส่องสว่างโดยเฉลี่ย	65
5.4 การหาตำแหน่งจากการมองเห็นจุด 2 จุด	67
5.5 การหาตำแหน่งจากการมองเห็นจุด 2 จุด	68
5.6 การประมาณค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกลองจากจุด 3 จุด	70
5.7 การคำนวณค่า Frustum	78
6.1 แวนซ์ตัดเตอร์ (มุมบน)	79
6.2 แวนซ์ตัดเตอร์	80
6.3 สัญญาณจากวงจรถับแวนซ์ตัดเตอร์	80
6.4 อุปกรณ์แทรกสัญญาณ	81
6.5 สัญญาณที่ปรากฏบนหน้าจอ	81
6.6 ตัวตรวจจับการปรากฏของสัญญาณบนฉากรับภาพ	82
6.7 การตรวจจับสัญญาณของ ODD ที่ความถี่ 50Hz	83
6.8 สัญญาณอินฟราเรดจาก ODD 40Hz	83
6.9 ระบบโดยรวม	83
7.1 แผนเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกลอง	84
7.2 ขั้นตอนการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของกลอง	85
7.3 ผลลัพธ์ของการหามุมของตารางหมากรุก	85
7.4 ภาพจากกลองดิจิทัล	87
7.5 การวางตัวของแผนเปรียบเทียบค่า	88
8.1 ผลการทดลองวัดค่าจากตัวกรอง Kalman (X, Y, Z)	90
8.2 การทดลอง	91
8.3 ผลการทดสอบเชิงสถิติในสามมิติ	92
8.4 ผลการทดสอบเชิงสถิติ	93
8.5 ผลการทดสอบเชิงพลวัต	94
ข.1 เรขาคณิตของการฉายภาพสามมิติ	104
ข.2 พิกัดตามกฎมือขวาและกฎมือซ้าย	108
ข.3 การทำงานของ OpenGL	108
ข.4 ตัวอย่างระบบโลกเสมือนจริงแบบ Fish Tank VR	110
ข.5 การผิดเพี้ยนของภาพจากมุมมอง	110
ค.1 โครงสร้างภายใน CPLD	112
ค.2 โครงสร้างภายใน Function Block	112

ภาพประกอบ	หน้า
ค.3 โครงสร้างภายใน Macro Cell	113
ค.4 ขั้นตอนการแปลโปรแกรมภาษา Verilog	113
ค.5 ลักษณะการการเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบ I ² C บัส	114
ค.6 สถานะของ I ² C บัส	115



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

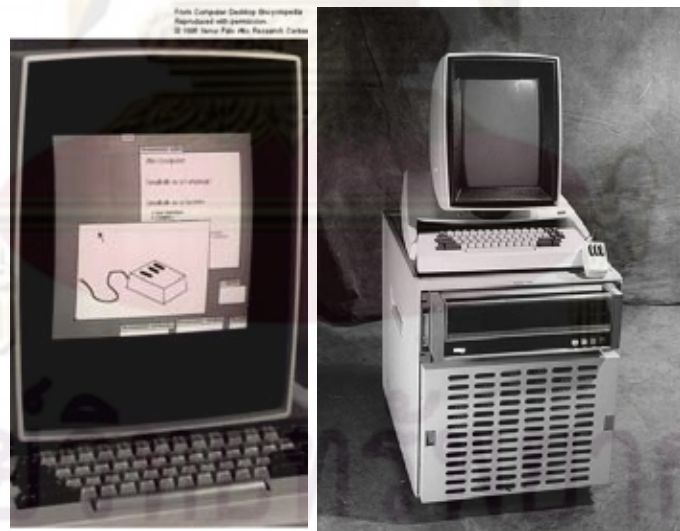
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ที่ขาดไม่ได้สำหรับโลกยุคปัจจุบัน ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย ทั้งทางด้านวิศวกรรม การแพทย์ การศึกษาและความบันเทิง โดยทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สื่อสารในการติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้ (user interface) จึงกล่าวได้ว่าความสามารถในการสื่อสารหรือแสดงผลข้อมูลต่างๆ ให้ผู้ใช้รับรู้ ทำความเข้าใจได้ง่ายและถูกต้อง นั้นเป็นคุณสมบัติสำคัญของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยระบบการติดต่อกับผู้ใช้เป็นหัวข้อสำคัญหัวข้อหนึ่งที่มีความสนใจในงานวิจัยและการพัฒนาในสาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน

จอแสดงผลหรือระบบแสดงผล จัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์สำคัญในเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งทำหน้าที่สำคัญในการแสดงผลข้อมูลหรือสิ่งบันเทิงต่างๆ ดังนั้นจอแสดงผลจึงเป็นอุปกรณ์ที่ส่งผลอย่างมากต่อความสามารถในการสื่อสารหรือแสดงผลให้กับผู้ใช้ แต่เดิมรูปแบบของจอแสดงผลได้รับการพัฒนาจากกลุ่มของหลอดไฟในเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลในยุคแรก มาเป็นระบบแสดงผลแบบกราฟิกเช่นในเครื่อง Xerox Alto personal computer ในช่วงปี 1973 ดังแสดงในรูป 1.1 จากการพัฒนาอย่างรวดเร็วทำให้จอแสดงผล จากในยุคเริ่มแรกที่เป็นขาว-ดำ ได้รับการพัฒนาจนเป็นจอสีที่มีความละเอียดสูง สามารถแสดงผลได้มีสีสันที่สมจริงและมีความคมชัดสูง



รูปที่ 1.1: Xerox Alto PC

ที่มา <http://www.mac-history.net/tag/steve-jobs>

ทว่าจอแสดงผลที่ได้รับการพัฒนานั้นเป็นระบบแสดงผลแบบสองมิติ ที่สามารถนำเสนอรูปภาพสองมิติ ที่มีเพียงมิติของความกว้างและยาว ขาดมิติของความลึก ภาพที่เห็นมีลักษณะแบนราบ ทำให้เกิดความพยายามผนวกเอาเทคโนโลยีการฉายภาพสามมิติเข้ามารวม จึงทำให้เกิดการพัฒนาาระบบแสดงผลที่สามารถแสดงผลภาพสามมิติขึ้น

ระบบแสดงผลสามมิติถูกใช้ในงานต่างๆ ยกตัวอย่างเช่นงานทางด้านวิศวกรรม โดยทั่วไป การจำลองทางวิศวกรรมต่างๆ เช่นงานด้าน CAD/CAM นั้น ข้อมูลที่ต้องการแสดงผลมักมีความซับซ้อน เป็นข้อมูลหลายมิติ โดยตัวอย่างงานการจำลองการประกอบเครื่องจักรเช่นในงานวิจัย [1] หรือแสดงในรูป 1.2 จะสามารถเห็นถึงรูปแบบชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่เป็นชิ้นส่วนสามมิติ อีกทั้งเครื่องจักรในปัจจุบันประกอบด้วยชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนสูง ดังนั้นในการวางแผนงานการประกอบจำเป็นจะต้องวางแผนอย่างรัดกุม เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานนั้นสามารถทำงานได้อย่างสะดวก และลดความผิดพลาดต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้การจำลองการประกอบทำได้สมจริงที่สุด จากสาเหตุที่ชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรนั้นเป็นวัตถุสามมิติ ดังนั้นระบบแสดงผลที่ใช้จึงจำเป็นต้องเป็นระบบแสดงผลแบบสามมิติ



รูปที่ 1.2: การใช้งานระบบจอแสดงผลสามมิติในงานทางด้านวิศวกรรม
ที่มา Land Rover's Gaydon engineering centre

งานทางด้านการศึกษา ดังรูป 1.3 ในการศึกษาเพื่อทำความเข้าใจในองค์ความรู้ต่างๆ เช่น คณิตศาสตร์ ฟิสิกส์หรือทางด้านประวัติศาสตร์นั้น การจำลองวัตถุหรือสิ่งของต่างๆ ทั้งโมเดลทางคณิตศาสตร์ การเคลื่อนที่ทางด้านฟิสิกส์ หรือมหานครในอดีตนั้น จอแสดงผลสามมิติจะสามารถช่วยให้ผู้เรียนสามารถเข้าถึงองค์ความรู้ต่างๆ ได้อย่างลึกซึ้งกว่าระบบแสดงผลภาพสองมิติโดยทั่วไป



รูปที่ 1.3: การใช้งานระบบจอแสดงผลสามมิติในงานทางด้านการศึกษา
ที่มา <http://www.evl.uic.edu/aej/mvl/mvl.html>

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานทางด้านการศึกษา ดังรูป 1.4 การผ่าตัดทางไกลก็จัดเป็นหัวข้อหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ เนื่องจากความจำเป็นในการให้บริการทางด้านสาธารณสุขในพื้นที่ห่างไกลหรือพื้นที่อันตราย แต่เนื่องจากปริมาณบุคลากรทางการแพทย์นั้นมีจำกัด ดังนั้นการผ่าตัดทางไกลที่อาศัยโครงข่ายการติดต่อสื่อสารจึงสามารถเข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แต่ทว่าในการที่หมอบนจอจะสามารถทำงานได้นั้น จำเป็นที่จะต้องสามารถรับรู้สิ่งต่างๆ เหมือนกับตนอยู่ในพื้นที่นั้นจริง ดังนั้นระบบแสดงผลสามมิติจึงเป็นระบบที่มีความสำคัญในระบบการผ่าตัดทางไกล เนื่องจากจะช่วยจำลองสิ่งต่างๆ ให้หมอบนจอสามารถรับรู้ข้อมูลต่างๆ ได้ถูกต้องสมจริง สามารถทำการตัดสินใจในการรักษาได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 1.4: การใช้งานระบบจอแสดงผลสามมิติในงานทางด้านการศึกษา
ที่มา <http://zoisci.wordpress.com/2007/07/05/4d-visualization-of-human-body/>

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เกมส์คอมพิวเตอร์ สื่อบันเทิงในยุคปัจจุบันที่ได้รับความนิยมอย่างมาก และเมื่อกล่าวถึงเกมส์สามมิติ ก็จัดได้ว่าเป็นเกมส์ที่ได้รับความนิยม ทั้งทางด้านรูปแบบ first person เกมส์แข่งรถ หรือเกมส์วางแผนการรบ แต่ทว่าเมื่อใช้กับจอแสดงผลโดยทั่วไปที่เป็นสองมิติ ที่มีแต่มิติที่แบนราบ ผู้เล่นอาจได้รับประสบการณ์ไม่เต็มที่ จำเป็นต้องใช้จอแสดงผลสามมิติ ดังในรูป 1.5 จอแสดงผลสามมิติจึงเป็นอุปกรณ์แสดงผลหนึ่งที่สามารถเพิ่มความตื่นตา เพิ่มความสมจริง เพิ่มอรรถรสและสร้างประสบการณ์เสมือนจริงให้กับผู้เล่นได้เป็นอย่างมาก



รูปที่ 1.5: เกมส์สามมิติ

จากความต้องการ ระบบแสดงผลที่สามารถแสดงผลได้อย่างสมจริง มีมิติของความลึก ทำให้เกิดการพัฒนาระบบแสดงผลภาพสามมิติขึ้น เทคโนโลยีการฉายภาพสามมิตินั้นมีประวัติในการพัฒนามายาวนาน ศิลปินในยุคฟื้นฟูศิลปวิทยา (renaissance) ได้ตระหนักถึงข้อจำกัดของภาพเขียนที่แบนราบซึ่งจำเป็นต้องใช้ภาพมากกว่าหนึ่งภาพในการแสดงให้เห็นมิติในเชิงลึกและความแตกต่างกันของภาพที่เห็นในมุมมองต่างๆ ปัญหาดังกล่าวก็ยังสามารถพบในจอแสดงผลแบบสองมิติที่มีโดยทั่วไปในปัจจุบัน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในปี 1838 โดย Charles Wheatstone [2] ได้ทำการพัฒนาระบบมองภาพสามมิติ สำหรับการมองภาพถ่ายสามมิติดังแสดงในรูป 1.6 โดยอาศัยหลักการการลวงตาจากความแตกต่างของภาพที่ดวงตาแต่ละข้างเห็น การรับรู้เชิงสามมิตินั้นจำเป็นต้องอาศัยการมองเห็นผ่านดวงตาสองข้าง (binocular vision) ซึ่งมีตำแหน่งต่างกันเล็กน้อย ก่อให้เกิดมุมมองที่แตกต่างกันของดวงตาแต่ละข้าง [3] ภาพที่มองเห็นจะปรากฏเป็น disparity image และจะถูกสมองจะนำไปตีความโดยอาศัยความแตกต่างของระยะห่างของวัตถุที่ปรากฏภาพจากตาซ้ายและตาขวา นำไปประมาณเป็นความลึกโดยการเปรียบเทียบกับระยะห่างของวัตถุชิ้นอื่น ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างและความลึกสามารถอาศัยการอธิบายได้โดยการวิเคราะห์ทางเรขาคณิต



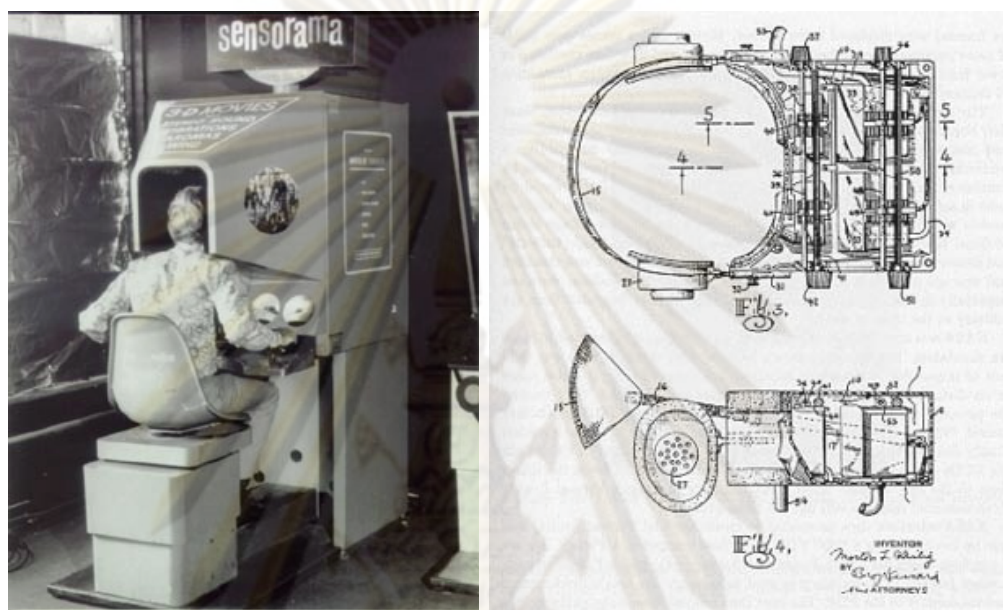
ที่มา <http://www.evl.uic.edu/aej/mvl/mvl.html>



ที่มา <http://courses.ncssm.edu/gallery/collections/toys/html/exhibit01.htm>

รูปที่ 1.6: Wheatstone's stereoscope [2]

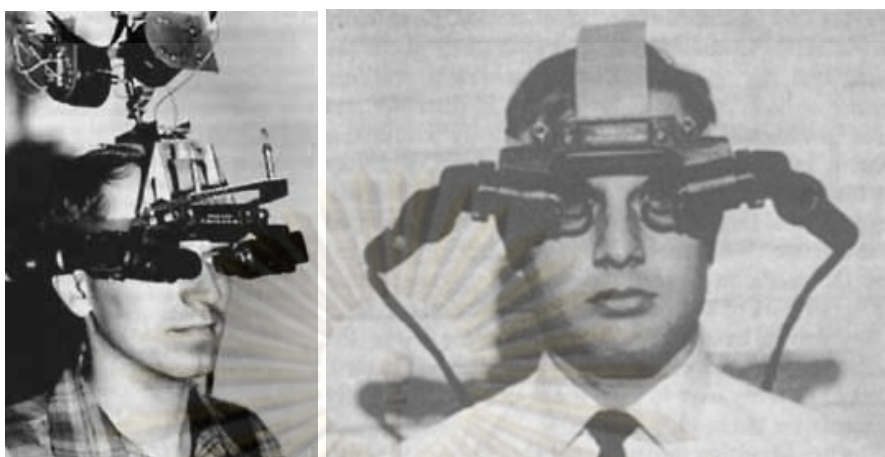
จากหลักการดังกล่าว ทำให้เกิดการพัฒนาระบบฉายภาพสามมิติแบบภาพต่อเนื่องขึ้น โดย Morton Heilig ดังแสดงในรูป 1.7 ระบบ Sensorama ซึ่งได้รับการจดสิทธิบัตรในปี 1960 [4] โดยภายในเครื่องประกอบด้วยเครื่องฉายภาพต่อเนื่องซึ่งจะทำการฉายภาพผ่านทางอุปกรณ์เชิงแสงที่ช่วยเพิ่มมุมมองของผู้ชม อีกทั้งยังมีการจำลองการรับรู้รูปแบบอื่น ๆ อีกเช่นเสียง การสั่นสะเทือน ลมพัด และกลิ่น โดยสามารถรองรับผู้ชมได้เพียงคนเดียวในการฉายแต่ละครั้ง



ที่มา <http://www.artmuseum.net/w2vr/timeline/Heilig.html>

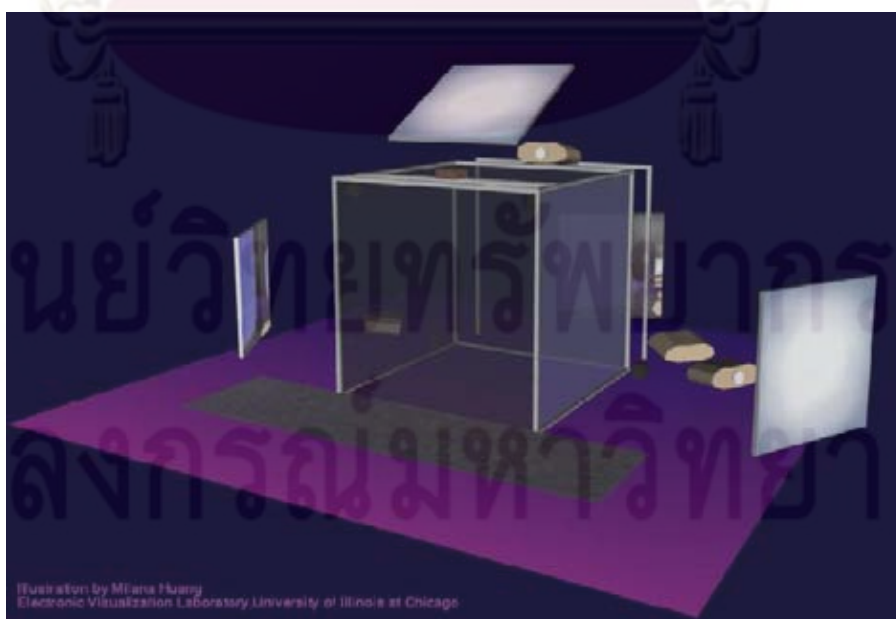
รูปที่ 1.7: Heilig's Sensorama

หลักการเดียวกันนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ และได้รับการพัฒนาเป็นระบบการแสดงผลสามมิติ จึงกำเนิดระบบแสดงผลสามมิติ The Ultimate Display โดย Ivan Sutherland ในปี 1968 [5] ระบบดังกล่าวมีลักษณะเป็นจอแสดงผลแบบติดหมวกหรือ HMD (Head-Mounted Display) ร่วมกับระบบติดตามตำแหน่งศีรษะแบบกลไกจักรกล (mechanical linkage head tracker) ดังแสดงในรูป 1.8 จากระบบนี้ทำให้เกิดคำว่าโลกความจริงเสมือนหรือ "Virtual Reality" โดยเริ่มแรกนั้นระบบโลกความจริงเสมือน ที่ได้รับการพัฒนาในยุคแรกประสบปัญหาเรื่องความละเอียดที่ต่ำและความคล่องตัวในการใช้งาน เนื่องจากจอแสดงผลความละเอียดสูงและมีขนาดเล็กยังไม่ได้ถูกพัฒนา ในปัจจุบันแม้ว่าเทคโนโลยีอุปกรณ์แสดงผลจะได้รับการพัฒนาอย่างมาก แต่อุปกรณ์แสดงผลที่มีความละเอียดสูงและมีขนาดเล็กพอที่จะติดตั้งบนหมวกก็ยังมีราคาที่สูง ทำให้เกิดเป็นข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานระบบแสดงผลแบบ HMD



รูปที่ 1.8: The Ultimate Display ของ Ivan Sutherland ในงานวิจัย [5]
ที่มา <http://design.osu.edu/carlson/history/lesson17.html>

ระบบแสดงผลอีกรูปแบบหนึ่งคือระบบการแสดงผลแบบ CAVE ซึ่งเป็นเสมือนถ้ำขนาดใหญ่ ที่ให้ผู้ที่เข้าไปภายในได้รู้สึกเสมือนกับตัวเองอยู่ในอีกโลกหนึ่ง เสมือนกับได้อยู่ในที่นั้นจริงๆ ระบบ CAVE ระบบแรกเป็นผลงานวิจัยจากห้องวิจัย Electronic Visualization Laboratory ณ University of Illinois at Chicago โดย Thomas A. DeFanti, Daniel J. Sandin, and Carolina CruzNeira [6] และถูกนำเสนอในงาน SIGGRAPH. 1992 ดังรูป 1.9 ระบบ CAVE ประกอบด้วยฉากฉายภาพ จำนวน 3 ชุด ซึ่งมีขนาด 7x7x7 ฟุต และใช้ระบบติดตามตำแหน่งศีรษะแบบใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ร่วมกับระบบแว่นชดเชย ซึ่งทำหน้าที่แปลงให้ภาพสองมิติที่ปรากฏบนผนังให้ปรากฏเป็นภาพสามมิติ โดยเทคนิคแว่นชดเชยเป็นเทคนิคหนึ่งที่มีความนิยม เนื่องจากมีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับระบบแสดงผลสามมิติรูปแบบอื่นๆ

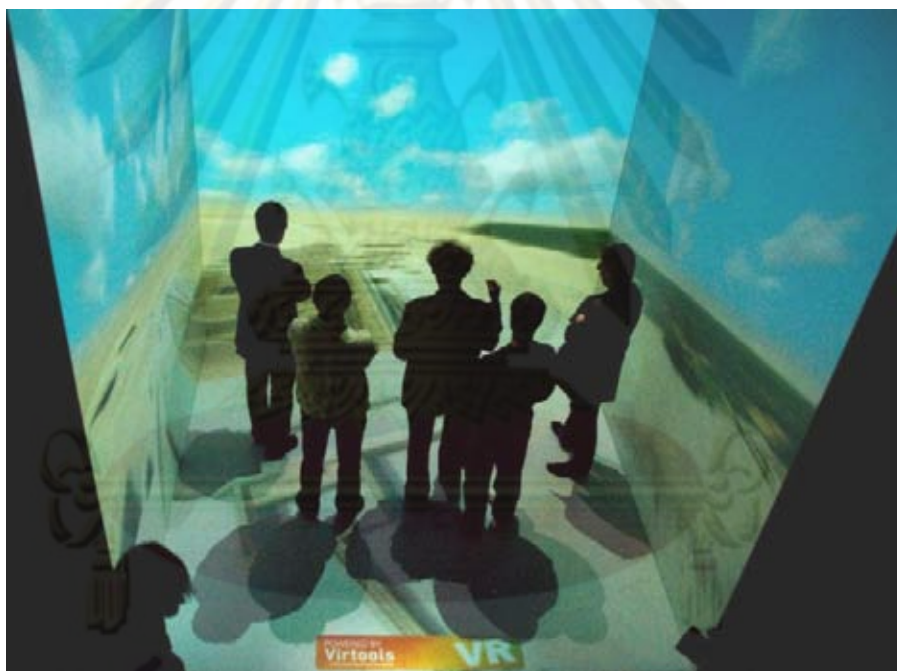


รูปที่ 1.9: ระบบ CAVE [6]

<http://www.evl.uic.edu/pape/CAVE>

ระบบการแสดงผลสามมิติโดยเทคนิคแว่นชัตเตอร์ดังปรากฏในงานวิจัย [7] จะอาศัยการปรากฏภาพของตาซ้ายและขวาสลับกันบนฉากรับภาพ ชัตเตอร์จะถูกติดตั้งบนแว่น ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด-ปิด ของแสงที่ส่องจากหน้าจอ ทำให้ภาพที่ปรากฏบนหน้าจอส่องมายังตาซ้ายและขวาตรงตามจังหวะของการปรากฏภาพบนหน้าจอ ผู้ใช้จึงเห็นภาพที่ปรากฏบนตาแต่ละข้างแตกต่างกัน เกิดเป็นปรากฏการณ์ความคลาดต่างมุมมองในแนวนอน (horizontal parallax) ทำให้ภาพที่เห็นปรากฏความลึกขึ้น เกิดเป็นภาพที่มีมิติเชิงปริมาตร

จากการที่ระบบชัตเตอร์ใช้การตัดต่อภาพที่ถูกฉายไปยังฉากรับภาพในดวงตา ทำให้ระบบชัตเตอร์สามารถแสดงผลได้มีความละเอียดที่สูงกว่าและมีขนาดของอุปกรณ์สวมศีรษะที่เล็กกว่าระบบอื่นๆ อีกทั้งการใช้ระบบชัตเตอร์รวมกับการฉายภาพแบบ immersive นั้น ผู้ชมสามารถเข้าชมระบบได้พร้อมกันทีละหลายคน [8, 9] ดังรูป 1.10 โดยยังสามารถมีปฏิสัมพันธ์กับผู้ชมท่านอื่นได้ในพร้อมกัน เสมือนกับการได้ร่วมกันเข้าไปอยู่ในโลกเสมือนนั้นจริงๆ แตกต่างกับการใช้ระบบฉายภาพแบบ HMD ที่ผู้ชมจะไม่เห็นผู้ชมคนอื่น ทำให้ขาดการปฏิสัมพันธ์ในการทำงานไป



รูปที่ 1.10: ระบบแสดงผลสามมิติแบบหลายบุคคล

<http://cb.nowan.net/blog/tag/reference/>

ในปัจจุบันการแสดงผลสามมิติได้รับการพัฒนาอย่างมาก มีราคาถูกลงและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างระบบแสดงผลสามมิติกับระบบ shutter glasses ได้ดังแสดงในรูป 1.11 โดยรวมกับอุปกรณ์แสดงผลแบบ CRT แต่ระบบแสดงผลแบบ CRT นั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่การแสดงผลที่มีขนาดเล็ก ไม่สามารถนำมาประยุกต์สร้างระบบแสดงผลขนาดใหญ่เช่นระบบ CAVE ได้ ทำให้มีแนวคิดที่จะนำการประยุกต์ดังกล่าวมาใช้งานกับเครื่องฉายภาพ (projector) ซึ่งจะทำให้มีพื้นที่การแสดงผลที่ใหญ่ขึ้นเช่นที่ใช้ในระบบ CAVE ทว่าในการประยุกต์การแสดงผลสามมิติที่มีขายตามท้องตลาดร่วมกับระบบแว่นชัตเตอร์และระบบเครื่องฉายภาพ ในการใช้งานจริงอาจประสบปัญหาต่างๆในการแสดงผลเช่น การปรากฏของภาพที่มีการเลื่อมล้ำกับจังหวะการ

ทำงานของแว่นชัตเตอร์การเกิดการกระโดดของเฟรมภาพ หรือการเกิดรู้ง ทำให้ในระบบ CAVE ในปัจจุบันต้องการเครื่องฉายภาพแบบพิเศษที่สามารถประสานจังหวะการฉายภาพให้ตรงกับจังหวะการทำงานของแว่นชัตเตอร์ได้ เครื่องฉายภาพดังกล่าวจึงถูกพัฒนาขึ้นโดยเฉพาะและเป็นความลับทางการค้า ส่งผลต่อราคาและต้นทุนสูงไม่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานสำหรับผู้ซื้อโดยทั่วไป

หากต้องการประยุกต์เครื่องฉายภาพทั่วไปตามท้องตลาดกับระบบแสดงผลสามมิติ อุปสรรคอีกประการหนึ่งคือปัญหาการโพลาไรส์ของแสงโดยเฉพาะเครื่องฉายภาพที่ใช้เทคโนโลยี LCD ซึ่งใช้หลักการทำงานเดียวกับแผ่น LCD บนแว่นชัตเตอร์ แสงที่ถูกฉายออกมาจากเครื่องฉายภาพแบบ LCD นั้นจะมีทิศทางการโพลาไรส์ที่จำกัด อาจถูกหักล้างโดยแผ่น LCD ที่อยู่บนแว่นชัตเตอร์หากทิศทางการโพลาไรส์นั้นมีทิศตั้งฉากกัน ดังนั้นระบบ CAVE ในอดีตจึงจำเป็นต้องใช้ระบบเครื่องฉายภาพแบบอื่นๆ ที่ไม่ใช่ระบบ LCD เช่นระบบ CRT แต่ระบบเครื่องฉายภาพแบบ CRT นั้นก็มีข้อจำกัดในเรื่องของความสว่าง ความสดของแสงสีและความละเอียด



รูปที่ 1.11: ระบบ Shutter Glasses

ทว่าเมื่อเทคโนโลยีทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาขึ้น จนสามารถสร้างอุปกรณ์กลไฟฟ้าจุลภาค หรือ Microelectromechanical systems (MEMS) ระบบฉายภาพแบบ DLP จึงได้รับการประดิษฐ์ขึ้น [10] โดยอาศัยอุปกรณ์ DMD ระบบการฉายภาพแบบ DLP นั้นสามารถฉายภาพที่มีความละเอียด ความสว่างและความคมชัดที่สูง อีกทั้งแสงที่ได้นั้นไม่มีการโพลาไรส์ ข้อดีอื่นๆ ของระบบการฉายภาพโดยอุปกรณ์ MEMS คือมีความร้อนต่ำ มีการสูญเสียทางแสงที่น้อย จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้เหมาะในการประยุกต์ใช้งานกับแว่นแบบชัตเตอร์ เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบ CAVE และเมื่อเทคโนโลยีทางด้าน MEMS พัฒนาไปก็จะทำให้มีราคาที่ต่ำและใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น การประยุกต์เครื่องฉายภาพ DLP กับการแสดงผลสามมิติจึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่น่าสนใจ

การประยุกต์ใช้งานเครื่องฉายภาพแบบ DLP กับระบบแว่นชุดเตอร์ เพื่อสร้างระบบ CAVE นั้น จะทำให้ได้ระบบแสดงผลภาพสามมิติขนาดใหญ่ที่มีความคมชัดและความสว่างที่สูง แต่ก็ทำให้ระบบดังกล่าวมีราคาที่สูงตาม เนื่องจากต้องการเครื่องฉายภาพที่ถูกดัดแปลงมาเฉพาะ ซึ่งได้รับการแก้ปัญหาที่เกิดจากการทำงานของระบบ DLP ที่มีการประมวลผลภาพแตกต่างกับระบบฉายภาพระบบอื่น ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาในการประสานจังหวะเวลาในการฉายภาพ

ระบบติดตามตำแหน่งศีรษะเป็นอีกระบบหนึ่งที่สำคัญในระบบ CAVE เพื่อให้ภาพที่ผู้ชมเห็นปรากฏถูกต้องตามมุมมองที่ผู้ชมนั้นอยู่ ตำแหน่งของผู้ชมจึงต้องถูกติดตามอย่างแม่นยำ ระบบติดตามตำแหน่งนั้นมีหลายรูปแบบ เช่นระบบติดตามตำแหน่งศีรษะในงาน The Ultimate Display [5] ซึ่งเป็นแบบกลไกจักรกล (mechanical linkage) ดังรูป 1.12(ก) และได้รับการพัฒนาภายหลังเป็นระบบติดตามตำแหน่งศีรษะแบบคลื่นเหนือเสียง (ultrasonic) ดังรูป 1.12(ข) ในงานวิจัยต่อมา ยังมีการใช้งานระบบติดตามตำแหน่งรูปแบบอื่นๆ เช่นระบบติดตามตำแหน่งด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นของบริษัท Polhemus หรือ Ascension ในระบบ CAVE โดยระบบติดตามตำแหน่งศีรษะที่ได้กล่าวมานั้น มีข้อดีและข้อเสียในแง่มุมต่างๆ ที่แตกต่างกัน โดยอาจเป็นข้อเสียทางด้านความแม่นยำ การถูกรบกวนหรือราคา เพื่อให้ได้ระบบติดตามตำแหน่งที่เหมาะสมกับระบบโลกเสมือนจริง การพัฒนาระบบติดตามตำแหน่งศีรษะจำเป็นต้องพัฒนาควบคู่ไปกับระบบแสดงผล



(ก) ระบบติดตามตำแหน่งศีรษะแบบแบบกลไกจักรกล

(ข) ระบบติดตามตำแหน่งศีรษะแบบคลื่นเสียงความถี่สูง

รูปที่ 1.12: ระบบติดตามตำแหน่งศีรษะที่ใช้ในงาน The Ultimate Display [5]

ที่มา <http://design.osu.edu/carlson/history/lesson17.html>

เนื่องจากเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนาไปอย่างมาก ระบบสมองกลฝังตัว หรือ Embedded System จึงได้รับการพัฒนาให้มีขนาดที่เล็กลงและมีความสามารถที่สูง อีกทั้งเทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) ก็ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้ในอุปกรณ์ไร้สายต่างๆ ทำให้กล้อง CMOS ที่ได้มีความละเอียดที่สูง มีความคมชัดมากขึ้น และเนื่องจากเซมิคอนดักเตอร์ CMOS นั้นเป็นเทคโนโลยีเดียวกับ CMOS ที่ใช้ในการสร้างวงจรรวมและไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้เกิดการพัฒนากล้อง CMOS ที่มีระบบ SoC (system on chip) ซึ่งจะสามารถทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลภาพที่ถ่ายได้ภายในตัวเซมิคอนดักเตอร์ ระบบกล้อง CMOS แบบ SoC จึงได้ถูกประยุกต์ใช้งานในงานทางด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่นในระบบออปติคัลเมาส์ หรือระบบเครื่องควบคุมระยะไกล (remote) ในเครื่องเล่นเกมส์ Wii ดังแสดงในรูป 1.13



รูปที่ 1.13: เครื่องควบคุมระยะไกลของ Wii(Wiimote)

ที่มา <http://www.nintendo.com>

ระบบติดตามตำแหน่งสีระแบบเชิงแสงที่มีโดยทั่วไปจะเป็นระบบที่ประกอบด้วยสองส่วนคือ เซนเซอร์และมาร์คเกอร์ โดยเซนเซอร์อาจเป็นกล้องซึ่งทำการถ่ายภาพตำแหน่งของมาร์คเกอร์เพื่อนำมาคำนวณหาว่า ณ ปัจจุบันตำแหน่งของมาร์คเกอร์นั้นอยู่ที่ใด ระบบติดตามตำแหน่งส่วนใหญ่จะนิยมให้เซนเซอร์นั้นเป็นส่วนที่อยู่นิ่งกับที่ (stationary) และส่วนมาร์คเกอร์เป็นส่วนเคลื่อนที่ (movable) ตำแหน่งที่ได้จึงเป็นการปรากฏของภาพบนเซนเซอร์ ซึ่งสามารถใช้ในการคำนวณทางเรขาคณิตแบบทศมิติมาใช้ในการหาตำแหน่งมาร์คเกอร์ได้ ทว่าจากการคำนวณดังกล่าวทำให้เกิดข้อจำกัดประการหนึ่ง กล่าวคือ เมื่อมาร์คเกอร์อยู่ไกลจากกล้อง จะทำให้ความคลาดเคลื่อนหรือความแม่นยำในการระบุตำแหน่งลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากเหตุผลดังกล่าววิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงมีเป้าหมายในการพัฒนาอุปกรณ์ที่จะช่วยประสานจังหวะเวลาการทำงานของเวเนซัตเตอร์กับจังหวะการฉายภาพของเครื่องฉายภาพแบบ DMD ที่มีขายโดยทั่วไปและมีการเพิ่มเติมนระบบติดตามตำแหน่งผู้ใช้ซึ่งจะช่วยให้อาชีพที่ปรากฏมีปริมาณและสัดส่วนถูกต้องตามมุมมองของผู้ใช้ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานเครื่องฉายภาพที่มีโดยทั่วไปในการฉายภาพสามมิติได้ ซึ่งจะทำการสร้างระบบการแสดงผลสามมิติ สามารถทำได้ง่ายขึ้น มีต้นทุนที่ถูกลง ผู้วิจัยหวังว่าจากการพัฒนาอุปกรณ์จะสามารถช่วยให้ การประยุกต์ใช้งานระบบแสดงผลภาพสามมิติมีการใช้งานแพร่หลายมากขึ้น เพื่อประโยชน์ในการใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาระบบแสดงผลภาพสามมิติที่ประยุกต์ใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีในท้องตลาดที่สามารถใช้งานกับเครื่องฉายภาพ DLP ที่มีทั่วไป
2. เพื่อพัฒนาระบบการระบุตำแหน่งสำหรับการแสดงผลภาพสามมิติ ซึ่งใช้การติดตั้งกล้องบนแว่นที่เป็นส่วนเคลื่อนไหว

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของการพัฒนา

1. พัฒนาระบบฉายภาพสามมิติที่สามารถใช้ฉายภาพ DLP ที่มีขายตามท้องตลาดในการฉายภาพสามมิติได้
2. พัฒนาระบบติดตามมุมมองโดยอาศัยกล้องร่วมกับตัววัดอัตราเร่งที่สามารถหาตำแหน่งของแว่นเพื่อใช้ในการแสดงผล

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ทำการพัฒนาวงจรแทรกสัญญาณมาร์คเกอร์สี่เหลี่ยม เพิ่มเติมให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น
2. ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการตรวจจับสัญญาณประสานเวลาที่ฉายบนหน้าจอ โดยใช้เทคนิค PLL และออกแบบสร้างอุปกรณ์ควบคุมจังหวะการปิด-เปิดของแว่น
3. ทำการพัฒนาาระบบระบุตำแหน่งโดยกล้องเคลื่อนที่ โดยอาศัยการระบุตำแหน่งจากมาร์คเกอร์ที่ติดตั้งบนหน้าจอ
4. ทำการทดลองระบบโดยรวม
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
6. เขียนบทความและตีพิมพ์

บทที่ 2

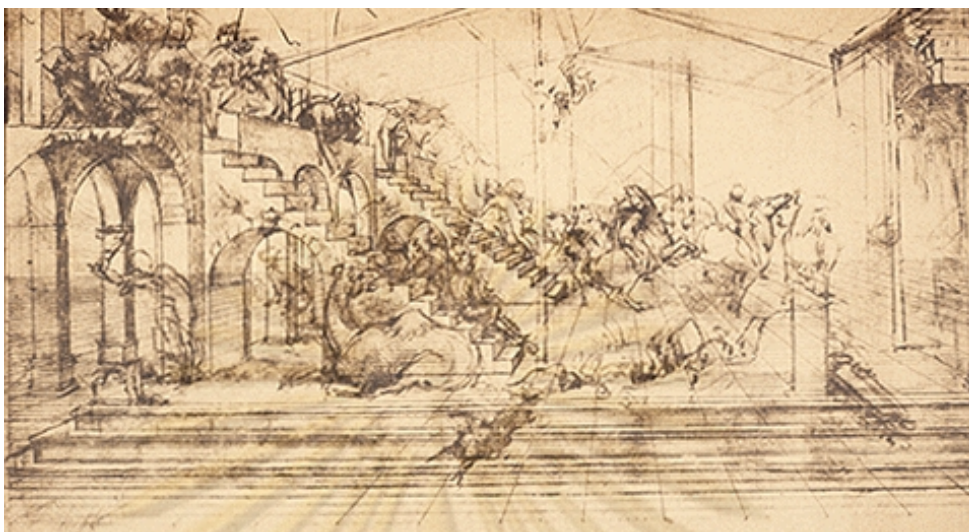
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พื้นฐานของระบบฉายภาพสามมิติ

ความสามารถในการรับรู้สภาพแวดล้อมในรูปแบบสามมิติ เป็นทักษะสำคัญของสิ่งมีชีวิตที่สมองได้รับการพัฒนาอย่างก้าวหน้า การรับรู้มิติในเชิงลึกนั้นได้ถูกสังเกตและศึกษาโดยศิลปินในยุคฟื้นฟูศิลปวิทยา (renaissance) โดยเฉพาะหลักการฉายภาพแบบทัศนมิติ (perspective projection) เช่นแสดงในรูป 2.1 ซึ่งเป็นภาพของโบสถ์ Basilica of Santo Spirito โดย Filippo Brunelleschi หรือรูป 2.2 "Perspective study for the Adoration of the Magi" โดย Leonardo Davinci จากการศึกษาในยุคนี้ทำให้เกิดความตระหนักถึงความจำเป็นที่จะต้องใช้ภาพมากกว่าหนึ่งภาพในการนำวาดวัตถุต่างๆ เพื่อให้มีมิติของความลึก



รูปที่ 2.1: โบสถ์ Basilica of Santo Spirito
ที่มา <http://veronicawaisberg.blogspot.com>

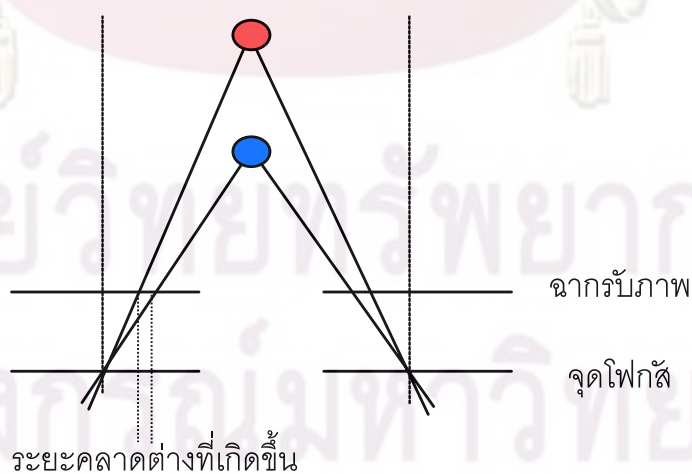


รูปที่ 2.2: Perspective study for the Adoration of the Magi

ที่มา <http://www.ownfineart.com/Drawings/>

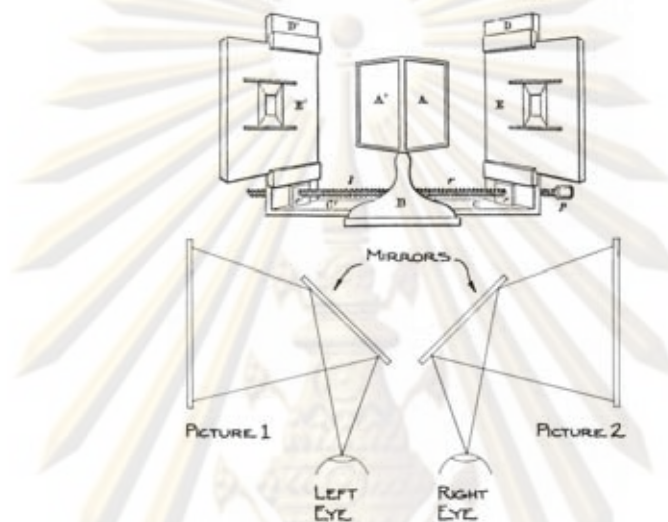
Preparatory_study_for_the_Background_of_the_Adoration_of_the_Magi.jpg

ต่อมาในปี 1838 Charles Wheatstone [2] ได้ค้นพบหลักการฉายภาพสามมิติแบบสองตา (binocular vision) โดยหลักการรับรู้เชิงสามมิติดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยการมองเห็นผ่านดวงตาสองข้าง ซึ่งมีตำแหน่งต่างกันเล็กน้อย ซึ่งจะก่อให้เกิดมุมมองที่แตกต่างกันของดวงตาแต่ละข้าง ภาพที่มองเห็นจะปรากฏเป็นภาพความคลาดต่าง (disparity image) และจะถูกสมองจะนำไปตีความโดยอาศัยความแตกต่างของระยะห่างของวัตถุที่ปรากฏภาพจากตาซ้ายและตาขวา นำไปประมาณเป็นความลึกโดยการเปรียบเทียบกับระยะห่างของวัตถุชิ้นอื่น โดยความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างและความลึกสามารถอาศัยการอธิบายได้โดยการวิเคราะห์ทางเรขาคณิตดังแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.3: หลักการฉายภาพสามมิติแบบสองตา

ดังนั้นจากหลักการที่กล่าวมา จึงทำให้สามารถทำการประดิษฐ์อุปกรณ์ฉายภาพสามมิติ โดยอาศัยการฉายภาพให้ปรากฏบนตาซ้ายและขวาแตกต่างกัน ในเริ่มแรกได้มีการประดิษฐ์ stereoscope สำหรับใช้ในการดูภาพถ่ายแบบ stereoscopic ดังแสดงในรูป 2.4 และต่อมาได้มีการพัฒนา ดังรูป 2.5 โดยภายในจะเพิ่มเติมใช้อุปกรณ์เช่นปริซึมหรือเลนส์ในการหักเหแสง เนื่องจากจำเป็นจะต้องแก้ไขปัญหาเรื่องระยะโฟกัสของตาเพื่อลดปัญหาเรื่องความเมื่อยล้าของดวงตา ภาพที่ใช้ในเทคนิคดังกล่าวจะประกอบด้วยรูปภาพสองภาพสำหรับดวงตาแต่ละข้าง



รูปที่ 2.4: กล้องทัศนมิติของ Chales Wheat Stone
ที่มา <http://www.lst.inf.ethz.ch/films/>



รูปที่ 2.5: กล้องมองภาพสามมิติของ Holmes
ที่มา <http://en.wikipedia.org/wiki/Stereoscope>

ในงานวิจัย [11] ได้กล่าวถึงระบบแสดงผลภาพสามมิติแบบต่างๆ ทั้งแบบ autostereoscopic และ stereoscopic โดยระบบแสดงผลภาพสามมิติแต่ละรูปแบบจะมีจุดเด่นและด้อยแตกต่างกันออกไป แม้ว่าระบบ autostereoscopic จะสามารถแสดงผลภาพสามมิติได้โดยไม่ต้องอาศัยแว่นรูปแบบต่างๆ แต่ระบบดังกล่าวก็ยังอยู่ในขั้นการพัฒนา เนื่องจากเทคโนโลยีและวัสดุยังไม่เอื้ออำนวยให้สามารถทำงานได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นในปัจจุบันระบบที่ประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นระบบที่ใช้หลักการลวงตาในการสร้างภาพสามมิติหรือระบบ stereoscopic ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้

2.1.1 เทคนิคแว่นสองสีสามมิติแอนะกลิฟ (Two-color Anaglyph Glasses)

แว่นสามมิติแบบแอนะกลิฟเป็นเทคนิคที่ใช้แม่สีของแสงในการแยกภาพให้ปรากฏในตาแต่ละข้างแตกต่างกันดังแสดงในรูป 2.6 แว่นแอนะกลิฟโดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้สีแดง-น้ำเงิน (red-cyan) ในการแยก สาเหตุที่เลือกใช้คู่สีแดง-น้ำเงินแทนคู่สีอื่นก็เพราะต้องการหลีกเลี่ยงการใช้แม่สีเขียวในการแยก เนื่องจากสีเขียวเป็นสีที่มนุษย์ตอบสนองได้ดีที่สุดและสีเขียวจะมีอิทธิพลต่อความสว่าง (intensity) ที่มนุษย์รับรู้มากกว่าแม่สีอื่น ทำให้เมื่อใช้แผ่นกรองแสงสีเขียวอาจทำให้การมองภาพจะทำได้ยากกว่าการใช้แม่สีอื่นๆ



รูปที่ 2.6: แว่นสองสีสามมิติแอนะกลิฟ



รูปที่ 2.7: ภาพสามมิติแอนะกลิฟ

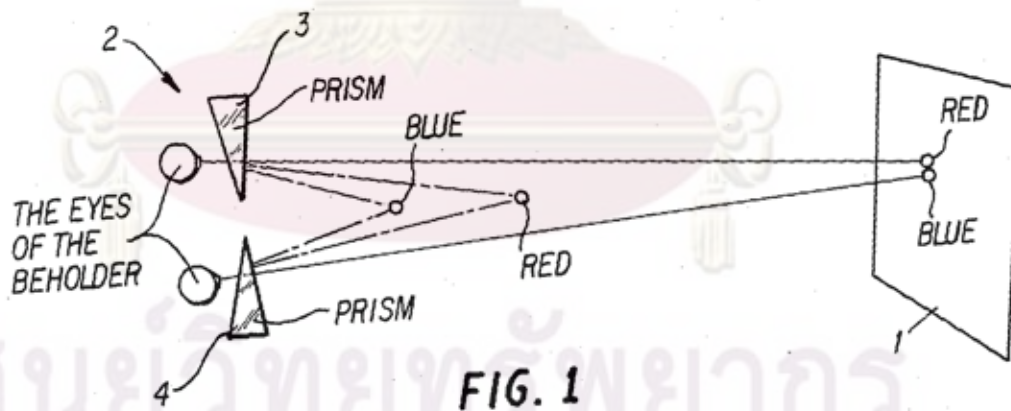
ที่มา Gene Cernan, Apollo 17, NASA; Anaglyph by Erik van Meijgaarden

ภาพที่ต้องการให้ปรากฏบนตาแต่ละข้าง จะถูกทำการย้อมสีด้วยแม่สีที่ใช้ในการแยกแสงสี และนำภาพดังกล่าวมาวางซ้อนกันดังตัวอย่างในรูป 2.7 โดยผู้ชมจะมองภาพดังกล่าวผ่านแผ่นกรองสีที่ติดตั้งบนแว่นแต่ละข้างจะมีแผ่นกรองสีที่มีสีแตกต่างกัน ซึ่งจะยอมให้เฉพาะสีของตาข้างนั้นผ่านมากะทบเรตินาได้ ทำให้ภาพที่ปรากฏบนตาเห็นภาพแตกต่างกัน เกิดปรากฏการณ์ stereoscopic depth ขึ้น ทำให้ผู้ชมสามารถรับรู้ความเป็นวัตถุสามมิติได้ ขอดอยของวิธีดังกล่าวคือ

การเกิดความผิดเพี้ยนของสีสั่น จากการศึกษารายงานของ [12] ซึ่งทำการศึกษสาเหตุของการเกิด ghosting ในภาพสามมิติแอนะกลิฟ ซึ่งพบว่าสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการ cross talk ของแสงของตาแต่ละข้างเนื่องจากความไม่สอดคล้องของฟิลเตอร์ที่ใช้ในแว่นภาพสามมิติแอนะกลิฟกับวัสดุหรือจอภาพที่ใช้ ความไม่สอดคล้องดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจาก โดยทั่วไประบบการพิมพ์หรือจอแสดงผล จะใช้การสร้างสีต่างๆโดยอาศัยการผสมกันของแม่สี ซึ่งในทางปฏิบัติแม่สีที่ใช้ในเทคโนโลยีแสดงผลแต่ละแบบนั้น ย่อมให้สีที่มี spectrum แตกต่างกันไป โดยเฉพาะเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างจอแสดงผลแบบต่างๆแล้ว พบว่าโดยส่วนใหญ่แว่นกรองแสงสามมิติแอนะกลิฟ จะถูกออกแบบเพื่อใช้กับจอแสดงผลแบบ CRT และสามารถใช้ได้กับระบบจอภาพ LCD ได้เป็นอย่างดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ cross talk ที่น้อย แต่จะเกิดอุปสรรคเมื่อใช้กับระบบฉายภาพโดยเครื่องฉายภาพ ทั้งแบบที่ใช้เทคโนโลยี LCD และเทคโนโลยี DMD ข้อสรุปในงานวิจัยดังกล่าวทำให้เห็นปัญหาในการประยุกต์ใช้แว่นสามมิติแอนะกลิฟกับระบบฉายภาพโดยทั่วไป

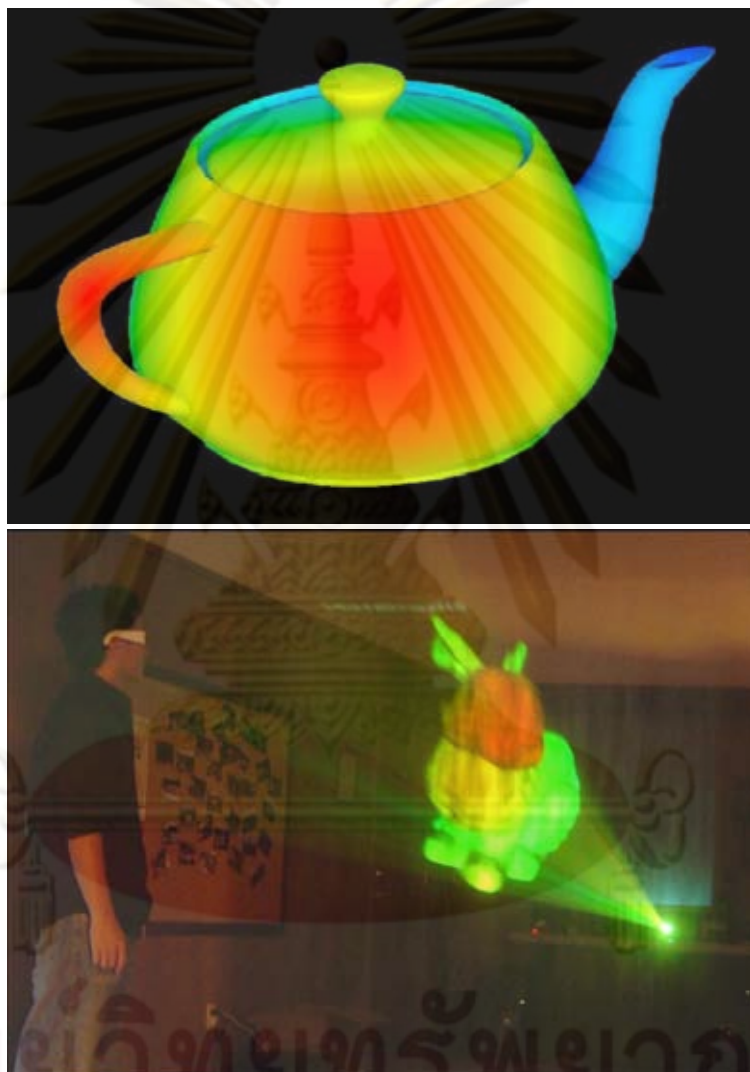
2.1.2 เทคโนโลยี ChromaDepth

ChromaDepth เป็นเทคโนโลยีที่ใช้หลักการความแตกต่างของมุมในการหักเหของแสงสีต่างๆ ของปริซึม ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ซึ่งเกิดจากความแตกต่างกันของความเร็วของแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน ดังภาพแสดงการทำงานใน 2.8 [13] โดยจุดบนภาพที่มีความลึกแตกต่างกันจะถูกแทนด้วยสีที่แตกต่างกัน ทำให้เมื่อมองภาพดังกล่าวผ่านปริซึมที่ติดตั้งอยู่บนแว่น แว่น จะทำการหักเหแสงที่มีสีแตกต่างกันในมุมที่ต่างกันทำให้แสงที่ผ่านไปปรากฏบนตำแหน่งที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ดวงตาแต่ละข้างมองเห็นภาพที่แตกต่างกัน จากความแตกต่างดังกล่าวจะทำให้สามารถเกิดปรากฏการณ์การมองเห็นเป็นภาพสามมิติได้



รูปที่ 2.8: เทคโนโลยี ChromaDepth

ตัวอย่างภาพ ChromaDepth แสดงในรูป 2.9 จะเห็นได้ว่าการที่ภาพ ChromaDepth ใช้สีต่างๆ ในการสร้างมิติความลึกนั้น มีข้อดีที่สามารถสังเกตความลึกของวัตถุได้ในกรณีที่ไม่ได้สวมใส่แว่น แต่ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้วัตถุในภาพ ChromaDepth นั้นไม่สามารถใช้สีสั่นได้ตามอิสระตามความต้องการ ทำให้เกิดข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการแสดงภาพสามมิติให้มีสีสั่นสมจริง



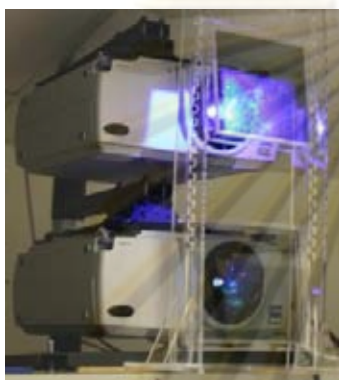
รูปที่ 2.9: ตัวอย่างรูปภาพและการประยุกต์ของเทคโนโลยี ChromaDepth

ที่มา <http://www.iavsc.org/repository/express/pages/chromad/chromad.shtml>

ที่มา http://ilab.cs.ucsb.edu/press/openhouse_f06/

2.1.3 เทคนิคการใช้แผ่นกรองโพลาไรส์ (Polarizing Glasses)

เทคนิคการใช้การโพลาไรส์ของแสงในการแยกภาพที่ต้องการให้ปรากฏบนตาแต่ละข้าง เป็นเทคนิคที่ใช้เครื่องฉายภาพสองตัวช่วยกันฉายภาพผ่านแผ่นกรองโพลาไรส์ดังรูป 2.10 ซึ่งแผ่นกรองโพลาไรส์ที่ติดตั้งอยู่ด้านหน้าทั้งสองแผ่นจะทำการกรองแสงจากเครื่องฉายให้เหลือเพียงทิศทางการโพลาไรส์เพียงทิศเดียวสำหรับเครื่องฉายแต่ละเครื่อง ดังนั้นภาพที่ปรากฏบนหน้าจอจะประกอบด้วยภาพสองภาพสำหรับตาแต่ละข้างซึ่งถูกฉายซ้อนทับกันแต่มีทิศทางการโพลาไรส์ของแสงที่แตกต่างกัน ผู้ใช้งานจะมองภาพดังกล่าวผ่านแว่นโพลาไรส์



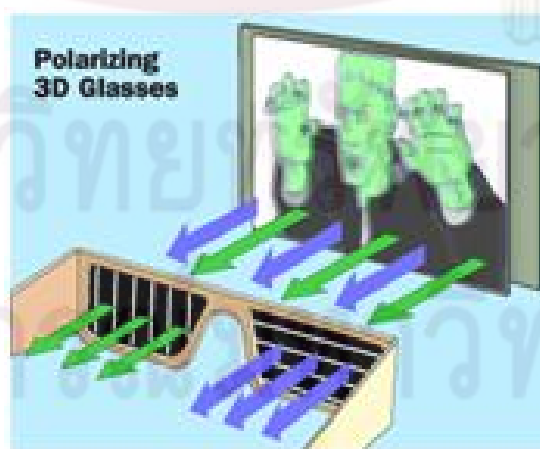
(ก) การติดตั้งแผ่นกรองโพลาไรส์
สำหรับเครื่องฉายภาพ



(ข) แว่นโพลาไรส์

รูปที่ 2.10: เทคนิคการใช้แผ่นกรองโพลาไรส์

หลักการทำงานของการฉายภาพสามมิติโดยอาศัยเทคนิคโพลาไรส์ดังแสดงในรูป 2.11 จะอาศัยแผ่นกรองโพลาไรส์ที่อยู่บนแว่น ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านหน้าของตาแต่ละข้างจะทำการกรองเลือกเฉพาะแสงที่ฉายจากเครื่องฉายที่ฉายภาพของตาข้างนั้น ดังนั้นภาพที่ปรากฏบนตาแต่ละข้างจะปรากฏภาพที่แตกต่างกัน สามารถมองเห็นเป็นสามมิติได้



รูปที่ 2.11: แสดงหลักการทำงานของระบบฉายภาพสามมิติแบบใช้แผ่นกรองโพลาไรส์
ที่มา <http://entertainment.howstuffworks.com/3-d-glasses2.htm>

ระบบการฉายภาพโดยใช้เทคนิคโพลารไรส์นั้นสามารถแสดงได้ในรูป 2.12 ซึ่งระบบดังกล่าวต้องการเครื่องฉายภาพจำนวนสองเครื่องทำให้ระบบดังกล่าวมีต้นทุนที่สูง จุดด้อยอีกประการในการประยุกต์ใช้งานการฉายภาพสามมิติแบบเทคนิคโพลารไรส์ คือปัญหาในการใช้งานกับเครื่องฉายภาพแบบ LCD ชนิด TFT ซึ่งมีข้อจำกัดในการติดตั้งแผ่นโพลารไรส์ เกิดการลดทอนของแสง และข้อจำกัดในมุมมองการมองภาพ ข้อจำกัดนี้เกิดจากการที่เทคโนโลยี LCD ใช้การควบคุมการโพลารไรส์ของแสงในการควบคุมปริมาณการปิดหรือเปิดแสง ซึ่งทับซ้อนกับหลักการทำงานของระบบฉายภาพสามมิติแบบใช้แผ่นกรองโพลารไรส์

ในงานวิจัยของ [14] ได้ทำการศึกษาและพัฒนาระบบการฉายภาพสามมิติโดยเทคนิคโพลารไรส์ โดยพบว่าเมื่อทำการปรับมุมทิศทางของการโพลารไรส์ของแสง จะสามารถทำให้ความสว่างเพิ่มขึ้นและสามารถลดการ cross talk ของภาพได้อย่างมาก โดยจากการทดลองสามารถเพิ่มความสว่าง ได้ตั้งแต่ 75% ถึง 300%

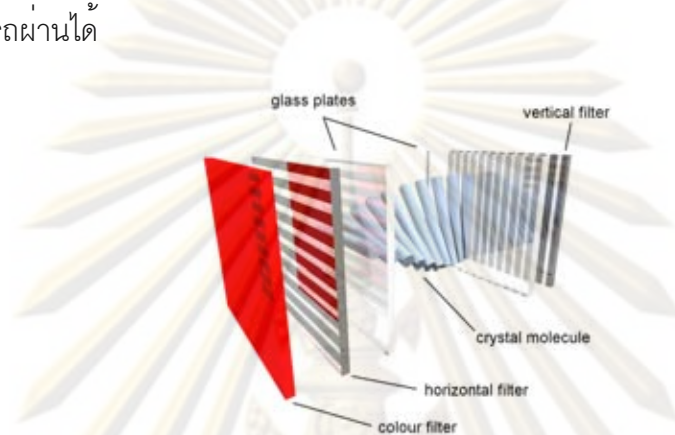


รูปที่ 2.12: เทคนิคการใช้แผ่นกรองโพลารไรส์

2.1.4 เทคโนโลยี LCD

การทำงานของ LCD ดังแสดงในรูป 2.13 มีหลักการทำงานคือ แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะถูกกรองผ่านฟิลเตอร์โพลารไรส์ทำให้เหลือเพียงแสงที่มีทิศทางโพลารไรส์ทิศทางเดียว แสงดังกล่าวจะเดินทางผ่านชั้นของ LC (liquid crystal) และผ่านไปยังฟิลเตอร์โพลารไรส์อีกชั้นเป็นชั้นที่สอง ซึ่งฟิลเตอร์โพลารไรส์ที่ติดตั้งอยู่ในชั้นที่สองนั้นจะติดตั้งให้ทำมุมฉากกับฟิลเตอร์ในชั้นแรก ทำให้แสงที่ถูกกรองแล้วนั้นถูกกรองอีกครั้งในมุมตั้งฉาก ในกรณีที่ไม่มีกระแสไฟแรงดันแสงทั้งหมดนั้นถูกกรองโดยสมบูรณ์ ซึ่งหน้าที่ของชั้น LC ที่อยู่ตรงกลางจะทำหน้าที่ในการควบคุมการส่องผ่าน ในกรณีที่มีการจ่ายแรงดันคร่อมชั้นดังกล่าวก็จะทำให้สาร LC มีการบิดตัว การบิดตัวของสาร LC จะทำให้แสงนั้น

ถูกบิดไปอีก 90 องศา ดังนั้นเมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟคร่อม LC แสงที่ส่องเข้ามาจะสามารถผ่านออกไปได้ เนื่องจากแสงที่ถูกกรองจากฟิลเตอร์ในชั้นแรกจะถูกบิดทำให้สามารถผ่านฟิลเตอร์ในชั้นที่สองได้ ดังนั้นแสงที่ผ่าน LCD ชนิดดังกล่าวจะมีทิศทางการโพลาไรส์ ซึ่งในกรณีที่เราต้องการติดตั้งโพลาไรส์เพิ่มเติม จะสามารถทำให้เกิดการบ่งแสง ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานในการฉายภาพสามมิติ ที่ต้องการให้แสงจากเครื่องฉายภาพแต่ละตัวมีมุมที่ตั้งฉากกัน ก็จะทำให้มีโอกาสที่แสงจากเครื่องฉายภาพหนึ่งในนั้นมีการโพลาไรส์ในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางการโพลาไรส์ของแสง ทำให้แสงไม่สามารถผ่านได้



รูปที่ 2.13: แสดงหลักการทำงานของ LCD

ที่มา [http://en.wikipedia.org/wiki/File:LCD_subpixel_\(en\).png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:LCD_subpixel_(en).png)

จากหลักการทำงานดังกล่าว LCD จึงมีข้อเสียต่างๆ เช่น การถูกลดทอนของปริมาณแสงโดยแผ่นกรองโพลาไรส์ทั้งสองชั้น ซึ่งทำให้เกิดความร้อนสูงในกรณีการใช้งานเป็นเครื่องฉายภาพและทำให้มีอุปสรรคเรื่องความทนทานของแผ่นกรองแสงโพลาไรส์ในการประยุกต์งานในการฉายภาพขนาดใหญ่ที่มีความเข้มแสงสูง

ปัญหาอีกประการคือการใช้ผู้ชมจำเป็นต้องรักษาระดับของตาในขณะรับชม เนื่องจากถ้าหากผู้ใช้เอียงคอก็จะทำให้แสงสามารถหลุดลอดผ่านแผ่นกรองโพลาไรส์ได้ ทำให้เกิดการ crosstalk ของภาพได้ ดังการศึกษาในงานวิจัยของ [14]

2.1.5 เทคนิคการใช้แว่นชัตเตอร์ (Shutter Glasses)

ระบบการฉายภาพสามมิติแบบแว่นชัตเตอร์ เป็นระบบที่ได้รับการสนใจและถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากข้อดีที่ระบบสามารถแสดงภาพโดยสามารถรักษาสีสันที่แท้จริง แตกต่างกับภาพสามมิติแอนะกลิฟหรือ เทคโนโลยี ChromaDepth อีกทั้งไม่ประสบปัญหาเมื่อผู้ใช้มีการเอียงศีรษะหรือต้องใช้เครื่องฉายภาพหลายเครื่องเหมือนระบบฉายภาพสามมิติแบบโพลาไรส์

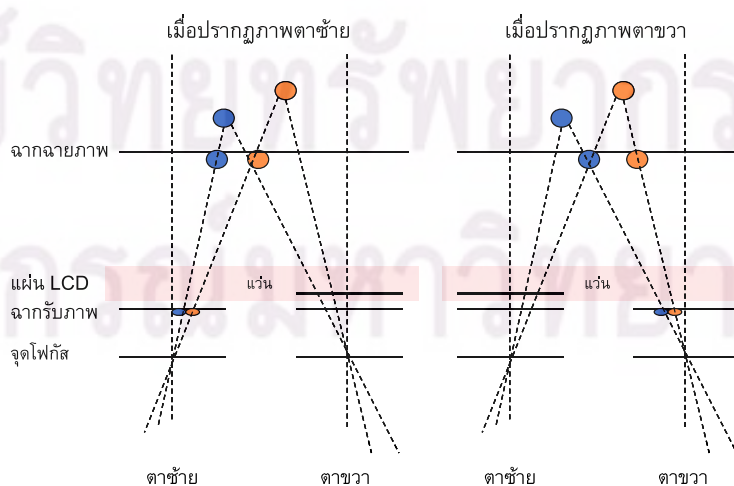
การทำงานของระบบฉายภาพสามมิติแบบชัตเตอร์นั้น ทำงานโดยเครื่องฉายภาพจะทำการฉายภาพสองภาพที่ต้องการให้ปรากฏบนตาผู้ชมแต่ละข้าง โดยภาพสองภาพนี้จะถูกวาดในมุมมองที่ต่างกันหรือมีระยะห่างในแกนนอนที่ต่างกัน เฉกเช่นเดียวกับความแตกต่างของภาพที่ตาแต่ละข้างเห็นเนื่องจากความแตกต่างกันในมุมมองของตาแต่ละข้าง ทำให้สมองสามารถรับรู้เป็นภาพสามมิติได้ ภาพทั้งสองจะปรากฏสลับกันไปเรื่อยๆ แต่การที่จะเลือกให้ภาพที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลปรากฏบนตาข้างใดเพื่อสร้างความแตกต่างของมุมมองนั้น จะทำโดยอาศัยแว่นชัตเตอร์ที่ผู้ชมสวมใส่ ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมตัดต่อให้แสงปรากฏในตาแต่ละข้างต่างกัน

แว่นชัตเตอร์ เป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบฉายภาพสามมิติแบบชัตเตอร์ เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวอาศัยการประสานจังหวะการปิดเปิดของ ชัตเตอร์ที่ติดตั้งอยู่บนแว่นระหว่างตาแต่ละข้างกับจอแสดงผล โดยเครื่องฉายภาพจะทำการฉายภาพที่ต้องการให้ปรากฏบนตาแต่ละข้างสลับไปมาบนหน้าจอแสดงผล เมื่อหน้าจอแสดงผลปรากฏภาพของตาข้างใด ชัตเตอร์ที่ติดตั้งอยู่บนตาข้างนั้นก็จะทำการเปิดทำให้แสงสามารถส่องผ่านได้ และในขณะเดียวกันชัตเตอร์ที่ติดตั้งบนตาอีกข้างก็จะทำการปิด เพื่อบังไม่ให้แสงสามารถผ่านไปยังตาข้างที่ไม่ต้องการให้ปรากฏภาพได้ ดังแสดงในรูป 2.14 แว่นชัตเตอร์นั้นสร้างจากแผ่น LCD สองแผ่นซึ่งถูกติดตั้งคั่นระหว่างตาสองข้างและจอภาพ โดยทั่วไปนิยมสร้างจากเทคโนโลยี LCD แบบ TN (twisted nematic) ซึ่งจะอาศัยสัญญาณระบุข้างของภาพที่สัมพันธ์กับสัญญาณการสแกนของหน้าจอ (vertical sync)



รูปที่ 2.14: แว่นชัตเตอร์

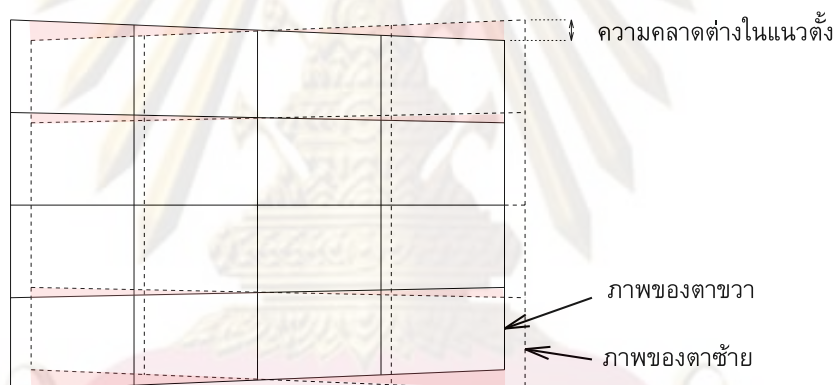
หลักการการทำงานของระบบแสดงผลสามมิติแบบแว่นชัตเตอร์ดังแสดงในรูป 2.15 เมื่อภาพที่ปรากฏเป็นภาพของตาข้างซ้าย แผ่น LCD ของตาข้างซ้ายจะถูกทำให้โปร่งใสทำให้ภาพสามารถส่องจากเครื่องฉายมายังดวงตาซ้ายได้ และเมื่อปรากฏเป็นภาพของตาขวาแผ่น LCD ที่อยู่บนหน้าดวงตาซ้าย ก็จะทำการเปลี่ยนให้ตัวเองทึบ เพื่อปิดกั้นไม่ให้ภาพจากหน้าจามาปรากฏในตาข้างซ้ายได้ ส่วนแผ่น LCD ที่อยู่บนหน้าดวงตาขวาก็จะมีการทำงานที่ตรงข้ามสลับกับการทำงานของแผ่น LCD ที่อยู่บนหน้าดวงตาข้างซ้าย จากหลักการนี้ทำให้สามารถมองเห็นเป็นภาพสามมิติได้



รูปที่ 2.15: หลักการทำงานของแว่นชัตเตอร์

แรกเริ่มที่ระบบฉายภาพสามมิติแบบแว่นชดเตอร์ได้ถูกสร้าง งานวิจัยหลายชิ้นเช่นงานวิจัยของระบบ Fish Tank VR [15] ได้แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานระบบฉายภาพสามมิติแบบแว่นชดเตอร์ แม้ว่าในขณะนั้นความสามารถในการแสดงผลจะยังได้รับการพัฒนาไม่มากเท่าปัจจุบันก็ตาม ต่อมาได้มีงานวิจัย [16] ซึ่งได้นำเสนอระบบแสดงผลภาพสามมิติแบบแว่นชดเตอร์ที่มีความละเอียดสูงขึ้น โดยในงานวิจัยดังกล่าวได้ทำการวิเคราะห์และพัฒนาระบบโดยอาศัยการนำเอาข้อมูลทางด้านกายวิภาคของดวงตาเช่นระยะโฟกัส ระยะห่างระหว่างตาทั้งสองข้างและขนาดของดวงตา มาประกอบกับการพิจารณาความผิดเพี้ยนที่เกิดจากสมบัติและการทำงานต่างๆของจอแสดงผล CRT เช่นความโค้งของหน้าจอแสดงผลเป็นต้น ทำให้สามารถทำการพัฒนาระบบแสดงผลภาพสามมิติโดยใช้เทคนิคชดเตอร์ที่มีความละเอียดและความแม่นยำที่สูงขึ้นได้

ทว่าในงานวิจัย [16] ได้ใช้เพียงค่าตำแหน่งศีรษะของผู้ชม มาคำนวณเป็นตำแหน่งของดวงตา โดยทำการประมาณตำแหน่งของดวงตาทั้งสองข้างอยู่ ณ ที่เดียวกัน จากการประมาณดังกล่าวทำให้เกิดความผิดเพี้ยนที่เรียกว่า keystone distortion ดังแสดงในรูป 2.16 ดังนั้นในงานวิจัย [17] ได้ทำการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาดังกล่าว

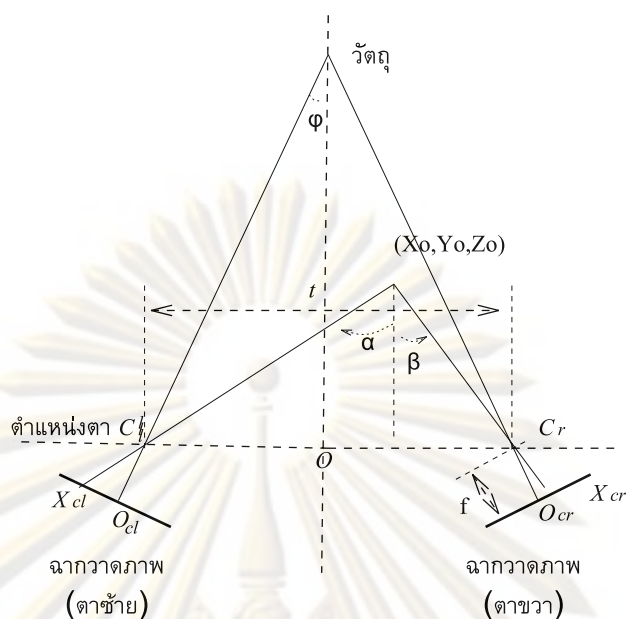


รูปที่ 2.16: ความผิดเพี้ยน Keystone ที่เกิดในการฉายภาพสามมิติแบบสองตา [17]

การวิเคราะห์ของงานวิจัย [17] ดังแสดงในรูป 2.17 แสดงให้เห็นที่มาของความผิดเพี้ยนเนื่องจากในการมองเห็นของมนุษย์นั้น ดวงตาจะมีการเหลต่าหากวัตถุเข้ามาอยู่ใกล้ การเหลต่าจะทำให้จอแสดงผลและฉากฉายภาพในโมเดลกลองที่ใช้ในการวาด ไมชนานกัน ทำให้เกิดเป็นองศาในมุมมองหรือการเหลของตาเกิดขึ้น

ปัญหาเรื่อง crosstalk หรือการรบกวนกันระหว่างภาพที่ปรากฏของตาทั้งสองข้าง เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ได้รับความสนใจ [18–20] ปัญหาการรบกวนกันนั้นจะทำให้ผู้ชมประสบกับความรำคาญในการมองภาพสามมิติที่ได้ อีกทั้งภาพที่ได้จะดูไม่สมจริง เกิดความสับสนหรือในบางกรณีอาจทำให้สมองไม่สามารถตีความภาพที่เห็นเป็นสามมิติ

ปัญหาการรบกวนกันระหว่างภาพได้ถูกทำการศึกษาและตั้งสมมุติฐาน โดยทั่วไปสาเหตุของการเกิดการรบกวนกันระหว่างภาพคือการที่จอ LCD นั้นไม่สามารถทำการปิดแสงได้เต็มที่เนื่องจากคุณสมบัติของ LCD เอง อีกทั้งการปรากฏแสงหรือการส่องสว่างของจอแสดงผลรูปแบบต่างๆนั้นมีความแตกต่างกัน



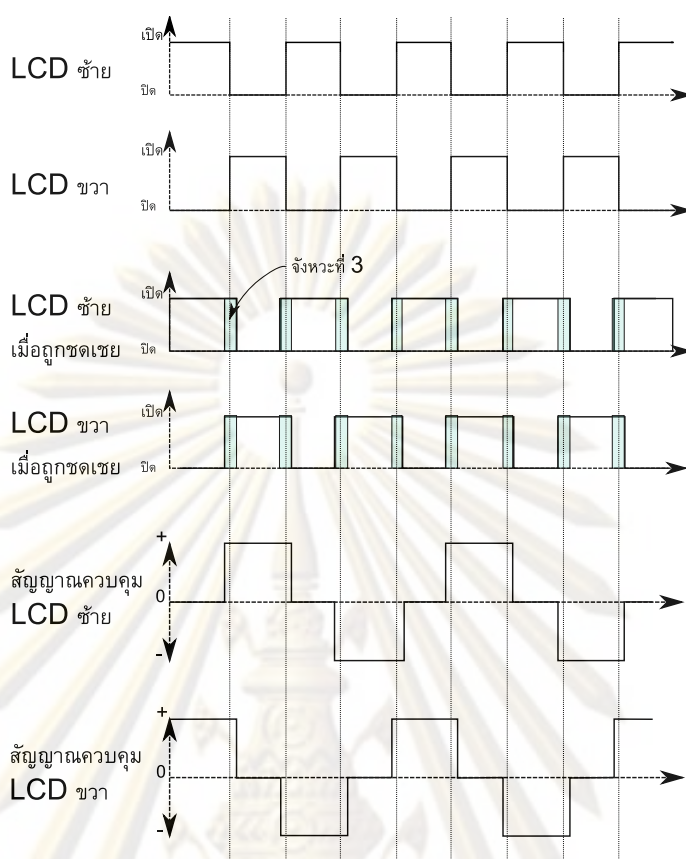
รูปที่ 2.17: เรขาคณิตของการวาดภาพของตาแต่ละข้าง [17]

ในงานศึกษาของ [19] ที่แสดงให้เห็นปัญหาจากการเกิดการประวิงของเวลาเนื่องจากการเรืองแสง (afterglow) ของสารเรืองแสงที่โซ่ในจอแสดงผล CRT ร่วมกับการประวิงของการเปลี่ยนสถานะเปิด-ปิดของ LCD ในแนวขั้วเตอร์ อีกทั้งยังศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความโปร่งแสงของตัว LCD ในย่านแสงสีต่างๆ ซึ่งการเกิด crosstalk สามารถทำให้สีต้นของภาพผิดเพี้ยนได้ งานวิจัยนี้ได้ทำการสรุปและเสนอแนะแนวทางในการเพิ่มการประวิงเวลาเพื่อให้อาจทำการปิดเปิด LCD ของแนวขั้วเตอร์ได้ตรงกับปรากฏของภาพ ซึ่งจะส่งผลต่อการลดการเกิดการกวนกันระหว่างภาพของตาทั้งสองข้าง

ในงานวิจัยของ [20] ได้นำเสนอวิธีการสร้างสัญญาณขั้วแนวขั้วเตอร์โดยเพิ่มการประวิงเวลาหรือช่วงเวลาทีสาม (third step) เข้าไปเพื่อชดเชยกับการประวิงในการทำงานของแนว LCD ดังแสดงในรูป 2.18 การเพิ่มการประวิงนี้จะช่วยให้แนวทำการบังแสงจนกระทั่งจอหรืออุปกรณ์แสดงผลนั้นเปลี่ยนเป็นภาพที่ถูกต้อง ก่อนที่แนวจะโปร่งแสงอีกครั้ง วิธีนี้สามารถลดการเกิด crosstalk ได้เป็นอย่างมาก แต่การเพิ่มการประวิงจะทำให้ภาพสามมิติที่เห็นถูกลดทอนความสว่างไปได้เช่นกัน

แม้ว่าในงานวิจัยที่ผ่านมาจะพยายามทำให้การเปิดปิดของแนวขั้วเตอร์นั้นสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ทว่าในทางปฏิบัติ LCD นั้นไม่สามารถที่บแสงได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงยังเกิดการรบกวนกันอยู่ดี ในงานวิจัย [17, 18] ได้ทำการวิเคราะห์และชดเชยการเกิด crosstalk หรือการรบกวนกันระหว่างภาพของตาทั้งสองข้าง ที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ในการปิดเปิดของแนวและความคลาดต่างในแนวตั้ง (vertical parallax) ทำให้เกิดเป็นริ้วของภาพในภาพสามมิติแบบแนวขั้วเตอร์ จากงานวิจัยนี้ได้นำเอาทฤษฎีทางด้านจิตวิทยาการรับรู้ภาพ (psychovisual) เพื่อคำนวณและทำการชดเชยภาพ ทำให้สามารถลดผลจากการรบกวนกันระหว่างภาพได้

ระบบแสดงผลภาพสามมิติแบบแนวขั้วเตอร์ยังสามารถนำไปพัฒนาทางด้านอื่นๆได้อีก เช่น การฉายภาพสามมิติที่มีผู้ใช้หลายคน [21, 22] ทำให้ระบบแสดงผลภาพสามมิติแบบแนวขั้วเตอร์นั้นมีความสามารถที่เด่นกว่าระบบแสดงผลภาพสามมิติโดยใช้การลวงตาแบบอื่นๆ

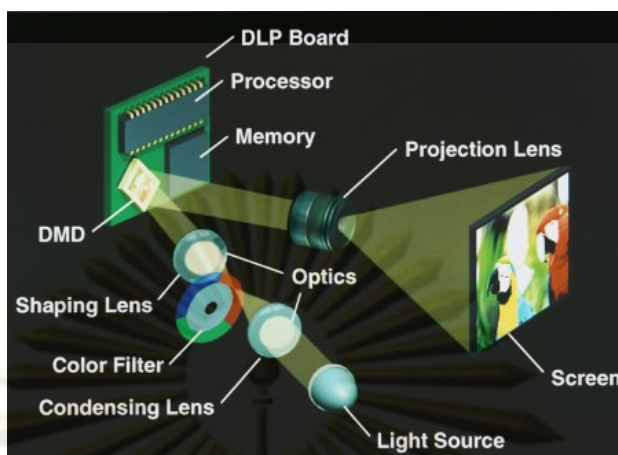


รูปที่ 2.18: การเพิ่มช่วงเวลาที่ 3 ในการประวิงการปิดเปิดของแฉวน [20]

2.1.6 เทคโนโลยี DMD (Digital Micromirror Device)

ระบบการฉายภาพโดยใช้ DMD มีข้อดีเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการฉายภาพแบบอื่นคือแสงที่ฉาย โดย DMD จะมีความเข้มแสงมากกว่า เนื่องจาก DMD ใช้หลักการของการควบคุมการสะท้อนแสงของแผ่นกระจกขนาดเล็กที่อยู่บนชิป ซึ่งจะทำให้แสงเกือบทั้งหมด ถูกสะท้อน ทำให้ความรอนที่เกิดบนตัวชิปที่เกิดจากการดูดกลืนแสงนั้นมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้งาน DMD ภายใต้แสงที่มีความเข้มสูงได้

ข้อดีอีกประการของระบบ DMD คือสามารถฉายภาพที่มีค่าความแตกต่างของแสงสี (contrast) ที่สูงกว่าระบบการฉายภาพแบบอื่น เนื่องจากการทำงานของระบบ DMD ที่ใช้การควบคุมการสะท้อนโดยการควบคุมมุมของการหันของกระจกดังแสดงในรูป 2.19 โดยกระจกแต่ละบานจะทำงานได้สองสถานะคือสะท้อนแสงไปยังฉากรับภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดจุดสว่างบนฉากรับภาพ และไม่สะท้อนแสงไปยังฉากรับภาพซึ่งจะทำให้เกิดจุดมืด จากหลักการดังกล่าวทำให้ในจังหวะของการควบคุมไม่ให้แสงไปยังฉากรับภาพนั้นมีแสงที่สามารถเล็ดลอดออกไปยังฉากรับภาพได้น้อยกว่าวิธีอื่นที่ใช้เทคนิคการบังแสงไม่สามารถบังได้มืดเช่น LCD

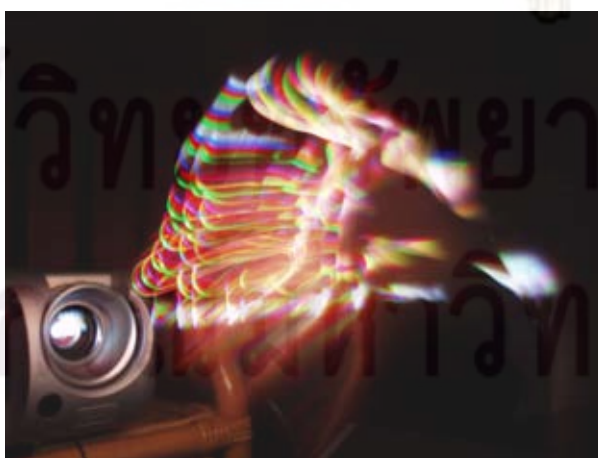


รูปที่ 2.19: เทคโนโลยี DMD

ที่มา http://www.pctechguide.com/57Projectors_DLP.htm

แต่ข้อเสียของเทคโนโลยี DMD คือการที่เป็นการฉายภาพแบบโมโนโครม ดังนั้นในการฉายภาพสี จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ระบบของวงล้อสีในการผสมสี ทำให้เกิดปรากฏการณ์รบกวนสีขณะฉายภาพ ดังแสดงในรูป 2.20 ภายในเครื่องฉายภาพจะประกอบด้วยวงล้อที่มีสีอยู่ 3 สีคือ แดง เขียว น้ำเงิน ซึ่งเป็นแม่สีหลักของแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ ติดตั้งอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับ DMD เมื่อเครื่องฉายภาพทำงานวงล้อจะหมุนด้วยความเร็วสม่ำเสมอ สัมพันธ์กับจังหวะการฉายภาพ ทำให้แสงที่ผ่านมีสีสลับกันไปมาระหว่าง แดง เขียว น้ำเงิน ดังนั้น ภาพที่ปรากฏบนหน้าจอ ก็จะเป็นการฉายภาพของแม่สี สีใดสีหนึ่งที่ละภาพ สลับหมุนวนเปลี่ยนไปมา ทำให้ภาพที่ปรากฏเป็นภาพสี

ระบบวงล้อสีดังกล่าวเป็นระบบการผสมสีเชิงกล การควบคุมความเร็วการหมุนให้คงที่หรือตรงตามที่เราต้องการนั้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานเครื่องฉายแบบ DMD จำเป็นต้องคำนึงถึงการประสานกับจังหวะของการหมุนของวงล้อดังกล่าว โดยอาจจำเป็นที่จะต้องยึดเอาจังหวะการหมุนหรือความถี่ของวงล้อ เป็นจังหวะควบคุมการวาดภาพของการแสดงผล

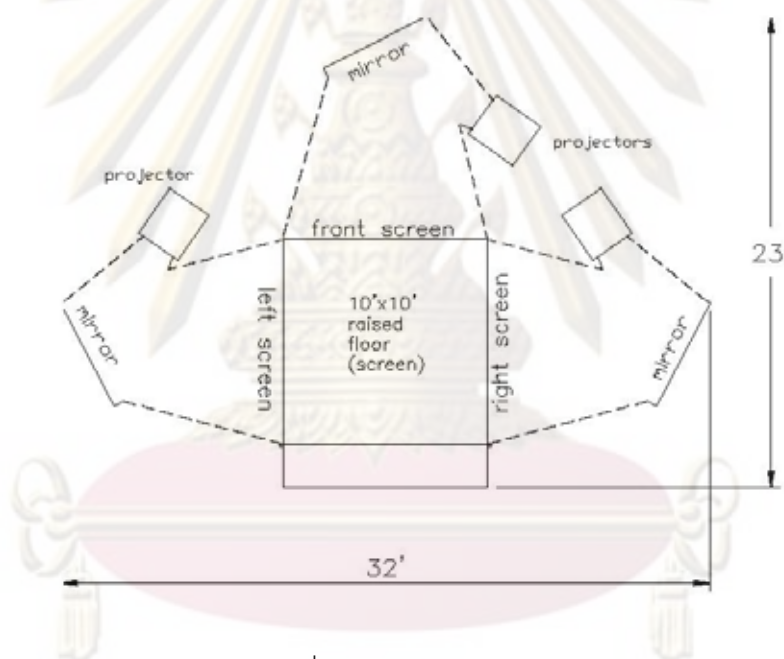


รูปที่ 2.20: รุ้งสีจากเครื่องฉายภาพ DMD

ที่มา http://commons.wikimedia.org/wiki/File:DLP_rainbow_effect.JPG

2.2 ระบบ CAVE

ระบบ CAVE หรือห้องฉายภาพสามมิติแบบรอบทิศทาง เป็นการรวมเอาเทคโนโลยีการแสดงผลภาพสามมิติเข้ากับระบบติดตามตำแหน่งศีรษะ เพื่อสร้างเป็นห้องหรือถ้าเสมือนจริง ที่เมื่อผู้ชมได้เข้าไปอยู่ในถ้ำแล้ว ก็จะมีรู้สึกเหมือนตนอยู่ในโลกเสมือนนั้นจริงๆ ระบบ CAVE ระบบแรกได้รับการพัฒนาโดย Thomas A. DeFanti, Daniel J. Sandin และ Carolina CruzNeira แห่งห้องวิจัย Electronic Visualization Laboratory ณ University of Illinois at Chicago [6] ระบบ CAVE ได้ชื่อมาจากความหมายในหนังสือ The republic ของ Plato [23] ซึ่งถูกอธิบายในเชิงปรัชญาเกี่ยวกับการอนุมานความเป็นจริงจากการเห็นภาพฉายของสิ่งต่างๆ บนผนังถ้ำ ซึ่งคล้ายคลึงกับการทำงานของระบบ CAVE ที่เป็นการฉายภาพสองมิติบนผนังห้องแต่ผู้ใช้จะสามารถตีความภาพที่ได้เป็นวัตถุสามมิติ ระบบ CAVE ระบบแรกดังแสดงในรูป 2.21 ประกอบด้วยฉากฉายภาพจำนวน 3 ชุด ซึ่งมีขนาด 7x7x7 ฟุต และใช้ระบบติดตาม ตำแหน่งศีรษะแบบใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ร่วมกับระบบแว่นตัดเตอร์ และหลังจากนั้นระบบ CAVE อื่นๆ ก็ได้รับการพัฒนาต่อมา



รูปที่ 2.21: ระบบ CAVE [6]

ที่มา <http://www.evl.uic.edu/pape/CAVE>

2.3 งานวิจัยและการพัฒนาของระบบติดตามตำแหน่ง

2.3.1 ระบบติดตามตำแหน่ง Tracker System

ในระบบ CAVE การที่จะฉายภาพสามมิติได้อย่างสมจริงนั้น จำเป็นจะต้องทราบตำแหน่งของศีรษะผู้ชม (head tracking) เพื่อใช้ในการวาดภาพสามมิติให้สัมพันธ์กับมุมมอง ตามทฤษฎีการวาดภาพแบบทัศนมิติ การที่สามารถระบุตำแหน่งอย่างแม่นยำจะทำให้ภาพที่ปรากฏสามารถวาดได้อย่างถูกต้องสัมพันธ์กับมุมมองของผู้ชม ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าระบบติดตามตำแหน่งที่โซ่ร่วมกับระบบฉายภาพสามมิติเป็นระบบที่สำคัญอย่างมากในการแสดงผลภาพสามมิติ

โดยทั่วไประบบระบุตำแหน่งศีรษะที่ใช้ในงานระบบฉายภาพสามมิตินั้นจะมีจุดเด่น ที่แตกต่างกับระบบติดตามตำแหน่งที่ใช้ในงานทั่วไปหลายประการ ทั้งทางด้านความแม่นยำ การตอบสนองที่รวดเร็ว ความกะทัดรัดคล่องตัวในการใช้งาน และราคา จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้การพัฒนาาระบบติดตามตำแหน่งศีรษะสำหรับระบบฉายภาพสามมิติ เป็นหัวข้อหนึ่งที่มีความสนใจทั้งทางด้านการวิจัยและทางธุรกิจ

ในยุคแรกระบบติดตามตำแหน่งศีรษะ ดังในงานวิจัย The Ultimate Display [5] เป็นระบบที่ใช้ระบบติดตามตำแหน่งแบบกลไกเชิงกล เช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ เช่น Fish Tank VR [15] เนื่องจากการใช้ระบบกลไกเชิงกลทำให้เกิดความไม่คล่องตัวในการทำงาน เพราะประกอบด้วยแขนขนาดใหญ่ทำหน้าที่ในการวัดตำแหน่ง ทำให้มีน้ำหนักมาก จึงเกิดการพัฒนาต่อมา โดยเป็นการประยุกต์ระบบติดตามตำแหน่งรูปแบบอื่นๆ เช่นระบบคลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic) [16, 24, 25] ระบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [7, 26, 27] ระบบทางแสง [8, 28—33] ระบบที่ได้รับการพัฒนาต่อมานั้น ล้วนแล้วแต่มีข้อเด่นข้อย่อยแตกต่างกันไป

ความแม่นยำของระบบติดตามตำแหน่งศีรษะเมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบฉายภาพสามมิตินั้น จากการศึกษาในงานวิจัยต่างๆ เช่นในงานวิจัย [34] ซึ่งเป็นการศึกษาระบบติดตามตำแหน่งรูปแบบต่างๆ พบว่าระบบติดตามตำแหน่งแต่ละรูปแบบนั้นมีความแม่นยำที่แตกต่างกัน อีกทั้งค่าความแม่นยำยังแปรผันโดยมีรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่นระบบติดตามตำแหน่งด้วยแสงที่ประสบอุปสรรคเนื่องจากปัญหา line of sight หรือปัญหาที่เกิดจากเมื่อระยะห่างของตัวเซนเซอร์และมาร์คเกอร์ห่างกันมาก จะทำให้ความแม่นยำตกลงอย่างมากตามทฤษฎีทางเรขาคณิตของการฉายภาพแบบทัศนมิติที่ใช้ในการคำนวณในระบบดังกล่าว

ในงานวิจัยของ [16] ได้ใช้ระบบติดตามตำแหน่งศีรษะแบบคลื่นเสียงความถี่สูง และได้ทำการศึกษาค่าระยะ intraocular หรือระยะห่างระหว่างตาทั้งสองข้าง ซึ่งมีค่าอยู่ประมาณ 6.3 เซนติเมตรสำหรับมนุษย์โดยทั่วไป อาจมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ในระยะ 2.6 เซนติเมตร จากระยะดังกล่าวเป็นระยะที่ทำให้เกิดภาพความคลาดต่างที่ทำให้เกิดการเห็นเป็นภาพสามมิติ จากระยะดังกล่าวทำให้ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งมุมมอง ในระดับไม่กี่เซนติเมตรสามารถทำให้ภาพที่เห็นเกิดความผิดเพี้ยนอย่างมากได้ ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจึงเป็นข้อกำหนดสำคัญ ในการออกแบบระบบติดตามตำแหน่งสำหรับระบบฉายภาพสามมิติ

เมื่อระบบฉายภาพสามมิติมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้ภายในระบบประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ต่างๆทำงานประสานกัน การที่ต้องใช้อุปกรณ์หลายชนิดนั้นทำให้การประสานการทำงาน (synchronization) และการรับส่งข้อมูลเกิดเวลาแฝง (latency) ในการประมวลผลขึ้น จากงานวิจัย [35] ที่ศึกษาผลกระทบของความล่าช้าในการตอบสนองต่อคำสั่ง (lag time) ของระบบอินพุตและเอาต์พุตของระบบโลกเสมือนจริง พบว่าระยะเวลาแฝงที่ยอมรับได้สำหรับผู้ใช้ที่ไม่มีประสบการณ์และมีประสบการณ์คือประมาณ 100 ms และ 1000 ms ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาประกอบกับงานวิจัยและอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นในระบบแสดงผลสามมิติแล้ว ทำให้เห็นถึงอุปสรรคในการพัฒนาระบบติดตามตำแหน่งศีรษะ ที่เหมาะสมกับระบบฉายภาพสามมิติ

ราคา เป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการเลือกใช้ระบบติดตามตำแหน่ง เนื่องจากระบบที่มีคุณภาพสูงนั้น อาจจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เซนเซอร์ต่างๆที่ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะ ในงานวิจัย [34] ได้จัดให้อุปกรณ์ติดตามตำแหน่งเชิงแสงนั้นเป็นระบบติดตามตำแหน่งที่แพงที่สุด เนื่องจากต้องอาศัยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง เนื่องจากต้องการให้สามารถระบุตำแหน่งได้อย่างฉับไว

จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ระบบติดตามตำแหน่งที่ใช้ในงานทางด้านระบบแสดงผลภาพสามมิตินั้น ได้รับความสนใจในการพัฒนาอย่างมาก อีกทั้งด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีในสาขาต่างๆ ในปัจจุบัน ทำให้ระบบติดตามตำแหน่งรูปแบบต่างๆ มีความน่าสนใจ อุปกรณ์ และเทคนิคใหม่ๆ ได้ถูกทดลองนำมาใช้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจากงานวิจัย [34] จึงได้ทำการเปรียบเทียบระบบติดตามตำแหน่งรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในตาราง 2.1

TECHNOLOGY	DESCRIPTION	STRENGTHS	WEAKNESSES
Mechanical	Measure change in position by physically connecting the remote object to a point of reference with jointed linkages	Accurate Low lag No line of sight (LOS) problems No magnetic interference problems Good for tracking small volumes accurately	Intrusive, due to tethering Subject to mechanical part wear-out
Magnetic	Use sets of coils (in a transmitter) that are pulsed to produce magnetic fields Magnetic sensors (in a receiver) determine the strength and angles of the fields Pulsed magnetic field may be AC or DC	Inexpensive Accurate No LOS problems Good noise immunity Map whole body motion Large ranges; size of a small room	Ferromagnetic and/or metal conductive surfaces cause field distortion Electromagnetic interference from radios Accuracy diminishes with distance High latencies due to filtering
Inertial	Use accelerometers and gyroscopes. Orientation of the object is computed by jointly integrating the outputs of the rate gyros whose outputs are proportional to angular velocity about each axis. Changes in position can be computed by double integrating the outputs of the accelerometers using their known orientations	Unlimited range Fast No LOS problems No magnetic interference problems Senses orientation directly Small size Low cost	Only 3 DOF Drift Not accurate for slow position changes

TECHNOLOGY	DESCRIPTION	STRENGTHS	WEAKNESSES
Optical	Use a variety of detectors, from ordinary video cameras to LEDs, to detect either ambient light or light emitted under control of the position tracker. Infrared light is often used to prevent interference with other activities	High availability Can work over a large area Fast No magnetic interference problems High accuracy	LOS necessary Limited by intensity and coherence of light sources High weight Expensive
Radio / GSM based location	Use three or more transmission radio emitters to compute the distance between a source and receiver via triangulation. Can use different modalities to obtain the location: measuring signal attenuation, angle of arrival, time difference of arrival	Inexpensive because the existing GSM infrastructure can be used. Light weight	Radio noise interference Low accuracy Problem with multi-path reception and interference
Sourceless, Noninertial	Use passive magnetic sensors, referenced to the earth's magnetic field, to provide measurement of roll, pitch, and yaw, and as a derivative, angular acceleration and velocity	Inexpensive Transmitter not necessary Portable	Only 3 DOF Difficult to mark movement between magnetic hemispheres
Acoustic (Ultrasonic)	Use three microphones and three emitters to compute the distance between a source and receiver via triangulation. Use ultrasonic frequencies (above 20 kHz) so that the emitters will not be heard	Inexpensive No magnetic interference problems Light weight	Ultrasonic noise interference Low accuracy since speed of sound in air varies with environmental conditions Echoes cause reception of "ghost" pulses LOS necessary

ตารางที่ 2.1: เปรียบเทียบระบบติดตามและระบุตำแหน่งรูปแบบต่างๆ ในงานวิจัย [34]

2.3.2 ระบบติดตามตำแหน่งเชิงกล

ระบบแสดงผลภาพสามมิติในยุคแรกนั้น เช่นระบบ The Ultimate Display [5] และ Fish Tank VR [15] ได้ใช้ระบบติดตามตำแหน่งเชิงกลในการทำงาน ดังแสดงในรูป 2.22(ก) และ 2.22(ข) ระบบดังกล่าวประกอบด้วยข้อต่อจำนวนสามจุด บนกลไกกันตอสองแขน ซึ่งสามารถระบุตำแหน่งได้ในทุกองศาอิสระ การระบุตำแหน่งเชิงมุมของแต่ละข้อต่อนั้นจะอาศัยตัวต้านทานปรับค่าได้ (potentiometer) ในการวัดมุมองศาและทำการเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า



(ก) The Ultimate Display



(ข) Fish Tank VR

รูปที่ 2.22: ระบบระบุตำแหน่งเชิงกล [5, 15]

ที่มา <http://design.osu.edu/carlson/history/lesson17.html>

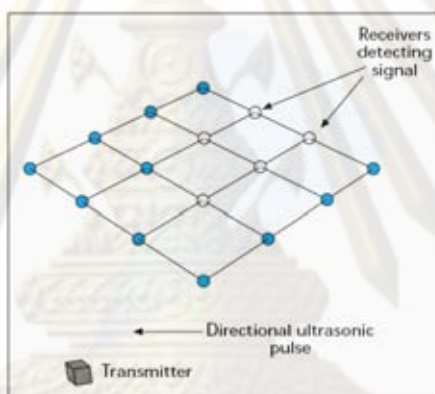
ในงานวิจัย [15] ได้ทำการทดลองวัดผลความสามารถในการทำงานในสภาวะแวดล้อมสามมิติ โดยแบบทดสอบหนึ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือการให้ผู้ทดลองทำการลากเส้นตามกิ่งต่างๆของต้นไม้ที่ปรากฏในจอแสดงผล ต้นไม้ภายในจอแสดงผลจะปรากฏภาพของต้นไม้สองต้น ซึ่งมีกิ่งที่วางทับกันเป็นบางส่วน เมื่อมองในมุมมองสองมิติ ผู้ใช้จะต้องติดตามและลากจากกิ่งไม้ใดๆ ไปยังรากของต้นไม้ โดยต้องไม่มีการกระโดดข้ามไปยังต้นไม้อีกต้นที่ปรากฏ การวิจัยนี้ทำให้สามารถตรวจวัดความสามารถในการรับรู้เชิงสามมิติของมนุษย์ อีกทั้งยังสามารถวัดการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้กับระบบแสดงผลได้ จากการทดลองดังแสดงในตาราง 2.2 พบว่าระบบติดตามตำแหน่งศีรษะนั้นส่งผลอย่างเห็นได้ชัดในการรับรู้ภาพสามมิติของผู้ทดลอง โดยในงานวิจัยดังกล่าวยังได้อภิปรายผลกระทบที่เกิดจากระบบติดตามตำแหน่งที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับรู้ ที่มากกว่าผลกระทบจากระบบการวาดสามมิติ

Error data	% errors
1 Picture	21.8
2 Stereo only	14.7
3 HC monocular	3.7
4 HC binocular	2.7
5 HC + stereo	1.3

ตารางที่ 2.2: ผลกระทบจากระบบติดตามตำแหน่งศีรษะจากงานวิจัย [15]

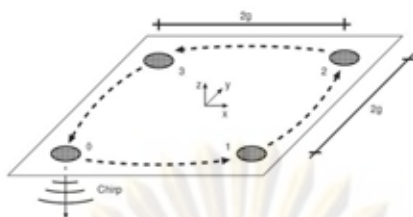
2.3.3 ระบบติดตามตำแหน่งโดยคลื่นเสียงความถี่สูง

ระบบติดตามตำแหน่งโดยคลื่นเสียงความถี่สูงหรือ ultrasonic ใช้หลักการของการวัดระยะเวลาของการเดินทางของเสียงในอากาศ โดยจากระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางนั้น จะสามารถนำมาคำนวณเป็นตำแหน่งได้ ดังแสดงในงานวิจัยเช่นงานของ [16] เป็นการสร้างระบบแสดงผลภาพสามมิติความละเอียดสูง งานวิจัยของ [24] ซึ่งเป็นการออกแบบระบบติดตามตำแหน่งคลื่นเสียงความถี่สูงโดยปราศจากระบบสัญญาณวิทยุ หรือในงานวิจัยของ [25] ที่ใช้การฝังโครงข่ายของตัวส่งสัญญาณคลื่นเสียงความถี่สูงไวบนเพดานห้อง งานวิจัย [25] นี้ ได้นำเสนอการใช้การฝังตัวรับสัญญาณคลื่นเสียงความถี่สูงไวบนฝ้าเพดาน ดังแสดงในรูป 2.23 คลื่นเสียงความถี่สูงจะถูกส่งออกมาจากอุปกรณ์ส่งเสียง ซึ่งเคลื่อนที่ไปมาบริเวณห้อง โดยจะส่งสัญญาณทุกๆ 195ms และตัวรับจะทำการคำนวณหาตำแหน่งจากระยะเวลาที่แตกต่างกันที่เสียงเดินทางมาถึงตัวรับตัวต่างๆ ระบบดังกล่าวมีค่าความถี่ในการประมวลผลที่ต่ำ และมีปัญหาในเรื่องของการวางโครงข่ายของตัวรับสัญญาณที่จำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อสัญญาณที่วัดได้ แล้วส่งค่ามาประมวลที่ส่วนกลาง ซึ่งต้องกระทำในระยะเวลาที่จำกัด หรือปัญหาในการประสานจังหวะเวลา ของตัวรับคลื่นเสียงความถี่สูง



รูปที่ 2.23: โครงข่ายระบบตัวรับเสียงความถี่สูง [25]

งานวิจัย [24] ได้ทำการพัฒนาระบบติดตามตำแหน่งโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ปราศจากการใช้สัญญาณวิทยุ ซึ่งในทั่วไปการทำงานของระบบติดตามตำแหน่งโดยอาศัยคลื่นเสียงความถี่สูงจะใช้การวัดระยะเวลาในการเดินทางของเสียง โดยทำการอ้างอิงกับสัญญาณวิทยุหรือสัญญาณ chirps ดังแสดงในรูป 2.24 งานวิจัยนี้ใช้การส่งข้อมูลโดยตัวส่งเสียงความถี่สูง 40kHz และสร้างสัญญาณ chirps ทุกๆ 1ms และใช้ตัวส่งเสียงจำนวนหลายตัวซึ่งจะผลัดกันส่งสัญญาณคล้ายกับระบบ GPS โดยมีระยะเวลาระหว่างตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวเท่ากับ 50ms ทำให้ตัวรับซึ่งเป็นส่วนของอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ที่สามารถระบุตำแหน่งของตัวเองได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสัญญาณเสียงที่วัดได้ การวางตัวของตัวส่งสัญญาณในงานวิจัยนี้มีความอิสระสูง เนื่องจากระบบสามารถประสานจังหวะในการทำงานได้เองอยู่แล้ว ไม่ต้องทำการเชื่อมต่อโครงข่ายเขาดวยกัน อีกทั้งการประมาณตำแหน่งนั้น จะใช้ Extended Kalman Filter ซึ่งใช้การประมาณการ โดยอาศัยการประมาณรูปแบบการเคลื่อนที่เชิงฟิสิกส์ ในการคำนวณต่างๆ ทำให้สามารถวางตำแหน่งของตัวส่งสัญญาณได้อิสระ ไม่ต้องกำหนดรูปแบบใดๆ

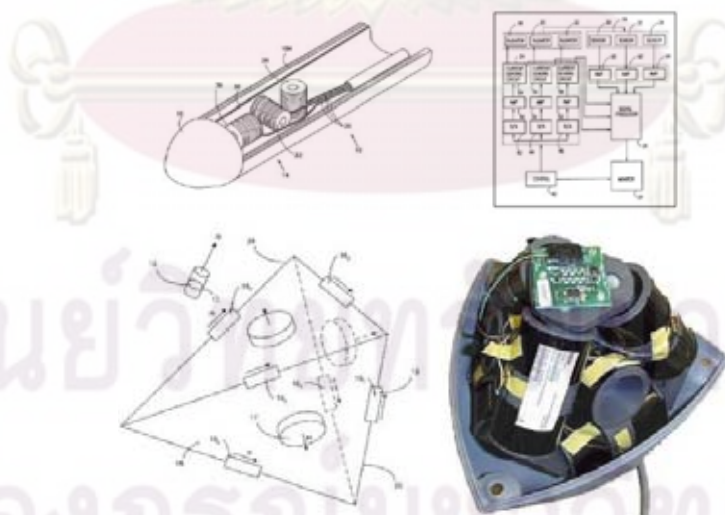


รูปที่ 2.24: โครงข่ายระบบตัวรับเสียงความถี่สูงแบบไรต์ว่ประสานจังหวะ [24]

ในงานวิจัยนี้ยังได้ทดลองใช้ระบบประมวลผลฝังตัว StrongARM (200 MHz ซึ่งใช้กำลังการประมวลผลเพียง 4% ของทั้งหมด ซึ่งผู้วิจัยได้เสนอถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบติดตามตำแหน่งโดยใช้เทคนิคดังกล่าว ซึ่งอาศัยเพียงหน่วยประมวลผลฝังตัว (embedded system) ที่มีขนาดเล็กและประหยัดพลังงานมากขึ้น ระบบที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถระบุตำแหน่งได้ในระดับ 10cm ซึ่งเมื่ออ้างอิงจากงานวิจัยของ [16] ค่าที่ได้นั้นยังมากเกินไปสำหรับการใช้งานกับระบบฉายภาพสามมิติ

2.3.4 ระบบการติดตามตำแหน่งโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ระบบการติดตามตำแหน่งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้การวัดกำลังหรือรูปแบบของสนามแม่เหล็กที่สร้างจากตัวส่งสัญญาณ รูปแบบต่างๆของระบบติดตามตำแหน่งโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอาจเป็นการใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งติดตั้งอยู่กับที่ และใช้เสาอากาศหรือขดลวดที่ติดตั้งอยู่กับวัตถุที่ต้องการวัดตำแหน่งในการวัดสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณ ดังแสดงในรูป 2.25



รูปที่ 2.25: อุปกรณ์ติดตามตำแหน่งด้วยสนามแม่เหล็กของบริษัท Biosense Catheter และ NDI Aurora [26]

ในงานวิจัย [26] ได้ทำการวัดประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่างๆ ซึ่งได้แสดงถึงความแม่นยำของระบบติดตามและระบุตำแหน่งโดยสนามแม่เหล็กที่สามารถใช้กับระบบแสดงผลสามมิติได้ ดังแสดงในตาราง 2.3

	<i>Northern Digital Aurora</i> ¹	<i>Polhemus Fastrak</i> ²	<i>Ascension MiniBIRD</i> ³
Field Type	AC Field	AC Field	Pulsed DC Field
DoF	5DoF / 6DoF	6DoF	6DoF
Accuracy (5DoF)	Pos: 0.7mm RMS Ori: 0.3° RMS	N/A	N/A
Accuracy (6DoF)	Pos: 0.9mm RMS Ori: 0.8° RMS	Pos: 0.76mm RMS Ori: 0.15° RMS	Pos: 1.8mm RMS Ori: 0.5° RMS
# Sensors	8 (5DoF) 4 (6DoF)	4 per unit (can daisy chain)	2 per unit (can daisy chain)
Sample Rate	45 Hz (1-5 sensors) 22 Hz (6-8 sensors)	120 #sensors Hz	120 Hz
Range	500mm	1520mm	+/- 760mm
Sensor Size	0.8 \varnothing x 10mm (5DoF)	23 x 28 x 15mm	10 x 5 x 5mm
Examples of EM trackers with comparative specifications			

¹ Specifications from Northern Digital datasheet available at <http://www.ndigital.com/aurora.php>

² Specifications from Polhemus datasheet available at <http://www.polhemus.com/fastrak.htm>

³ Specifications from Ascension datasheet available at <http://www.ascension-tech.com/products/microbird.php>

ตารางที่ 2.3: ตารางเปรียบเทียบระบบติดตามตำแหน่งด้วยสนามแม่เหล็ก [26]

การพัฒนา รูปแบบของการสร้างสนามแม่เหล็กนั้น โดยทั่วไประบบติดตามตำแหน่งด้วยสนามแม่เหล็กอาจใช้การวัดระดับความแรงสัญญาณหรือแอมพลิจูด ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดได้ ระดับความแรงสัญญาณนี้สามารถถูกรบกวนได้ง่าย โดยวัสดุที่มีคุณสมบัติทางสนามแม่เหล็กเช่นโลหะต่างๆ หรืออาจโดนรบกวนจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กอื่นๆ (electromagnetic interference) ได้ ซึ่งแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเหล่านี้สามารถพบทั่วไป เช่นหม้อแปลงหรือระบบจุดหลอดไฟ ทำให้ในการใช้งานต้องคอยควบคุมสภาพแวดล้อมให้ปราศจากวัสดุและแหล่งสัญญาณรบกวน ดังนั้นในงานวิจัยของ [27] ได้นำเทคนิคในการสร้างสนามแม่เหล็กสำหรับระบบระบุตำแหน่งรูปแบบใหม่โดยใช้เฟสของการหมุนของสนามแม่เหล็กในการระบุตำแหน่ง ซึ่งจะให้ค่าตำแหน่งเชิงมุมของตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณแต่ทว่าในทางปฏิบัติ เพื่อให้ระบบดังกล่าวทำงานได้ ความถี่ของสัญญาณพาหะที่สูงและการประมวลผลนั้นมีความซับซ้อน ทำให้สามารถทำได้ยาก ส่งผลต่อต้นทุนของระบบ อีกทั้งปัญหาเรื่องความปลอดภัย

ในการการประยุกต์ระบบระบุตำแหน่งโดยใช้สนามแม่เหล็กกับระบบ CAVE ได้มีงานวิจัยหลายชิ้น [7] ได้ทำการทดลองและประสบผลเป็นอย่างดี โดย [7] เป็นงานวิจัยแรกๆ ที่ทำการพัฒนาระบบอินพุตและระบบแสดงผลสามมิติโดยใช้อุปกรณ์ระบุตำแหน่งโดยสนามแม่เหล็ก ต่อมาระบบ CAVE ได้นำเอาระบบติดตามตำแหน่งด้วยสนามแม่เหล็กเข้าไปใช้ โดยในงาน CAVE นั้นจะเป็นการใช้ระบบสนามแม่เหล็กภายในห้อง CAVE ซึ่งสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้และมีพื้นที่จำกัด ทว่าระบบติดตามตำแหน่งก็เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง ทำให้ในการประยุกต์โดยทั่วไป

สามารถทำได้ยาก

นอกจากข้อบกพร่องต่างๆ ของระบบติดตามตำแหน่งด้วยสนามแม่เหล็กที่ได้กล่าวมานั้น อีกปัญหาหนึ่งคือเรื่องของคุณภาพของการใช้สนามแม่เหล็ก เพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ ระดับความแรงของสัญญาณที่ใช้ต่อระดับสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio, SNR) นั้นต้องมีค่าที่สูง ทำให้ในหลายๆระบบ จำเป็นจะต้องเพิ่มความแรงของสัญญาณประกอบกับเพื่อให้มีค่าความแม่นยำที่สูงจึงจำเป็นต้องทำการลดความถี่ในการทำงาน ส่งผลให้กำลังของสนามแม่เหล็กต้องสูงขึ้นตาม ซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายต่อการใช้งานในเด็กหรือสตรีมีครรภ์ จากข้อตระหนักดังกล่าวและราคาที่สูง ทำให้เกิดอุปสรรคในการประยุกต์กับระบบ CAVE ราคาถูก

2.3.5 ระบบระบุตำแหน่งโดยใช้แสง

ระบบติดตามและระบุตำแหน่งเชิงแสง เป็นระบบที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีของคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (computer vision) ความสามารถในการประมวลผล และความปลอดภัยในการใช้งาน ระบบติดตามและระบุตำแหน่งด้วยแสงนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ มีเทคนิคและวิธีการทำงานที่หลากหลาย ทำให้เกิดความนิยมในการวิจัย เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบแสดงผลภาพสามมิติ ระบบการติดตามและระบุตำแหน่งด้วยแสงสามารถแบ่งได้เป็นดังนี้

ระบบการติดตามและระบุตำแหน่งเชิงแสงโดยใช้การติดตั้งมาร์คเกอร์อินฟราเรดไว้บนวัตถุเคลื่อนที่ เป็นระบบการติดตามตำแหน่งเชิงแสงแบบหนึ่งที่ได้รับความนิยมและถูกประยุกต์ใช้ในงานทางด้าน motion capture และงานระบบ CAVE การทำงานนั้นจะใช้การส่องแสงอินฟราเรดไปยังตัวมาร์คเกอร์ที่ติดตั้งอยู่หรืออาจใช้ไดโอดเปล่งแสง (LED) ในการกำเนิดแสงได้ ดังแสดงในรูป 2.26 ลูกบอลหรือมาร์คเกอร์อินฟราเรดนั้นจะถูกติดตั้งไว้บนจุดต่างๆ ที่ต้องการทำการระบุตำแหน่ง โดยแสงจากแหล่งกำเนิดจะถูกส่งไปกระทบและสะท้อนกลับมายังกล้อง กล้องอินฟราเรดความเร็วสูงจะทำการถ่ายภาพ และทำการหาตำแหน่งของมาร์คเกอร์ที่ปรากฏบนภาพตำแหน่งที่ได้นั้นจะถูกนำไปคำนวณเป็นพิกัด เพื่อนำไปหาตำแหน่งของมาร์คเกอร์ในโลกจริง ในการคำนวณนั้นจะต้องใช้กล้องมากกว่าหนึ่งตัวในการระบุตำแหน่งอีกทั้ง กล้องที่ใช้ในระบบนี้มีราคาที่สูงเนื่องจากต้องมีความเร็วในการตอบสนองสูง ในหลายกรณีที่มีมาร์คเกอร์มีโอกาสถูกบดบังโดยวัตถุอื่นๆ ได้ ทำให้ต้องเพิ่มจำนวนของกล้อง ทำให้เพิ่มต้นทุนของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก

ในงานการแสดงผลภาพสามมิติ งานวิจัยหลายชิ้น ได้ทำการทดลองและพัฒนา โดยมีเป้าหมายที่จะลดต้นทุนของระบบ เช่นในงานวิจัยของ [28—31] โดยงานวิจัยที่ได้กล่าวมานี้ เป็นการประยุกต์ใช้งานกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวที่มีโดยทั่วไปตามท้องตลาดมาใช้ในการระบุตำแหน่งร่วมกับกระบวนการประมวลผลภาพ (image processing)



รูปที่ 2.26: ระบบ Motion Capture ที่ใช้มาร์คเกอร์อินฟราเรด

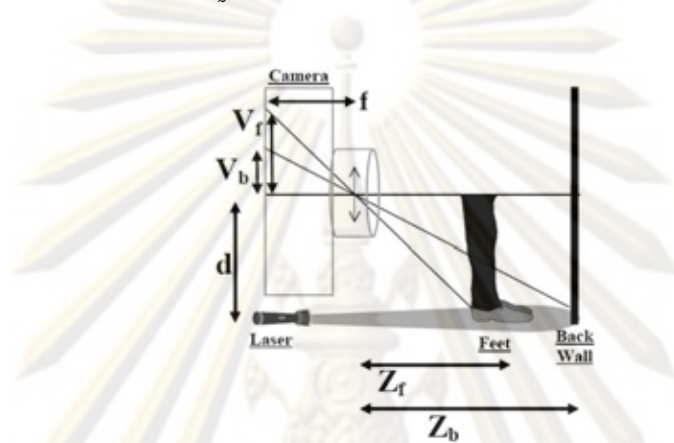
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:MotionCapture.jpg>

งานวิจัย [28, 30] เป็นงานวิจัยที่มีความคล้ายคลึงกันในการทำงาน แตกต่างกันในวิธีในการคำนวณหาตำแหน่งของผู้ชมจากมาร์คเกอร์ โดยในงานวิจัย [28] ได้ใช้การวัดตำแหน่งของจุดสามจุดในการระบุตำแหน่งของผู้ชม โดยอาศัยกล้องจำนวนสองตัว ภาพที่ได้จากกล้องทั้งสองตัวจะถูกนำมาคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างจุดซึ่งจะสามารถนำมาคำนวณหาตำแหน่งของแว่นได้ วิธีนี้แตกต่างกับงานวิจัยของ [30] ซึ่งใช้ระบบมาร์คเกอร์แบบตารางในการหาตำแหน่ง ในงานวิจัย [28] ได้ทำการทดลองระบบติดตามตำแหน่งร่วมกับระบบแสดงผลสามมิติแบบแว่นชุดเตอร์ ซึ่งพบว่าความต่อเนื่องจากการใช้งานกล้องที่มีอยู่ทำให้ความเร็วในการทำงานของระบบนั้น อยู่ที่ประมาณ 30fps ซึ่งมีค่าประวิงในการประมวลผลอยู่ที่ 66ms ตัวอย่างดังแสดงในรูป 2.27



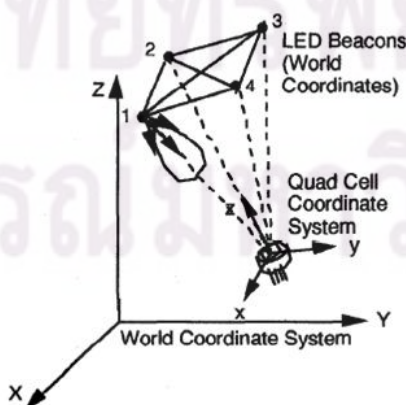
รูปที่ 2.27: ระบบติดตามตำแหน่งโดยใช้มาร์คเกอร์สามจุด [28]

ในงานวิจัยของ [29] เป็นการประยุกต์ใช้งานกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวกับระบบ CAVE ซึ่งใช้การฉายลำแสงเลเซอร์โดยให้ตัดกับตำแหน่งของขาของผู้ชม ดังรูป 2.28 แล้วจึงถ่ายภาพที่ได้ นำเอามาคำนวณหาตำแหน่งของผู้ชมผ่านทางวิธีการคำนวณเรขาคณิตของสามเหลี่ยม งานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอระบบที่มีต้นทุนที่ต่ำ แต่ก็ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมไม่สามารถนำมาใช้ในการหาตำแหน่งศีรษะได้ เนื่องจากอาจประสบกับปัญหาเรื่องความปลอดภัยในกรณีที่ลำแสงเลเซอร์ส่องเข้าสู่ดวงตา ระบบที่ได้ในงานวิจัยนี้สามารถระบุตำแหน่งได้โดยมีความคลาดเคลื่อน 10cm และมีความเร็วในการทำงานเพียง 20Hz

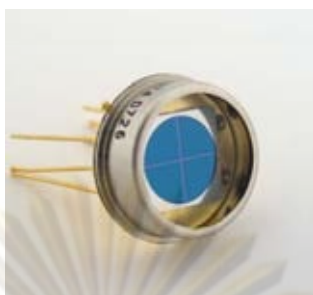


รูปที่ 2.28: ระบบติดตามตำแหน่งโดยการหาจุดตัดของลำเลเซอร์ [29]

จากระบบที่ได้กล่าวมานั้นจะเป็นการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพไว้อยู่หนึ่งกับที่ ซึ่งในงานวิจัยหลายชิ้นได้นำเสนอแนวทางที่กลับกันสำหรับระบบ CAVE คือการนำเอาอุปกรณ์ถ่ายภาพติดตั้งไว้ในส่วนเคลื่อนที่ ดังเช่นในงานวิจัยของ [31] ซึ่งเป็นการใช้ไดโอดไวแสงที่มีหน่วยรับแสงหลายหน่วยในตัวเดียวกันดังรูป 2.29 ในการระบุตำแหน่งนั้นจะใช้การวัดปริมาณของแสงที่ส่องจากหลอดไดโอดกำเนิดแสงที่ติดตั้งอยู่บนเพดาน โดยหลอดไดโอดกำเนิดแสงจะทำการติดตั้งสลับกันไป ที่ละดวง แสงที่ส่องมายังตัวไดโอดไวแสงที่ประกอบด้วยหน่วยรับแสงหลายหน่วยดังรูป 2.30 แสงจะลอดผ่านช่องเล็กๆ ซึ่งจะทำให้ปริมาณของแสงที่ตกกระทบหน่วยรับแสงแต่ละหน่วยนั้นมีค่าที่ต่างกัน ทำให้สามารถนำมาคำนวณเป็นมุมมองสารระหว่างไดโอดกำเนิดแสงและตัวไดโอดไวแสงได้

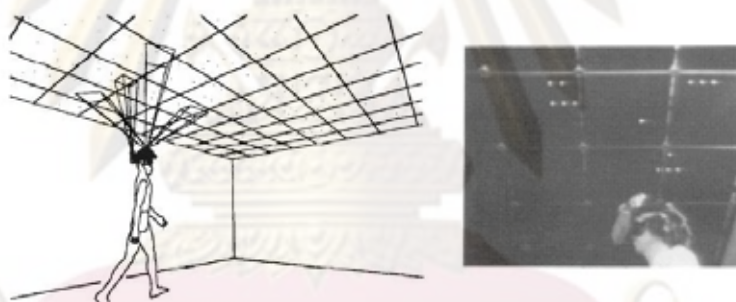


รูปที่ 2.29: หลักการทำงานของระบบติดตามตำแหน่งโดยการควบคุมการเปิดปิดของ LED [31]



รูปที่ 2.30: ไดโอดไวแสงแบบหลายหน่วยของบริษัท Pacific Silicon Sensor
ที่มา Pacific Silicon Sensor

การพัฒนาต่อมาคือการใช้กล้องที่ติดตั้งบนศีรษะ ดังในงานวิจัยของ [33] ซึ่งใช้การคำนวณตำแหน่งศีรษะจากภาพของกล้องที่ถ่ายได้ ระบบมาร์คเกอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหลอดไดโอดเปล่งแสงที่ถูกติดตั้งอย่างมีรูปแบบบนเพดานห้อง ดังรูป 2.31 ระบบจะทำการระบุตำแหน่งโดยการวิเคราะห์รูปแบบของการส่องสว่างของหลอดไดโอดเปล่งแสงที่เห็น จากระบบที่ได้สามารถทำการระบุตำแหน่งได้ในระดับความแม่นยำที่ $2mm$ และ 0.2° ภายใต้ความเร็วในการตอบสนอง $20ms$ ถึง $60ms$ ข้อเสียที่พบในงานดังกล่าวคือมุมมองศาที่ค่อนข้างจำกัดเมื่อผู้ชมอยู่ใกล้บริเวณมุมของห้อง



รูปที่ 2.31: ระบบระบุตำแหน่งเชิงแสงโดยการติดตั้งกล้องบนศีรษะ [33]

งานวิจัยต่อมาคืองานวิจัยของ [8] ซึ่งเป็นการพัฒนาระบบติดตามตำแหน่งศีรษะสำหรับระบบแสดงผลภาพสามมิติที่มีผู้ใช้หลายคน เมื่อจำนวนผู้ใช้มากขึ้นและทำการติดตั้งหลอดไดโอดเปล่งแสงไว้บนเพดานห้องและกล้องเป็นส่วนเคลื่อนจะให้ผลที่ดีกว่าการระบุตำแหน่งด้วยระบบที่กล้องติดตั้งอยู่กับที่ เนื่องจากการติดตั้งกล้องไว้กับที่将有ความยุ่งยากจากที่ต้องมีวัตถุให้ติดตามมากขึ้น แต่อุปสรรคสำคัญของการติดตั้งกล้องไว้ในส่วนเคลื่อนที่คือ มุมมองของภาพที่ปรากฏ

2.3.6 ระบบการติดตามตำแหน่งรูปแบบอื่นๆ

ระบบการติดตามตำแหน่งเชิงแสงที่ใช้ความเร็วในการเดินทางของแสง (time of flight, TOF) ระบบนี้จะให้หลักการคำนวณระยะทางที่ห่างโดยอาศัยการจับเวลาในการเดินทางของแสง จากตัวส่งไปยังตัวรับ โดยในระบบดังกล่าวโดยทั่วไปจะใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ในการสร้างพัลส์ของแสง ทำให้มุมมองของการวัดมีจำกัด ทำให้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบ CAVE แต่เนื่องจากการพัฒนาของเทคโนโลยีทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์จึงได้มีระบบระบุตำแหน่งหรือถ่ายภาพสามมิติ SwissRangerTM ของบริษัท MESA Imaging AG เพื่อที่จะพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถหาระยะโดยใช้หลักการ การจับเวลาเดินทางของแสงโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดไดโอดกำเนิดแสง ดังแสดงในรูป 2.32



รูปที่ 2.32: ระบบถ่ายภาพสามมิติ SwissRangerTM

ที่มา www.mesa-imaging.ch

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

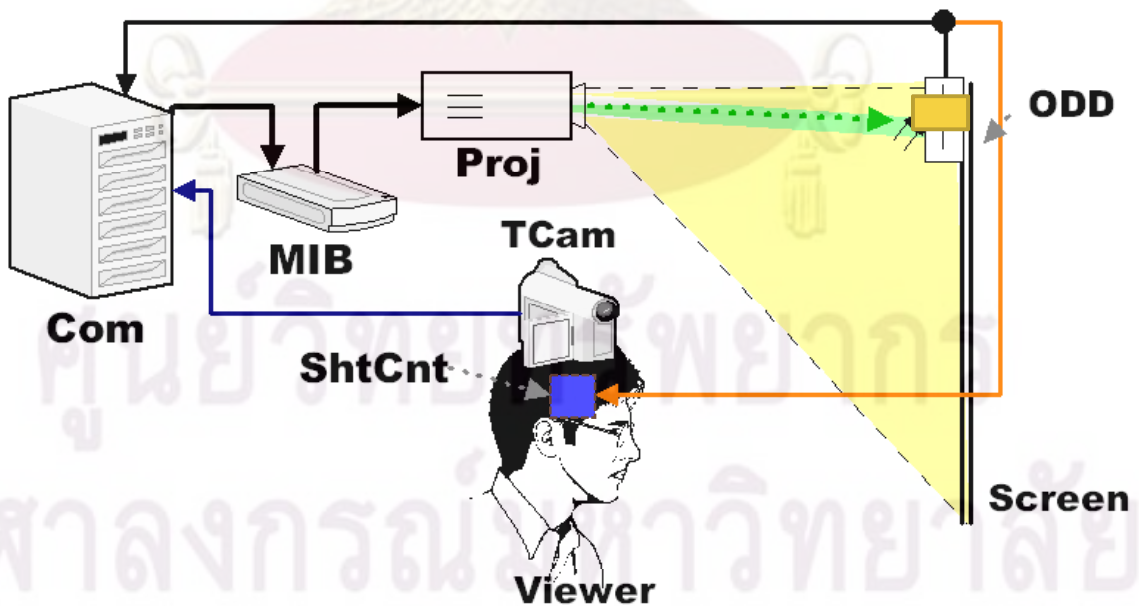
แนวคิดและการออกแบบ

จากความจำเป็นและความต้องการในการใช้งานระบบแสดงผลภาพสามมิติ ที่สามารถแสดงภาพสามมิติได้สมจริง เพื่อประโยชน์ใช้สอยทางด้านต่างๆ ทำให้ระบบแสดงผลภาพสามมิติเป็นหัวข้อในการวิจัยพัฒนาที่ได้รับความสนใจ โดยเฉพาะในแง่มุมมองของการลดต้นทุนของระบบจากการประยุกต์เอาเทคโนโลยีและเทคนิคใหม่ๆ เข้าไปใช้

แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดต่างๆ ของระบบที่มีตามท้องตลาดและราคาที่สูงตามที่ได้กล่าวมา ทำให้ในงานวิจัยนี้ มีแนวคิดในการพัฒนาระบบแสดงผลภาพสามมิติต้นทุนต่ำ ซึ่งเป็นการประยุกต์นำเอาอุปกรณ์ที่มีขายตามท้องตลาดมาใช้ร่วมกับเทคโนโลยีต่างๆ ที่มีในปัจจุบันให้สามารถเป็นระบบแสดงผลภาพสามมิติได้

การประยุกต์ใช้งานสร้างระบบแสดงผลภาพสามมิติแบบ Stereoscopic ที่ใช้การ์ดแสดงผลภาพสามมิติตามท้องตลาดโดยทั่วไป ร่วมกับเครื่องฉายภาพที่ใช้เทคโนโลยี DMD นั้นพบว่าประสบปัญหาหลายประการในการประยุกต์ โดยประกอบด้วยปัญหาความผิดพลาดของรูปทรงเมื่อผู้ชมมีการเปลี่ยนมุมมอง และปัญหาการประสานจังหวะสัญญาณระหว่างภาพที่ปรากฏกับการทำงานของแว่นชัตเตอร์ จึงทำให้เกิดแนวคิดในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการเพิ่มเติมอุปกรณ์และระบบต่างๆ เข้าไป ประกอบด้วย ระบบติดตามตำแหน่งผู้ใช้และระบบช่วยในการประสานจังหวะการเปิดปิดของแว่นชัตเตอร์

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาในขั้นต้น ในงานวิจัยนี้จึงขอนำเสนอระบบแสดงผลภาพสามมิติดังแสดงในรูป 3.1 โดยในระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1: ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

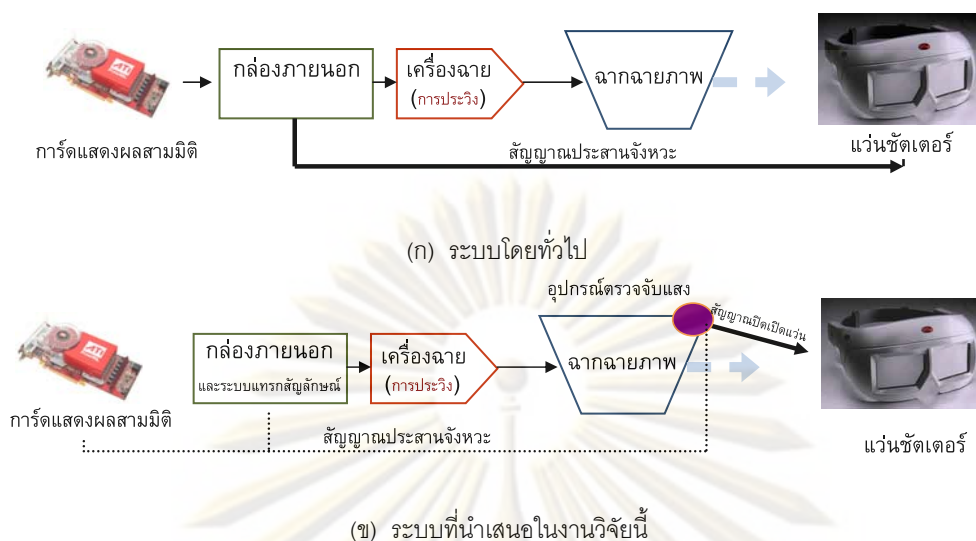
- ระบบประสานจังหวะการปิดเปิดของแว่นชัตเตอร์
 - แว่นชัตเตอร์
 - กล่องแทรกสัญญาณสัญลักษณ์ (Marker Insertion Box, MIB)
 - ตัวตรวจจับการปรากฏของสัญลักษณ์บนฉากรับภาพ (On-Display Dongle, ODD)
 - อุปกรณ์ควบคุมแว่นชัตเตอร์ (Shutter Glasses Controller, ShtCnt)
- ระบบติดตามตำแหน่ง
 - อุปกรณ์ติดตามตำแหน่งเชิงแสงติดตั้งอยู่บนศีรษะของผู้ชม (TCam)
 - มาร์คเกอร์แสงอินฟราเรดที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง
- อุปกรณ์พื้นฐานของระบบ
 - เครื่องคอมพิวเตอร์และการ์ดแสดงผลสามมิติที่มีความสามารถในการวาดภาพแบบ Stereoscopic
 - เครื่องฉายภาพโดยใช้เทคโนโลยี DMD

3.1 ระบบประสานจังหวะการทำงานของแว่นชัตเตอร์

ปัญหาการประสานจังหวะการปิดเปิดสัญญาณนั้น มีสาเหตุเกิดจากการทำงานภายในของเครื่องฉายภาพ ที่มีการเก็บและพักข้อมูลภาพก่อนที่จะทำการฉาย ทำให้ภาพที่ปรากฏบนหน้าจอ นั้นช้ากว่าภาพที่กำลังถูกส่งสัญญาณออกมาจากการ์ดแสดงผล จากความล่าช้าดังกล่าว ถ้าวัดระบบควบคุมแว่นชัตเตอร์ใช้สัญญาณที่มีจังหวะสัมพันธ์กับสัญญาณภาพที่ถูกส่งออกมาจากการ์ดแสดงผล ก็จะทำให้การปิดเปิดของแว่นชัตเตอร์ไม่ตรงกับจังหวะการปรากฏของภาพ ทำให้ควบคุมแว่นชัตเตอร์แบบเดิมไม่สามารถทำได้

จากสาเหตุดังกล่าววิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการแก้ไขปัญหา คือ การเปลี่ยนแหล่งกำเนิดของสัญญาณที่ใช้ในการประสานจังหวะเวลาปิดเปิดของแว่นชัตเตอร์ จากเดิมซึ่งอาศัยสัญญาณจากการ์ดแสดงผลโดยตรง ก็ทำการเปลี่ยนมาเป็นจังหวะการปรากฏของภาพบนหน้าจอ ซึ่งจะทำให้แว่นชัตเตอร์สามารถทำงานสัมพันธ์กับภาพที่ปรากฏได้ ดังนั้นระบบที่ได้นำเสนอในโครงการนี้จึงเป็นการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีเป้าหมายเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมแว่นชัตเตอร์โดยอาศัยจังหวะการปรากฏของภาพ

จากการทำงานในรูป 3.2 เห็นได้ว่า การประยุกต์สร้างระบบแสดงผลภาพสามมิติโดยใช้เทคโนโลยีแว่นชัตเตอร์โดยอาศัยเครื่องฉายภาพที่มีการประมวลภายในเช่นในเครื่องฉายภาพแบบ DLP จะทำให้ภาพที่ปรากฏมีการประวิงเมื่อเทียบกับจังหวะการทำงานของแว่นชัตเตอร์ เนื่องจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการประสานจังหวะนั้น ถูกสร้างและถูกป้อนไปยังเครื่องฉายภาพและแว่นชัตเตอร์พร้อมๆ กัน ดังแสดงในรูป 3.2(ก) ซึ่งสามารถแก้ไขโดยใช้ระบบที่ได้นำเสนอ โดยการเพิ่มส่วนของการประสานจังหวะ ดังที่แสดงในรูป 3.2(ข) ซึ่งสัญญาณควบคุมแว่นจะถูกสร้างโดยอาศัยการตรวจจับจังหวะการปรากฏของภาพ ทำให้จังหวะการทำงานของแว่นประสานกับภาพที่ปรากฏ

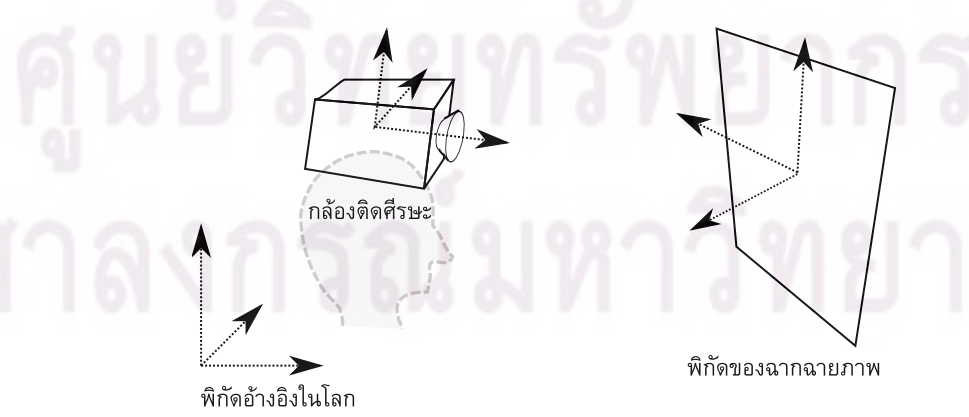


รูปที่ 3.2: แสดงการเปรียบเทียบระบบโดยทั่วไปกับระบบที่ได้นำเสนอ

3.2 ระบบติดตามและระบุตำแหน่งศีรษะของผู้ชม

ระบบติดตามตำแหน่งศีรษะทำหน้าที่ระบุตำแหน่งของผู้ชมและนำเอาค่าตำแหน่งดังกล่าวมาใช้ในการวาดภาพสามมิติให้สัมพันธ์กับมุมมองของผู้ชม ในการระบุตำแหน่งของผู้ชมงานวิจัยนี้ใช้หลักการระบุตำแหน่งโดยเทคนิคการไซมารคเกอร์และใช้กล้องเป็นส่วนเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูป 3.3 กล้องจะทำการถ่ายภาพมาร์คเกอร์ที่ติดตั้งอยู่บนฉากฉายภาพ (projector screen) และนำตำแหน่งมาร์คเกอร์ที่ติดตั้งอยู่บนฉากฉายภาพ ที่ถ่ายได้ นำมาคำนวณหาตำแหน่งกล้องร่วมกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกล้อง ซึ่งจะทำให้ได้ตำแหน่งของฉากฉายภาพเทียบกับกล้อง หลังจากนั้นตำแหน่งที่ได้จะถูกนำไปคำนวณอีกครั้งร่วมกับตำแหน่งของฉากรับภาพเทียบกับจุดอ้างอิงต่างๆ ของฉากรับภาพในโลก (world reference) ซึ่งจะส่งผ่านให้ ตำแหน่งของกล้องเป็นตำแหน่งที่เปรียบเทียบกับโลก

ค่าตำแหน่งศีรษะของผู้ชมที่ได้ จะถูกนำไปสร้างโมเดลการฉายภาพ โดยอาศัยหลักการฉายภาพแบบทัศนมิติ หลังจากนั้นโมเดลที่ได้จากการคำนวณจะถูกส่งต่อไปยัง การ์ดแสดงผลที่มีจำหน่ายโดยทั่วไป ซึ่งจะทำการวาดภาพสามมิติปรากฏบนจอ



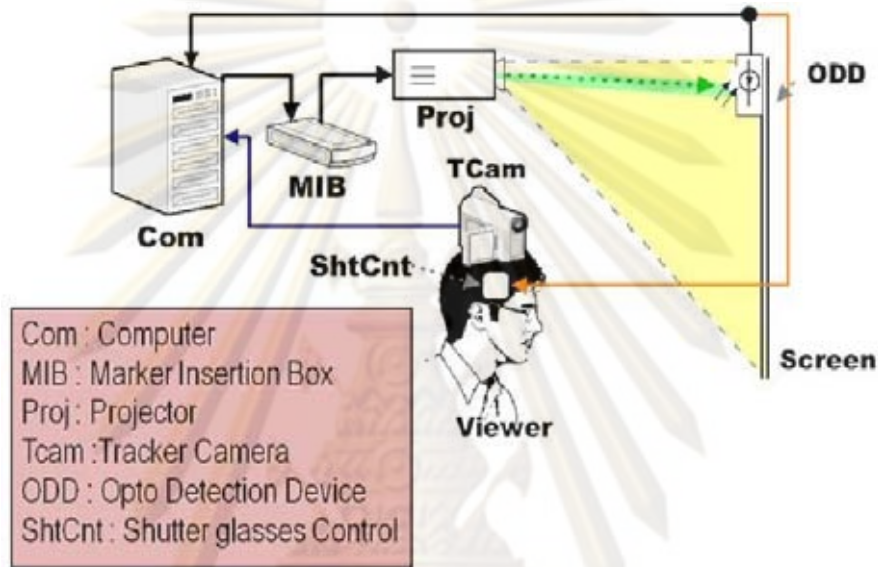
รูปที่ 3.3: แนวคิดระบบติดตามตำแหน่งศีรษะของผู้ชม

บทที่ 4

การพัฒนาระบบประสานจังหวะการทำงานของแว่นชุดเตอร์

4.1 อุปกรณ์แทรกสัญญาณ (Marker Insertion Box)

4.1.1 การทำงาน



รูปที่ 4.1: อุปกรณ์แทรกสัญญาณ

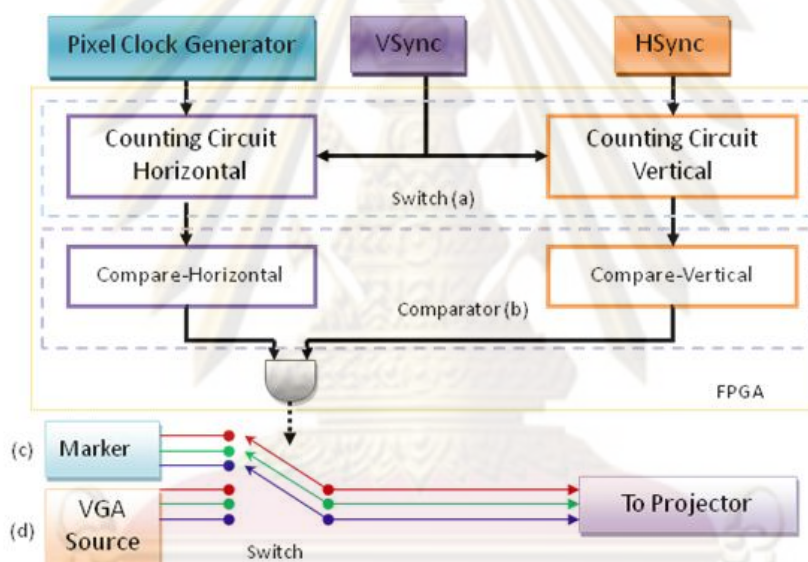
การทำงานของระบบประสานจังหวะดังแสดงในรูป 4.1 เริ่มต้นจากอุปกรณ์แทรกสัญญาณ จะทำหน้าที่แทรกรูปสี่เหลี่ยมลงไปในภาพ โดยรูปกล่องสี่เหลี่ยมที่ถูกแทรกจะมีสีหรือความสว่างเปลี่ยนแปลงตามจังหวะการปรากฏภาพของตาซ้ายและตาขวา ซึ่งสามารถใช้ในการระบุภาพที่ปรากฏเป็นภาพของตาข้างใดได้ ในส่วนจังหวะการปรากฏของภาพนั้น อุปกรณ์แทรกสัญญาณจะอาศัยสัญญาณที่ระบุข้างของตาซึ่งส่งออกมาจากการ์ดแสดงผล โดยในกรณีของการ์ดแสดงผลของบริษัท nVidia สัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งผ่านทางช่องสัญญาณ DDC (display data channel)

วงจรแทรกสัญญาณใช้อุปกรณ์ CPLD หรืออุปกรณ์ลอจิกโปรแกรมได้แบบซับซ้อน เบอร์ XC9472XL ในการสร้างวงจรวาดภาพสี่เหลี่ยมและแทรกสัญญาณและใช้สวิตช์แอนะล็อกเบอร์ MAX4027 ในการสลับสัญญาณ ระหว่างสัญญาณ VGA และสัญญาณรูปกล่องสี่เหลี่ยม

4.1.2 วงจรดิจิทัล

การทำงานของ CPLD ดังแสดงในรูป 4.2 CPLD จะถูกคอนฟิกูเรชันให้ทำงานโดยรับเอาสัญญาณขาเข้าของวงจรซึ่งประกอบด้วยสัญญาณประสานเวลาแนวตั้งและสัญญาณประสานเวลาแนวนอน ที่ได้จากการ์ดแสดงผล สัญญาณอีกชุดหนึ่งที่ใช้คือสัญญาณนาฬิกาของจุดภาพ ซึ่งจะถูกกำเนิดจากตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกาความถี่สูง สัญญาณทั้งสามเส้นจะถูกป้อนเข้าสู่วงจรนับ (a) ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณระบุพิกัดของจุดภาพในขณะนั้นๆ ว่าอยู่ในตำแหน่งจุดภาพใด

เมื่อทราบตำแหน่งของจุดภาพในขณะนั้นๆ ค่าที่ได้จากการนับจะนำไปเปรียบเทียบกับค่าของพิกัดต่างๆ (b) ของสัญลักษณ์สีเหลืองที่ต้องการวาด ดังนั้นถ้าหากในขณะนั้นเป็นสัญญาณภาพของสัญลักษณ์สีเหลือง วงจรก็จะทำการแทรกสัญญาณสัญลักษณ์ (c) หากไม่ใช่ก็จะเชื่อมต่อสัญญาณภาพจากการ์ดแสดงผล (d) โดยสัญญาณควบคุมดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยังวงจรแอนะล็อกต่อไป



รูปที่ 4.2: แผนภูมิการทำงานของอุปกรณ์แทรกสัญญาณภาพ

ส่วนของวงจรถ่ายวีดีโอซึ่งจะทำการสร้างสัญญาณภาพที่มีสีตรงตามต้องการ ให้ปรากฏบนหน้าจอ และสัมพันธ์กับภาพที่กำลังปรากฏว่าเป็นของตาข้างใดนั้น สัญญาณขาเข้าของส่วนวงจรถ่ายวีดีโอจึงต้องอาศัยสัญญาณ 2 เส้นคือ สัญญาณระบุพิกัดของจุดภาพในขณะนั้นและสัญญาณ DDC ที่บ่งบอกข้างของตาที่ได้จากการวัดแสดงผล

ในงานวิจัยนี้ ส่วนของวงจรถ่ายวีดีโอแบบแทรกสัญญาณ จะถูกทำการแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนวงจรถ่ายวีดีโอ (เส้นแนวตั้งและจุดแนวนอน) และส่วนวงจรวาดรูปสี่เหลี่ยม ส่วนของวงจรถ่ายวีดีโอประกอบด้วยวงจรถ่ายวีดีโอจำนวน 2 ชุดสำหรับแกนตั้งและแกนนอน ซึ่งจะถูกตั้งค่าให้ ทำการนับ 12 บิต และ 14 บิตตามลำดับ ซึ่งจะครอบคลุมในกรณีโหมดแสดงผลมีจำนวนเส้นภาพ 4096 เส้น และมีจุดแนวนอน 16384 จุด แต่ในทางปฏิบัติ จำนวนจุดแนวนอนนั้นจะถูกกำหนดโดยความเร็วสูงสุดที่ CPLD นั้นๆ ทำได้ โดยในกรณีนี้จากการใช้งานจริง พบว่าระบบสามารถทำงานได้ที่ความถี่ pixel clock เท่ากับ $50MHz$

ในทางปฏิบัติการวัดแสดงผลแต่ละรุ่นจะสามารถทำการตั้งค่าให้รูปแบบสัญญาณประสานจังหวะ ระดับสัญญาณ(ขั้ว)ที่แตกต่างกันได้ ดังนั้นในการตรวจจับสัญญาณประสานจังหวะ จึงจำเป็นต้องออกแบบวงจรถ่ายวีดีโอที่สามารถตรวจจับสัญญาณประสานจังหวะ โดยไม่ขึ้นกับขั้วของสัญญาณ วิธีการหนึ่งคือการใช้วงจรถ่ายวีดีโอแอนะล็อกภายนอกในการสร้างระดับสัญญาณอ้างอิง เนื่องจากเราทราบว่าค่าเฉลี่ยของสัญญาณประสานจังหวะนั้น จะเป็นค่าระดับพื้นฐาน ดังนั้นเมื่อเรานำเอาสัญญาณดังกล่าวมากระทำตรรกะเอ็กซ์คลูซีฟ-ออร์เกต ก็จะทำให้ได้ค่าความแตกต่างซึ่งถ้าหากค่าดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลง ณ ขณะใด ขณะนั้นก็จะเป็นจังหวะที่มีการประสานสัญญาณเกิดขึ้น

ดังแสดงในตัวอย่างโปรแกรม 4.1 สัญญาณที่เข้ามา Hsync จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณ Hsync1 ซึ่งถูกทำการเฉลี่ย ค่าที่ได้เมื่อนำมาทำตรรกะเอ็กซ์คลูซีฟ-ออร์เกต สัญญาณ HSync_XOR ก็จะถูกส่งไปยังเรจิสเตอร์ s1 ข้อมูลในเรจิสเตอร์ s1 จะถูกเลื่อนไปยัง เรจิสเตอร์ s2 ทุกครั้งที่มีสัญญาณ PClk ดังนั้นในการหาความเปลี่ยนแปลงซึ่งระบุสัญญาณประสานจังหวะจึงสามารถทำได้โดยการตรวจสอบค่า เรจิสเตอร์ s1 และ s2 ดังเงื่อนไขที่แสดงในโปรแกรมตัวอย่าง


```

output [13:0] HO;
output [11:0] VO;
reg [11:0] VO;
reg [13:0] HO;
input VSync;
input HSync;
input VSyncI;
input HSyncI;
input RL;
input PCIk;
wire PCIk;
wire HSync;
wire VSync;
wire HSync_XOR;
wire VSync_XOR;
assign HSync_XOR = HSync ^ HSyncI;
assign VSync_XOR = VSync ^ VSyncI;
always @(posedge PCIk)
begin
    if (HSync_XOR == 0)
        HO <= HO + 1;
    else
        HO <= 0;
end
reg s1, s2;
always @(posedge PCIk)
begin
    s2 <= s1;
    s1 <= HSync_XOR;
end
always @(posedge PCIk)
begin
    if ((s1 == 1) && (s2 == 0))
    begin
        if (VSync_XOR == 0)
            VO <= VO + 1;
        else
            VO <= 0;
    end
end
end

```

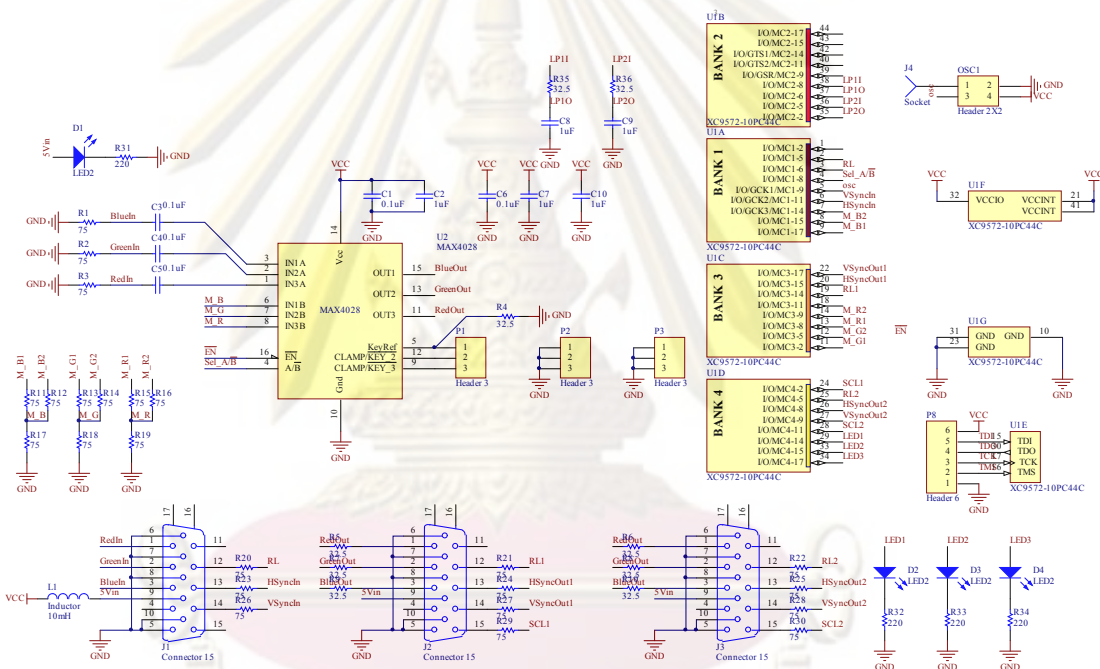
Listing 4.1: ตัวอย่างโปรแกรม Verilog ที่ใช้ในการนับพิกัดภาพ

ส่วนของวงจรวาดรูปสี่เหลี่ยมจะนำเอาค่าที่ได้จากวงจรมานำมาทำการเปรียบเทียบในแนวตั้งและแนวนอน ถ้าหากขณะนั้นอยู่ในพื้นที่บริเวณสี่เหลี่ยม ก็จะนำสัญญาณที่ได้ไปควบคุมวงจรรอและล็อก อีกทั้งจะถูกส่งต่อเพื่อทำการตรวจสอบว่าเป็นรูปสี่เหลี่ยมของตาข่ายใด แล้วจะนำเอาสัญญาณ DDC ที่ระบุข้างของตามาคิดคำนวณ เพื่อเลือกค่าความสว่างที่ต้องการให้ปรากฏ

4.1.3 วงจรแอนะล็อก

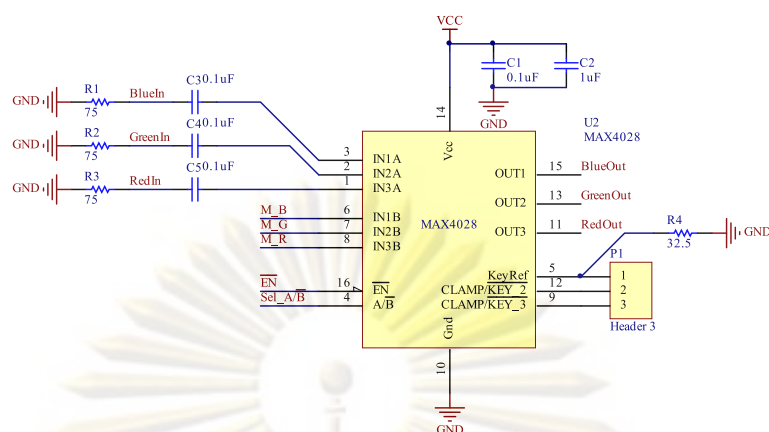
วงจรแอนะล็อกภายใน อุปกรณ์แทรกสัญญาณ มีส่วนสำคัญคือวงจรที่จะทำการเลือกแหล่งสัญญาณ ระหว่างสัญญาณ VGA จากการ์ดแสดงผลและสัญญาณสีหรือ color key โดยสัญญาณที่ถูกเลือกจะถูกขยายและส่งไปยังหน้าจอ

ในการออกแบบวงจรเลือกสัญญาณในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบและสร้างโดยอาศัย วงจรรวมเบอร์ MAX4028 ซึ่งได้ทำการรวมเอาวงจรแอนะล็อกสวิตช์และวงจรขยายสัญญาณไว้ด้วยกัน ทำให้เหมาะสมกับการประยุกต์ในโครงงานนี้อย่างมาก เนื่องจากสามารถลดความซับซ้อนของวงจรไปได้ ข้อดีอีกประการคือการที่วงจรรวม MAX4028 นั้นอาศัยไฟเลี้ยง +5V เพียงอย่างเดียว ทำให้สามารถใช้ไฟเลี้ยงจากพอร์ต VGA ได้โดยตรง ดังแสดงในรูป 4.3 วงจรโดยรวมประกอบด้วย พอร์ตสัญญาณเข้า VGA 1 พอร์ตและพอร์ตสัญญาณออก VGA 2 พอร์ต วงจรสลับสายแบบแอนะล็อก และวงจรดิจิทัลโดยใช้ CPLD ดังที่ได้กล่าวมาในขั้นต้น



รูปที่ 4.3: วงจรทางแอนะล็อกของอุปกรณ์แทรกสัญญาณภาพ

ในการประยุกต์ใช้งานวงจรรวมเบอร์ MAX4028 นั้นจากเอกสารอ้างอิง [36] วงจรรวม MAX4028 เป็นวงจรสลับสายสัญญาณ VGA และขยายสัญญาณ 6dB ใช้แหล่งจ่ายเดี่ยวแรงดัน 5V เนื่องจากการใช้แหล่งจ่ายเดี่ยวทำให้วงจรรวมดังกล่าวใช้วงจรแคลมป์ในการสร้างแรงดันไบอัสให้กับวงจรสลับสัญญาณและวงจรขยายภายใน ความสามารถในการสลับสัญญาณของวงจรรวมดังกล่าวอยู่ที่ 20ns ซึ่งเพียงพอสำหรับการสลับสัญญาณในอุปกรณ์แทรกสัญญาณที่ใช้ความถี่สัญญาณนาฬิกา 50MHz แบนด์วิดท์ของวงจรรวม MAX4028 สามารถรองรับได้ถึง 210MHz สำหรับการขยายสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal)



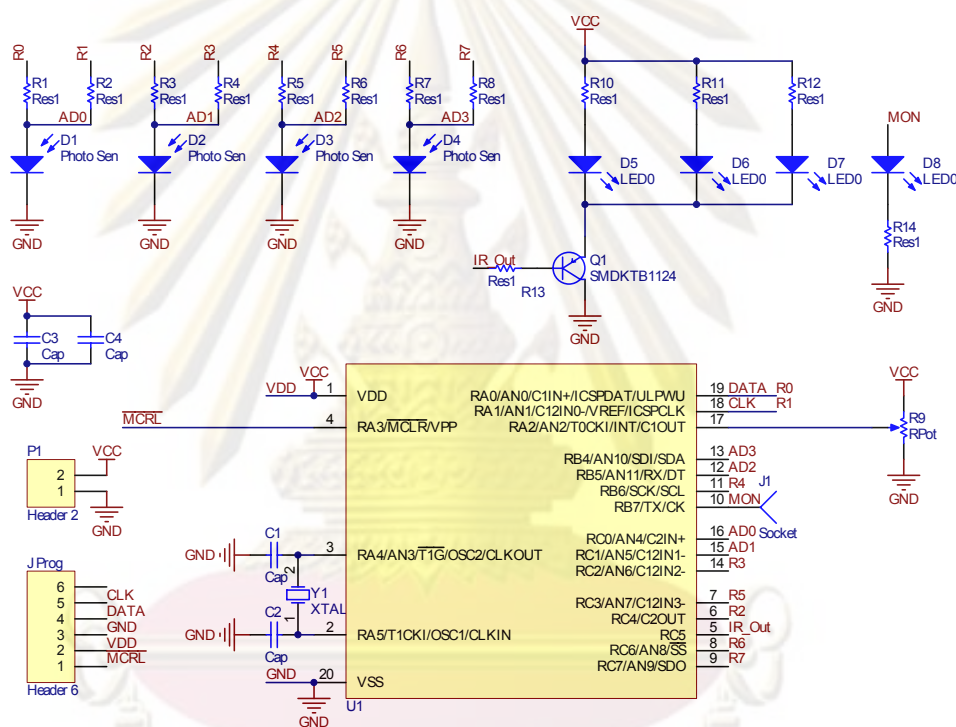
รูปที่ 4.4: วงจรสลับสายแบบแอนะล็อก MAX4028

การทำงานของวงจรรวม MAX4028 ดังแสดงในรูป 4.4 สัญญาณ VGA จะถูกส่งเข้ามาทางพอร์ต J1 (ในรูป 4.3) จะถูกส่งต่อมายังสัญญาณ RedIn , GreenIn และ BlueIn สัญญาณจะผ่านตัวต้านทาง 75Ω เพื่อทำการจับคู่ความต้านทางเชิงซ้อน (impedance matching) แล้วจึงผ่านตัวเก็บประจุ $0.1\mu F$ ซึ่งทำหน้าที่กรองกระแสตรงออก เพื่อให้สัญญาณที่เข้าวงจรรวมสามารถยกระดับโดยวงจรเคลมพ์ได้ สัญญาณ VGA ขาเข้าทั้งส่วน A (สัญญาณภาพ) และ B (สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม) จะถูกเลือกโดยเมื่อระดับตรรกะของขา A/B เท่ากับ ตรรกะสูง จะเป็นการเลือกสัญญาณจากช่อง A หรือสัญญาณภาพขาเข้าและเมื่อตรรกะของขา A/B เท่ากับ ตรรกะต่ำ ก็จะเป็นการเลือก B หรือสัญญาณรูปกลองสี่เหลี่ยมที่ต้องการจะนำเอาไปแทรกบนหน้าจอ

4.2 ตัวตรวจจับการปรากฏของสัญญาณบนจากรับภาพ (ODD)

4.2.1 การทำงาน

การทำงานของตัวตรวจจับการปรากฏของสัญญาณหรือตัวตรวจจับแสง ดังแสดงในรูป 4.5 เริ่มต้นจากตัวตรวจจับแสงซึ่งถูกติดตั้งอยู่ในพื้นที่ของรูปกล่องสี่เหลี่ยมจะทำการตรวจจับการปรากฏของแสง ซึ่งสามารถนำไปตีความโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อระบุข้างของภาพที่กำลังปรากฏบนหน้าจอ จังหวะการปรากฏนี้จะถูกส่งไปยังแวนซ์เตอร์ต่อไปโดยอาศัยการส่งสัญญาณผ่านทางแสงอินฟราเรด และเพื่อให้สามารถส่งสัญญาณได้ครอบคลุมพื้นที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการสร้างพัลส์เพื่อขับหลอด LED อินฟราเรดให้มีประสิทธิภาพมากกว่าการขับโดยปกติ

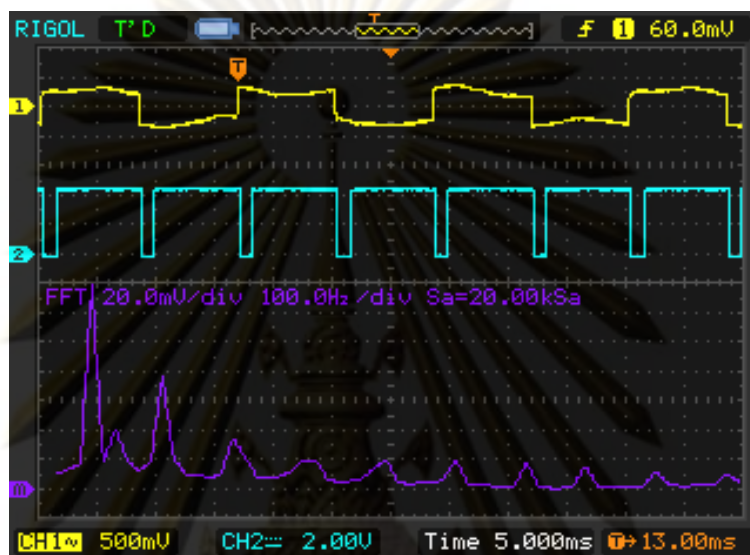


รูปที่ 4.5: วงจรทางแอนะล็อกของอุปกรณ์ตรวจจับแสง

4.2.2 วงจรตรวจจับความสว่างแสง

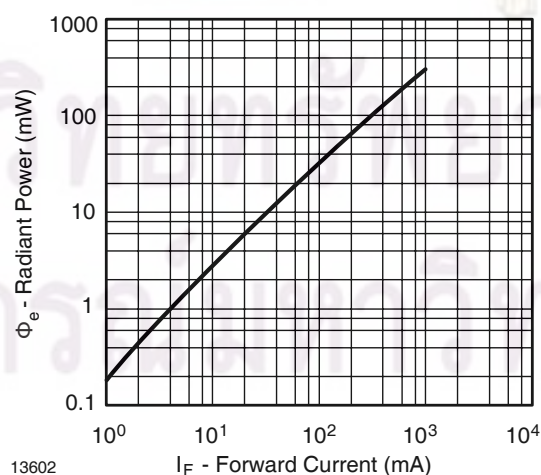
ตัวตรวจจับแสงจะถูกติดตั้งไว้ในบริเวณที่เป็นพื้นที่ของรูปกล่องสี่เหลี่ยมที่ระบุข้างของตาที่ถูกฉายออกมาจากเครื่องฉายภาพ เนื่องจากประกอบด้วยพื้นที่กล่องสี่เหลี่ยมสองพื้นที่ซึ่งถูกออกแบบให้ฉายรูปกล่องสี่เหลี่ยมที่มีความสว่างตรงข้ามกัน กล่าวคือเมื่อภาพปัจจุบันเป็นภาพปรากฏของตาซ้ายที่ปรากฏบนกล่องสี่เหลี่ยมด้านซ้ายและขวาจะเป็นสว่างและมีมืดตามลำดับ และสำหรับในกรณีของตาขวาที่ปรากฏบนกล่องสี่เหลี่ยมจะเป็นมืดและสว่างตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้การออกแบบให้รูปกล่องสี่เหลี่ยมนี้มีลักษณะการทำงานดังกล่าวเนื่องจากต้องการลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนหรือแสงสว่างของสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูป 4.6 ซึ่งแสดงถึงความผิดเพี้ยนของค่าความสว่างที่เกิดจากสัญญาณรบกวนภายนอก

ในรูป 4.6 เป็นการวัดค่าสัญญาณรบกวนคือแสงของหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีความถี่ในการกระพริบเท่ากับ 50Hz และทำการจำลองการฉายแสงของเครื่องฉายภาพโดยใช้เครื่องกำเนิดความถี่ที่มีความถี่ 60Hz จะเห็นได้ว่าความสว่างของแสงที่วัดได้ (เส้นสีเหลือง) จะมีความผิดเพี้ยน ซึ่งเมื่อนำเอาค่าความสว่างมาวาดในโดเมนของความถี่ (สีม่วง) จะเห็นว่าประกอบด้วยความถี่ของรูปสี่เหลี่ยม 60Hz ความถี่ของสัญญาณรบกวน 50Hz และฮาร์มอนิกของสัญญาณทั้งสอง



รูปที่ 4.6: การรบกวนของแสงภายนอก

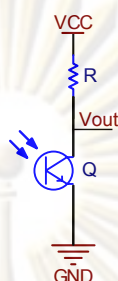
การวัดระดับความสว่างของแสงได้ใช้ทรานซิสเตอร์ไวแสง (photo transistor) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวใช้ปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำภายในทรานซิสเตอร์ ผลของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านสัมพันธ์กับปริมาณแสง และสามารถประมาณเป็นความสัมพันธ์ในเชิงเส้น ทรานซิสเตอร์ไวแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเบอร์ PT67-21C ของบริษัท Lite-on ซึ่งมีกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลกับปริมาณแสงที่ตกกระทบได้ดังรูปกราฟ 4.7



Radiant Power vs. Forward Current

รูปที่ 4.7: ผลการตอบสนองต่อแสง ($I_c vs E_c$) ของทรานซิสเตอร์ไวแสง PT67-21C

จากวงจรพื้นฐานในการไบแอสทรานซิสเตอร์ไวแสงและวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ ดังแสดงในรูป 4.8 ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ไวแสง Q และตัวต้านทาน R เมื่อให้ค่าความต้านทาน เท่ากับ R ดังนั้นความสัมพันธ์ของแสงกับแรงดันที่วัดได้ที่จุด V_{out} จึงมีค่าดังแสดงในสมการ(4.2) และจากกราฟ 4.7 จึงได้ว่า



รูปที่ 4.8: วงจรการประยุกต์ใช้งานโฟโตทรานซิสเตอร์

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{I_c}{E_e} \\
 &\simeq \frac{1\text{ma}}{(1\text{mw}/\text{cm}^2)} \\
 &\simeq 1(\text{cm}^2/\text{v})
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
 V_s &= RI_c + V_{ce} \\
 &= R(KE_e) + V_{ce}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= V_{ce} \\
 V_{out} &= V_s - R(KE_e)
 \end{aligned}$$

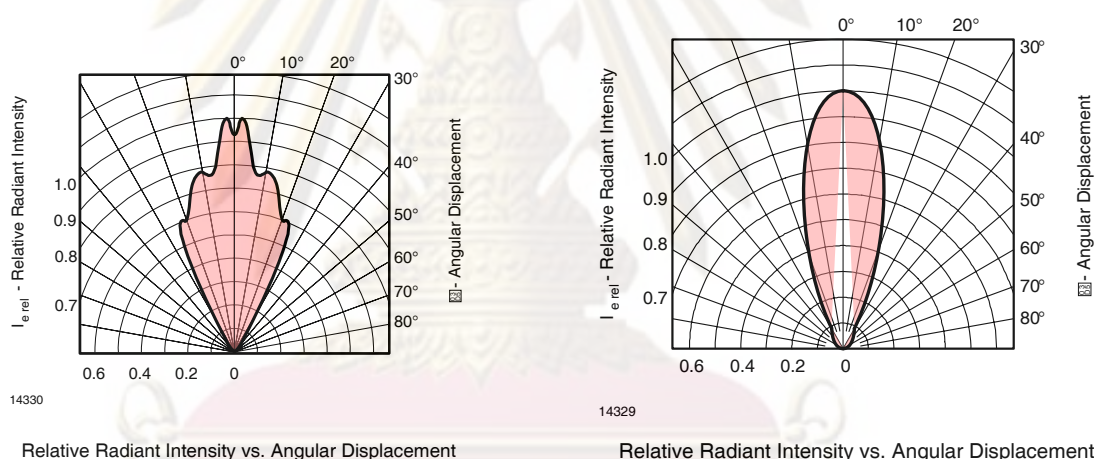
4.2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในวงจรตรวจจับการปรากฏของสัญญาณบนฉากรับภาพเลือกใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F690 [37] ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ทำงานที่ความเร็ว 6MIPs ที่ความถี่คริสตอล 24MHz โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะใช้วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่มีอยู่ในการแปลงระดับความสว่างที่วัดได้ทั้ง 4 ช่อง และนำไปทำการตีความ เพื่อสร้างเป็นสัญญาณ เพื่อส่งไปยังตัวควบคุมแวนต่อไป

4.2.4 การออกแบบวงจรขับหลอด LED

ในการส่งสัญญาณประสานจังหวะไปยังแวนซ์เตอร์จะอาศัยการส่งข้อมูลแสงอินฟราเรด ซึ่งจำเป็นที่จะต้องออกแบบให้แสงสามารถส่องสว่างได้อย่างทั่วถึง มีระยะที่ไกลและสามารถส่งข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นในการออกแบบวงจรควบคุมการส่องสว่างจึงต้องทำการคำนวณถึง ระยะและขอบเขตในการสื่อสาร การขับหลอด LED ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำเนิดแสงให้ได้เต็ม ประสิทธิภาพ ในทางปฏิบัติ ตำแหน่งของผู้ชมนั้นมีขอบเขตอยู่บริเวณหน้าจอ ซึ่งประมาณได้ว่าถ้า หากติดตั้งอุปกรณ์ ODD ไว้ที่ริมขอบซ้ายบนของหน้าจอซึ่งเป็นบริเวณที่มีการฉายมาร์คเกอร์อยู่นั้น ODD จะต้องมี FOV ในการกำเนิดแสงอยู่ที่ 80 องศา ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องนำเอาค่า FOV ของ LED แต่ละรุ่นมาพิจารณาประกอบ

ในโครงการนี้ได้ทำการเลือกใช้ LED รุ่น TSAL7400 เนื่องจากความสว่างที่สูงและมีความยาวคลื่นที่ตรงกับตัว Sensor TSOP 34838 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ TSAL6200 จาก ข้อมูลในเอกสารเทคนิคของ TSAL7400 [38] และข้อมูลในเอกสารทางเทคนิคของ TSAL6200 [39] ดังแสดงในรูปที่ 4.9(ก) และ 4.9(ข) ตามลำดับ พบว่า TSAL7400 มีค่า FOV ที่สูงกว่าทำให้สามารถ ครอบคลุมมุมมองได้มากกว่า

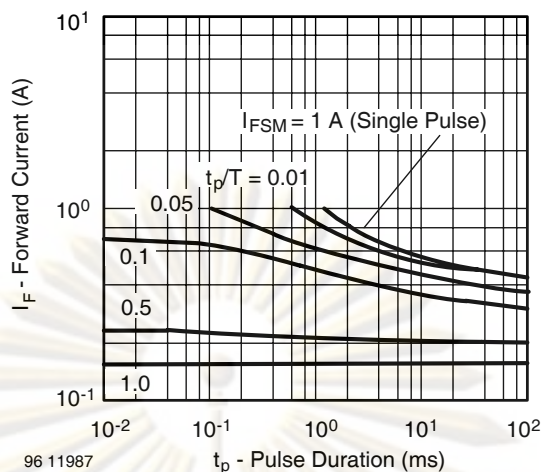


(ก) การกระจายแสงของ TSAL7400

(ข) การกระจายแสงของ TSAL6200

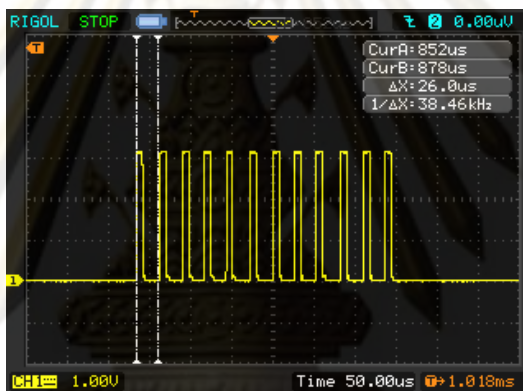
รูปที่ 4.9: เปรียบเทียบการกระจายแสงของ TSAL7400 และ TSAL6200

เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการส่องสว่างของหลอด LED ดังนั้นในการออกแบบจึงกำหนด จุดทำงานของหลอด LED โดยจากการเลือกใช้ LED เบอร์ TSAL7400 นั้น จึงสามารถพิจารณา จากตารางที่ 4.10 ดังนั้นจึงเลือกใช้กระแสในการขับประมาณ 500 mA ดังนั้นค่าตัวต้านทาน R_{10} , R_{11} , R_{12} จึงสามารถคำนวณได้จาก ค่าแรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลต์ และแรงดันตกคร่อม LED 1.8 โวลต์ จึงได้ค่า R_{10} , R_{11} , R_{12} เท่ากับ 6.8Ω แรงดันในการขับหลอด LED สามารถแสดงดังรูป 4.11



Pulse Forward Current vs. Pulse Duration

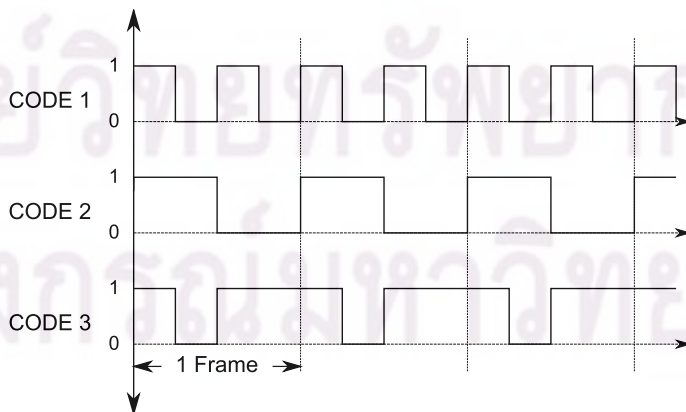
รูปที่ 4.10: ขอบเขตการทำงานของ TSAL7400



รูปที่ 4.11: สัญญาณขาออกของภาคขับ LED

4.2.5 การเข้ารหัสสัญญาณอินฟราเรดควบคุมแวน

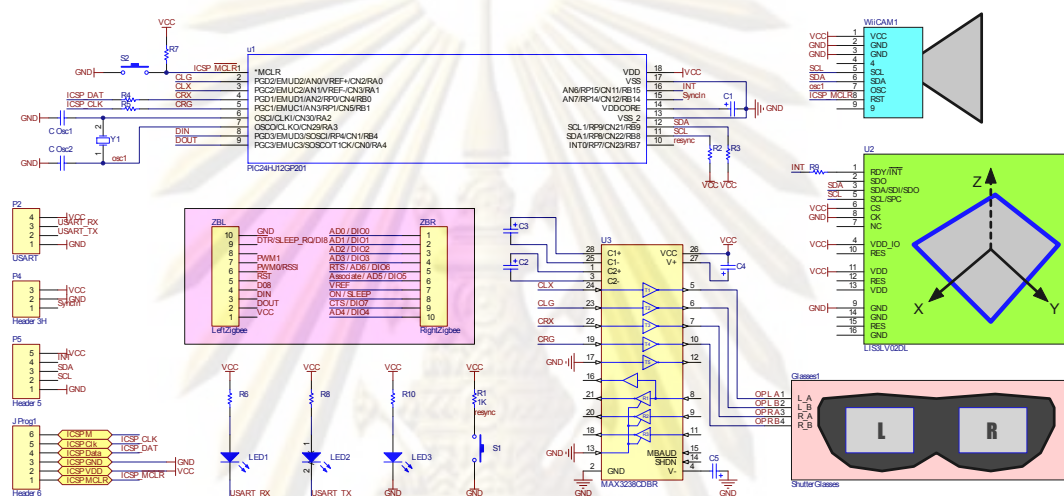
รหัสที่ใช้ในการควบคุมแวนนั้นแสดงในรูป 4.12



รูปที่ 4.12: รหัสที่ใช้ในการควบคุมแวน

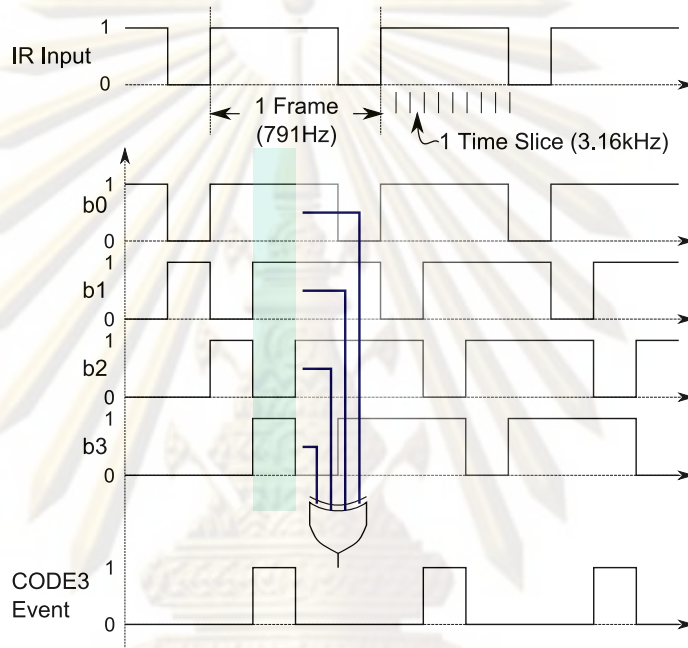
4.3 ตัวควบคุมแว่น (Shutter Glass Controller)

ตัวควบคุมแว่นทำหน้าที่ประสานจังหวะการปิดเปิดของแว่นให้สัมพันธ์กับการปรากฏของภาพบนหน้าจอ โดยอาศัยสัญญาณอินฟราเรดที่ส่งจากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (ODD) ซึ่งติดตั้งบนหน้าจอ โดยตัวควบคุมแว่นจะถูกพัฒนาอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC24H12GP201 ซึ่งทำงานพร้อมๆ กันกับระบบติดตามตำแหน่ง การทำงานภายในตัวควบคุมแว่น ประกอบด้วยการทำงานสามอย่าง คือการรับและถอดรหัสสัญญาณประสานจังหวะที่ได้รับจากอุปกรณ์ตรวจจับแสง การคำนวณสร้างจังหวะการปิดเปิดของแว่น และการขับแว่น ระบบควบคุมแว่นที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้ แสดงในรูป 4.13



รูปที่ 4.13: วงจรตัวควบคุมแว่น

ในการทำงานของระบบควบคุมแวนนั้นเริ่มต้นจาก สัญญาณที่ถูกส่งมาจากอุปกรณ์ตรวจจับแสงมาร์คเกอร์ (ODD) จะถูกรับ โดยในกรณีที่เป็นการรับส่งผ่านทางสัญญาณแสงอินฟราเรด สัญญาณอินฟราเรดจะถูกตรวจจับโดยโมดูลตรวจจับสัญญาณแสงอินฟราเรดเบอร์ TSOP34838 [40] ซึ่งจะทำให้สัญญาณขาออกจากวงจรรวมดังกล่าวเป็นสัญญาณบ่งบอกข้างของตาที่ปรากฏบนจอภาพ โดยถูกเข้ารหัสไว้ ในการตีความรหัสที่ได้รับจากโมดูล TSOP34838 ดังแสดงในรูป 4.14 จะถูกเลื่อนเข้ามายังตัวแปลงอนุกรมเป็นขนานโดยมีความถี่เท่ากับ 3.16kHz แล้วจึงทำการเปรียบเทียบเพื่อหารูปแบบรหัสตามที่ไดทำการออกแบบดังที่กล่าวมาในรูป 4.12



รูปที่ 4.14: การถอดรหัสอินฟราเรด

ในการตรวจสอบเปรียบเทียบรูปแบบจะใช้ตรรกะ เอ็กคลูซีฟ-ออในการตรวจสอบ โดยเทียบเคียงกับรูปแบบของรหัสที่รับได้กับรหัสที่ต้องการ ในลักษณะคล้ายกับการทำงานของลูกกุญแจและแม่กุญแจ เมื่อตรวจพบรหัสที่บ่งบอกข้างของตาก็จะทำการกระตุ้นการทำงานของ กลไกสร้างสัญญาณควบคุมแวนต่อไป

4.3.1 การคำนวณและสร้างสัญญาณควบคุมแว่น

จากโครงสร้างของสัญญาณควบคุมแว่นชุดเตอร์ จากงานวิจัย [19, 20] พบว่าการที่จะสามารถลดการเกิด ghosting ในภาพ stereoscopic ที่ได้นั้น จำเป็นจะต้องมีการเพิ่มส่วนของจังหวะที่สาม (3th step) ซึ่งเป็นช่วงที่แผ่น LCD ที่อยู่หน้าดวงตาทั้งสองแผ่นทำการปิดบังแสงทั้งคู่ จากการหลักการคำนวณในงานวิจัย [20] ดังนั้นการคำนวณที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.3) และรูป 4.15

กำหนดให้

$T_{Interval}$	คาบเวลาทั้งหมดที่วัดได้
T_{Delay}	ระยะเวลาหน่วง
$T_{OnRight}$	จังหวะเริ่มที่บว่นขวา
$T_{OffRight}$	จังหวะเริ่มไปรงบว่นขวา
T_{OnLeft}	จังหวะเริ่มที่บว่นซ้าย
$T_{OffLeft}$	จังหวะเริ่มไปรงบว่นซ้าย
τ	ค่าคงตัวการหน่วง

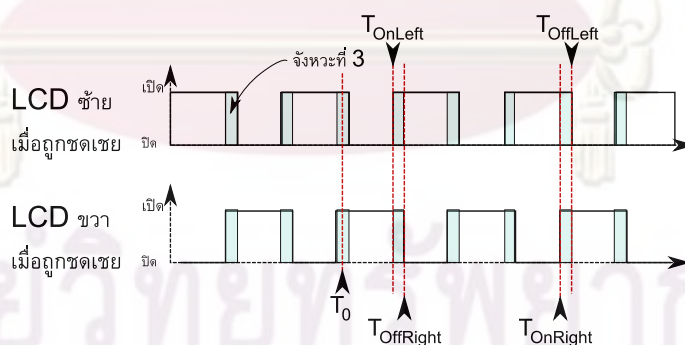
$$T_{Delay} = \frac{\tau T_{Interval}}{256} - T_{Interval} \quad (4.3)$$

$$T_{OffRight} = T_{Delay} \quad (4.4)$$

$$T_{OnRight} = \frac{T_{Interval}}{2} - T_{Delay} \quad (4.5)$$

$$T_{OffLeft} = \frac{T_{Interval}}{2} + T_{Delay} \quad (4.6)$$

$$T_{OnLeft} = T_{Interval} - T_{Delay} \quad (4.7)$$



รูปที่ 4.15: การเพิ่มช่วงเวลา 3 ในการประวิงการปิดเปิดของแว่น [20]

กลไกการควบคุมแว่นจะทำการนับคาบเวลาในปัจจุบัน แล้วจึงทำการเปรียบเทียบกับค่าการปิดเปิดต่างๆที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งทำให้สามารถระบุได้ว่าในขณะนั้นๆ สถานะของแผ่น LCD ทั้งสองบนแว่นชุดเตอร์ควรเป็นเช่นไร ในการนับคาบเวลานั้นอาศัยการกระตุ้นจากสัญญาณขัดจังหวะ (interrupt) ในไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะทำงานอยู่ที่ความถี่เดียวกับความถี่ของวงจรแปลงสัญญาณอนุกรมเป็นขนานในส่วนของวงจรถอดรหัสสัญญาณอินฟราเรด

4.3.2 การขับแวน

ในการออกแบบวงจรขับแวนซีดีเตอร์แบบ LCD โดยอ้างอิงจากข้อมูลการขับแวนในงานวิจัย [20] แรงดันที่ใช้ในการขับแวนนั้นมีแอมพลิจูดประมาณ $10 V_{p-p}$ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ LCD ดังนั้นกระแสหรือประจุที่ใช้ในการทำงานจึงมีค่อนข้างน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการออกแบบตัดแปลงโดยการประยุกต์เอาวงจรรวมที่ใช้ในการขับสัญญาณสื่อสารของพอร์ตอนุกรม RS-232 มาใช้แทนวงจรในงานวิจัย [20] โดยวงจรรวมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเบอร์ max3238 [41] ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

- ใช้แรงดันตั้งแต่ 3.3 ถึง 5 V
- สามารถขับสัญญาณเอาต์พุตได้ 5 ช่อง
- ใช้ตัวเก็บประจุขนาด $0.1 \mu F$ ในการวงจรเพิ่มและกลับแรงดัน เพียง 4 ตัว
- เป็นตัวถังแบบ SSOP28 (10.33 x 7.9mm)

การขับแวนด้วยวงจรรวม MAX3238 ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบให้ขับในลักษณะสองขั้ว (bipolar) เนื่องจากในการทำงานของจอ LCD นั้นจะมีประจุแฝงอยู่ในแวน ทำให้หากใช้การขับประจุและการถอนประจุ (charge-discharge) โดยใช้การขับแรงดันในลักษณะขั้วเดียว (unipolar) จะทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการถอนกระแสที่มาก ส่งผลให้การเปลี่ยนจากช่วงที่บเป็นใสของ LCD ทำได้ช้า ซึ่งจะทำให้เกิด ghosting ในภาพ stereoscopic ได้ง่ายขึ้น อีกทั้งวงจรรวมดังกล่าวยังช่วยเพิ่มให้แรงดันตกคร่อม LCD นั้นมีค่าถึง $\pm 10V$ โดยความสามารถในการขับโหลดของวงจรรวม MAX3238 แสดงในตาราง 4.1

TRANSMITTER OUTPUTS				
Output Voltage Swing	All transmitter outputs loaded with 3k Ω to ground	± 5.0	± 5.4	V
Output Resistance	$V_{CC} = V_+ = V_- = GND, T_{OUT} = 2V$	300	10M	Ω
Output Short-Circuit Current	$V_{CC} \leq 3.6V$	± 35	± 60	mA
	$V_{CC} > 3.6V$	± 40	± 100	
Output Leakage Current	$V_{OUT} = \pm 12V, V_{CC} = 0V$ to 5.5V, transmitters disabled	± 25		μA

ตารางที่ 4.1: ความสามารถในการขับโหลดของวงจรรวม MAX3238

ข้อดีอื่นๆ ของการใช้วงจรรวมที่ใช้ในการขับสัญญาณของพอร์ตอนุกรม ดังเช่นเบอร์ MAX3238 คือการที่สามารถใช้แหล่งจ่ายไฟแบบขั้วเดียวโดยไม่ใช้การแบ่งแรงดันเพื่อสร้างแรงดันไบอัสในการขับแวน ทำให้สามารถประหยัดพลังงานที่ใช้เลี้ยงวงจรขับแวนไปได้ อีกทั้งเนื่องจากความต้องการกระแสที่น้อยทำให้ สามารถวงจรเพิ่มแรงดันแบบ switch capacitor ภายใน MAX3238 ที่มีค่าความสูญเสียต่ำกว่าวงจรเพิ่มแรงดันแบบอื่น และสามารถใช้งานกับแหล่งจ่ายไฟแรงดันต่ำเช่นแบตเตอรี่ Li-Po ซึ่งมีแรงดันใช้งานเพียง 3.7V ได้ ประการสุดท้ายคือการใช้จำนวนอุปกรณ์ที่น้อยส่งผลให้วงจรมีขนาดเล็กติดตั้งบนแวนได้สะดวก

4.3.3 การรับส่งข้อมูลไร้สาย

ในตัวควบคุมแวนนี้สามารถทำการปรับแก้พารามิเตอร์ต่างๆ ขณะทำงานผ่านทางช่องทางการติดต่อสื่อสาร ที่อาศัยโมดูล Zigbee (IEEE802.14) ในรูป 4.16 ซึ่งเป็นช่องทางที่ใช้ร่วมกับระบบติดตามตำแหน่งศีรษะ โดยสามารถทำการปรับแก้พารามิเตอร์ต่างๆ ได้จากการส่งอักขระ ASCII เข้าไปดังแสดงในตาราง 4.2 ซึ่งเป็นตารางแสดงคำสั่งต่างๆ ที่สามารถทำการปรับแก้พารามิเตอร์ต่างๆ ของแวนได้



รูปที่ 4.16: โมดูล Zigbee [20]

คำสั่ง		รหัส ASCII
คาบเวลา	เพิ่ม	q
	ค่าเริ่มต้น	a
	ลด	z
คาบหน่วง	เพิ่ม	w
	ค่าเริ่มต้น	s
	ลด	x
ประสานจังหวะใหม่		r
แสดงคาบเวลา		t
ระบบติดตามตำแหน่ง	เปิด	y
	ปิด	h

ตารางที่ 4.2: คำสั่งในการปรับแก้พารามิเตอร์ควบคุมแวนชุดเตอร์

บทที่ 5

ระบบติดตามและระบุตำแหน่งศีรษะของผู้ชม

ในการวาดภาพสามมิติให้มีมุมมองที่ถูกต้องสัมพันธ์กับมุมมองของผู้ชมนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบตำแหน่งที่ถูกต้อง แม่นยำของศีรษะ ทำให้อุปกรณ์ติดตามตำแหน่งเป็นส่วนสำคัญ ที่จะทำให้ผู้ชมสามารถสัมผัสกับอรรถรสและความสมจริงของโลกเสมือนสามมิติได้ดียิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการพัฒนาระบบติดตามตำแหน่งศีรษะซึ่งอาศัยอุปกรณ์ตรวจจับเชิงแสงหรือกล้องร่วมกับอุปกรณ์วัดอัตราเร่ง โดยอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกติดตั้งไว้บนศีรษะและเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของศีรษะ ซึ่งกล้องจะทำการถ่ายภาพของมาร์คเกอร์หรือหลอด LED อินฟราเรดซึ่งถูกติดตั้งบนหน้าจอ ภาพที่ได้จะถูกนำมาคำนวณระบุตำแหน่งโดยใช้ตำแหน่งมาร์คเกอร์ที่ปรากฏบนฉากรับภาพของกล้อง ส่วนต่างๆ ของระบบติดตามตำแหน่งมีดังนี้

5.1 กล้อง

ในงานวิจัยนี้การตรวจจับตำแหน่งของมาร์คเกอร์นั้นอาศัย โมดูลกล้องที่ได้จาก Wiimote หรืออุปกรณ์ควบคุมระยะไกลสำหรับเครื่องเล่นเกมส์ Nintendo Wii [42] เนื่องจากอุปกรณ์ Wiimote จะสามารถหาตำแหน่งของตัวเองได้จากการคำนวณจากภาพของ light bar หรือมาร์คเกอร์แสงอินฟราเรดที่ติดตั้งอยู่ข้างๆหน้าจอ

สำหรับอุปกรณ์ Wiimote ภายในประกอบด้วยเซนเซอร์ที่สามารถนำมาประยุกต์ในการสร้างอุปกรณ์ติดตามตำแหน่งได้คือ IR Camera ของบริษัท Pixart ดังแสดงในรูป 5.1



รูปที่ 5.1: Wiimote

5.1.1 ข้อมูลทางเทคนิคของ Wiimote IR Camera

อ้างอิงจากข้อมูลจาก WWW.WiiBrew.Org [42] IR Camera มีคุณสมบัติดังนี้

- เป็นกล้องแบบสีเดียว (monochrome)
- สามารถติดตามจุดแสง (Hot Spot) ได้มากที่สุด 4 จุด
- มีจำนวนจุด 128 x 96 จุด สามารถระบุตำแหน่งได้โดยจำลองความละเอียดเป็น 8 เท่า คือ 1024x768 จุด
- การตอบสนองต่อแสงอินฟราเรด 940nm มากเป็น 2 เท่าของ 850nm

- ใช้ความถี่สัญญาณนาฬิกาตั้งแต่ $20MHz$ ถึง $25MHz$
- ติดต่อรับส่งข้อมูลผ่านทางบัส I²C [43]
- ใช้ไฟเลี้ยง 3.3V

5.1.2 การเริ่มใช้งาน Wiimote IR Camera

ในการติดต่อสื่อสารกับ Wiimote IR Camera จะอาศัยการรับส่งข้อมูลผ่านทาง I²C บัส ซึ่งมีการกำหนดค่าตำแหน่ง (address) ของหน่วยความจำภายในที่ใช้ในการเขียนอ่านข้อมูลไปยังเรจิสเตอร์ต่างๆอยู่ที่ตำแหน่ง 0xB0 (0xB0 สำหรับการเขียน และ 0xB1 สำหรับการอ่าน) สำหรับการเริ่มใช้งานกลองนั้น มีการเริ่มการทำงานขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. เริ่มการทำงานของกลองและทำการจ่ายสัญญาณนาฬิกา
2. เขียนค่า 0x08 ไปยังตำแหน่ง 0xb00030
3. เขียนค่า Sensitivity Block 1 ไปยังตำแหน่ง 0xb00000
4. เขียนค่า Sensitivity Block 2 ไปยังตำแหน่ง 0xb0001a
5. เขียนค่า Mode Number ไปยังตำแหน่ง 0xb00033
6. เขียนค่า 0x08 ไปยังตำแหน่ง 0xb00030 (ทบทวน)

5.1.3 เรจิสเตอร์ของ Wiimote IR Camera

5.1.3.1 เรจิสเตอร์ Sensitivity Block

Block 1	Block 2	Notes
00 00 00 00 00 00 90 00 C0	40 00	Suggested by Marcan
02 00 00 71 01 00 aa 00 64	63 03	Suggested by Cliff
00 00 00 00 00 00 90 00 41	40 00	Suggested by inio (max sensitivity)
02 00 00 71 01 00 64 00 fe	fd 05	Wii level 1
02 00 00 71 01 00 96 00 b4	b3 04	Wii level 2
02 00 00 71 01 00 aa 00 64	63 03	Wii level 3 (also Cliff's suggestion)
02 00 00 71 01 00 c8 00 36	35 03	Wii level 4
07 00 00 71 01 00 72 00 20	1f 03	Wii level 5

5.1.3.2 เรจิสเตอร์ตำแหน่ง

การอ่านค่าตำแหน่งจะอาศัยการอ่านค่าเริ่มต้นจากเรจิสเตอร์ตำแหน่ง 0x36 โดยขนาดของข้อมูลจะขึ้นอยู่กับโหมดของการอ่านค่าซึ่งมีอยู่ 3 โหมดคือ

5.1.3.2.1 Basic Mode (Mode Number = 0x1)

ใน Basic Mode กล้อง IR จะส่งกลับข้อมูลจำนวน 10 Bytes ซึ่งเป็นข้อมูลของพิกัด X และ Y ของจุดมาร์คเกอร์ทั้ง 4 จุด ค่าพิกัดของมาร์คเกอร์จะถูกเข้ารหัสอยู่ในรูปแบบ 10 บิต ซึ่งสามารถมีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1023 สำหรับแกน x และ 0 ถึง 767 สำหรับแกน Y ค่าพิกัดแต่ละคู่จะถูกเก็บในรูปแบบ 5 Bytes ดังแสดงในรูป ซึ่งในการส่งข้อมูลแต่ละครั้งจะมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 10 Bytes เท่ากับว่าจะมีข้อมูลปรากฏในเรจิสเตอร์ตำแหน่ง 0x36 ถึง 0x40

Bytes	Bit							
	7	6	5	4	3	2	1	0
0	X1<7:0>							
1	Y1<7:0>							
2	Y1<9:8>		X1<9:8>		Y2<9:8>		X2<9:8>	
3	X2<7:0>							
4	Y2<7:0>							

5.1.3.2.2 Extended Mode (Mode Number = 0x3)

ในโหมดนี้ ข้อมูลจากกล้อง IR จะมีการเพิ่มเติมข้อมูลขนาดของมาร์คเกอร์แต่ละตัว ซึ่งสำหรับมาร์คเกอร์แต่ละตัวจะประกอบด้วยข้อมูลจำนวน Bytes ดังนั้นจำนวนข้อมูลทั้งหมดจึงรวมเป็น 12 Bytes สำหรับมาร์คเกอร์ทั้ง 4 จุด เท่ากับว่าข้อมูลจะถูกส่งกลับมาในเรจิสเตอร์ตำแหน่งตั้งแต่ 0x36 จนถึง 0x42 ชุดข้อมูลประกอบด้วย

- พิกัด X,Y
- ขนาดของมาร์คเกอร์ที่มองเห็น S

Bytes	Bit							
	7	6	5	4	3	2	1	0
0	X<7:0>							
1	Y<7:0>							
2	Y<9:8>		X<9:8>		S<3:0>			

5.1.3.2.3 Full Mode (Mode Number = 0x5)

ใน Full Mode ค่าที่ได้จากกล้อง IR จะประกอบด้วย 9 Bytes สำหรับมาร์คเกอร์แต่ละตัวซึ่งรวมเป็น 36 Bytes สำหรับมาร์คเกอร์ทั้ง 4 ตัว ชุดข้อมูลประกอบด้วย

- พิกัด X,Y
- ขนาดของมาร์คเกอร์ที่มองเห็น S
- ขอบเขตหรือพิกัดค่ามากและน้อยสุดในแกน X และ Y (min X,max X, min Y,max Y)
- ค่าความสว่าง Intensity

Bytes	Bit							
	7	6	5	4	3	2	1	0
0	X<7:0>							
1	Y<7:0>							
2	Y<9:8>		X<9:8>			S<3:0>		
3	0	X min<6:0>						
4	0	Y min<6:0>						
5	0	X max<6:0>						
6	0	Y max<6:0>						
7	0							
8	Intensity<7:0>							

5.2 เซนเซอร์วัดอัตราเร่ง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้อุปกรณ์วัดอัตราเร่งเพื่อช่วยในการระบุตำแหน่ง จากกฎทางฟิสิกส์ ทิศทางของแรงดึงดูดของโลกนั้นจะมีทิศทางดังลงไปแนวตั้ง ดังนั้นค่าอัตราเร่งที่วัดได้จาก อุปกรณ์วัดอัตราเร่งจะมีทิศทางในแนวเดียวกันกับแนวแรงดึงดูด ทำให้สามารถระบุมุมการวางตัวของศีรษะได้ อุปกรณ์วัดอัตราเร่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เบอร์ LIS3LV02DL ซึ่งมีคุณสมบัติตามเอกสารทางเทคนิค [44] ดังนี้

- เป็นเซนเซอร์วัดอัตราเร่ง 3 แกน
- ช่วงการวัด $\pm 2g$ และ $\pm 6g$
- การตอบสนองของความถี่ $640kHz$
- ติดต่อผ่านทาง I²C และ SPI บัส
- ใช้ไฟเลี้ยง 2.1V ถึง 3.6V

ในงานวิจัยนี้ อุปกรณ์วัดอัตราเร่งได้ถูกเชื่อมต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทาง I²C บัส โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่อ่านค่าอัตราเร่งซึ่งเก็บอยู่ในเรจิสเตอร์ 0x28 จนถึง 0x2D หลังจากนั้นจึงทำการส่งค่าที่ได้มายังเครื่องคอมพิวเตอร์โดยมีจังหวะสัมพันธ์กับจังหวะการอ่านค่าจาก กล้องอินฟราเรดของ Wiimote ทำให้ในการคำนวณ สามารถนำค่าของข้อมูลที่ได้ทั้งสองมาคำนวณร่วมกันได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการเก็บตัวอย่างจากอุปกรณ์วัดทั้งสองที่น้อย

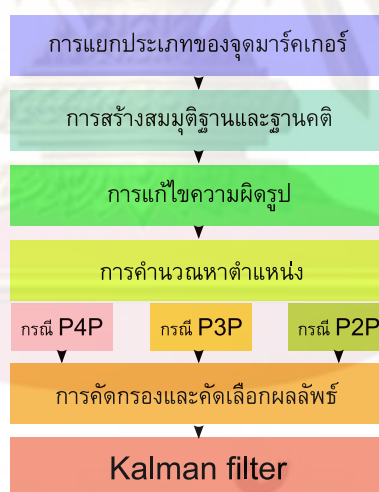
5.3 การคำนวณหาพิกัดของศีรษะ

ขั้นตอนการทำงานของระบบติดตามตำแหน่งศีรษะดังแสดงในรูป 5.2 เริ่มจากเมื่อได้ทำการรวบรวมข้อมูลจากกล้องและเซ็นเซอร์วัดอัตราเร็วแล้ว ข้อมูลจะถูกถ่ายโอนมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำการส่งข้อมูลที่เข้าสู่ขั้นตอนการประมวลผลแรก คือการแยกประเภทจุดมาร์คเกอร์

การแยกประเภทจุดมาร์คเกอร์ เป็นการคัดแยกชนิดของมาร์คเกอร์จากควมถี่ในการปรากฏหรือการกระพริบ หลังจากนั้นระบบก็จะทำการนับจำนวนของมาร์คเกอร์แต่ละประเภท เพื่อที่จะเลือกวิธีการหาการเปลี่ยนแปลงลำดับความสัมพันธ์ (correspondence & permutation) ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะทำได้สมมุติฐานและฐานคติ (hypothesis & assumption) สมมุติฐานและฐานคติที่ได้ทั้งหมดจะเป็นความสัมพันธ์ ของจุดภาพที่ปรากฏบนกล้องกับแบบจำลองอ้างอิงของมาร์คเกอร์ (reference model)

หลังจากได้ทำการส่งผ่าน (mapping) โดยอาศัยสมมุติฐานและฐานคติที่ได้ ตำแหน่งมาร์คเกอร์ จะถูกนำไปแก้ไขความผิดรูป (distortion) หลังจากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาตำแหน่ง โดยอาศัยระเบียบวิธีที่เหมาะสม ตามจำนวนมาร์คเกอร์แต่ละประเภทที่ปรากฏ

ผลลัพธ์ที่ได้ จากสมมุติฐานและฐานคติต่างๆ จะถูกนำไปคัดกรองและคัดเลือกอันที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าตำแหน่งจากการวัด (measurement) ซึ่งจะถูกนำไปกรองผ่านตัวกรอง Kalman ก่อนที่จะถูกนำไปใช้คำนวณ ค่า frustum หรือ เมทริกซ์ frustum เพื่อใช้ในการวาดภาพต่อไป รายละเอียดของขั้นตอนต่างๆ ที่กล่าวมาในขั้นต้น สามารถแจกแจงได้ดังนี้



รูปที่ 5.2: ขั้นตอนการหาพิกัดของศีรษะ

5.3.1 การแยกประเภทของจุดมาร์คเกอร์

ขั้นตอนการคัดแยกประเภทจุดมาร์คเกอร์ คือการนับจำนวนของจุดมาร์คเกอร์ประเภทต่างๆ เพื่อใช้ในการเลือกวิธีการสร้างสมมุติฐานและลดจำนวน สมมุติฐานที่เป็นไปได้ให้น้อยลงพอที่จะสามารถถูกคำนวณในขั้นต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการแบ่งลักษณะจุดมาร์คเกอร์ จะถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ จุดหมุน (pivot) และ จุดช่วย (auxiliary) โดยจุดหมุนจะสามารถมีมากที่สุดได้ทั้งหมด 4 จุด ตามจำนวนที่กล้องสามารถเห็นได้มากที่สุด โดยจุดหมุนจะมีการติดสว่างตลอดหรือไม่มีการกระพริบ และถูกติดตั้งให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นที่สามารถมองเห็นจุดหมุนทั้ง 4 ได้อย่างชัดเจน

จุดช่วย เป็นจุดที่มีจำนวนได้ไม่จำกัด ซึ่งมีการกระพริบอยู่ตลอดเวลา โดยการเพิ่มจุดช่วยก็เพื่อเป็นการเพิ่มความอิสระในมุมมองของกล้อง (FOV) หรือเพื่อให้ผู้ชมสามารถเห็นศีรษะได้อิสระมากขึ้น

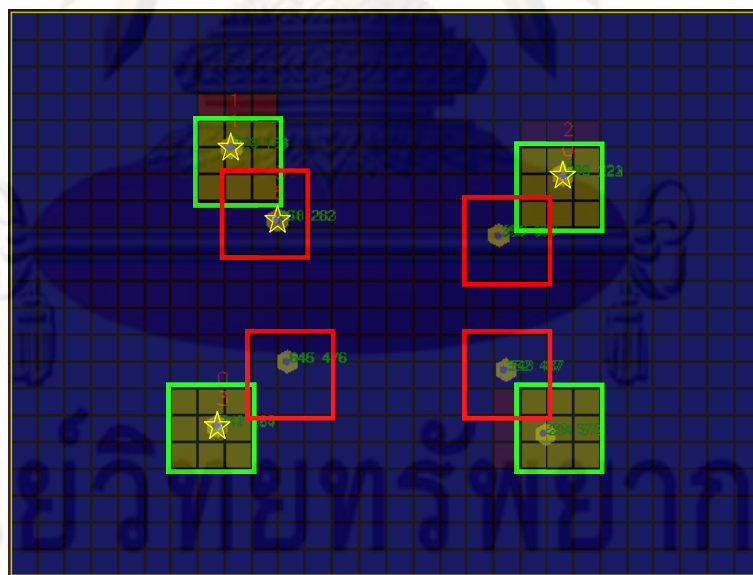
ในการแยกประเภทจุดทั้งสอง จะอาศัยการวิเคราะห์การกระพริบและใช้การคำนวณระยะเวลาของการส่องสว่างโดยเฉลี่ย ในการคำนวณตำแหน่งของจุดที่กล้องเห็นนั้น จะถูกแบ่งเป็นบริเวณต่างๆ มีลักษณะเป็นตารางซึ่งมีอัตราส่วนความกว้างยาวเท่ากับอัตราส่วนความกว้างยาวของแผ่นรับภาพของกล้อง เมื่อเกิดการปรากฏของจุดในช่องใด ค่าของช่องนั้นๆ จะถูกเปลี่ยนแปลง และค่าของทุกช่องในตารางจะมีการถดถอย ρ ซึ่ง สมการการเปลี่ยนแปลงค่าของแต่ละช่องจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (5.1)

ตารางผลลัพธ์ของการคำนวณ แสดงในรูป 5.3

$$\tau = \begin{cases} 0, & \text{ถ้าไม่เป็นจุดหมุด} \\ \text{ค่าคงตัว}, & \text{ถ้าเป็นจุดหมุด} \end{cases}$$

$$\delta = \begin{cases} 0, & \text{ถ้าไม่เป็นจุดช่วย} \\ \text{ค่าคงตัว}, & \text{ถ้าเป็นจุดช่วย} \end{cases} \quad (5.1)$$

$$I_{i,j,t} = \rho I_{i,j,t-1} + \tau - \delta$$



พื้นที่ที่มีการปรากฏของจุดมาร์คเกอร์



พื้นที่ของมาร์คเกอร์แบบจุดหมุด (Pivot)



พื้นที่ของมาร์คเกอร์แบบจุดช่วย (Auxiliary)

รูปที่ 5.3: ตารางค่าระยะเวลาของการส่องสว่างโดยเฉลี่ย

5.3.2 การสร้างสมมติฐานและฐานคติ

การสร้างสมมติฐาน จะนำเอาจำนวนจุดแต่ละประเภทที่ได้จากการนับในขั้นต้นมาทำการทดลองเปลี่ยนลำดับความสัมพันธ์ระหว่างจุดที่ปรากฏบนฉากรับภาพกับโมเดลตำแหน่งของมาร์คเกอร์ที่ทราบ ซึ่งจะทำให้การคัดกรองเลือกเฉพาะความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้

การสร้างฐานคติ จะเป็นการสมมุติความสัมพันธ์ของจุดที่ปรากฏกับโมเดล โดยอาศัยการคาดเดาจากตำแหน่งล่าสุดที่ระบบติดตามสามารถติดตามได้ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการจำลองฉายแบบจำลองอ้างอิงของตำแหน่งมาร์คเกอร์ที่ทราบลงบนฉากรับภาพ โดยอาศัยตำแหน่งและทิศทางหันล่าสุด ซึ่งสามารถใช้ฟังก์ชัน `cvProjectPoint2` ในไลบรารี `OpenCV` หลังจากนั้นก็จะทำการจับคู่ความสัมพันธ์ระหว่างจุดที่ปรากฏบนกล้องและจุดในแบบจำลองอ้างอิง โดยอาศัยระยะใกล้เคียงกันที่สุด

5.3.3 การแก้ไขความผิดรูป

เนื่องจากในทางปฏิบัติ เลนส์ของกล้องและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของกล้องแต่ละตัวนั้นแตกต่างกัน ทำให้ภาพที่กล้องแต่ละตัวเห็นนั้น เกิดความผิดรูป (distortion) ที่ต่างกัน อีกทั้งแบบจำลองของกล้องที่นิยมใช้ในการระบุตำแหน่งนั้น เป็นแบบจำลองกล้องรูเข็ม (pinhole model) ทำให้จำเป็นต้องทำการปรับเทียบค่าความผิดรูปของกล้อง เพื่อให้สามารถระบุและคำนวณตำแหน่งได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

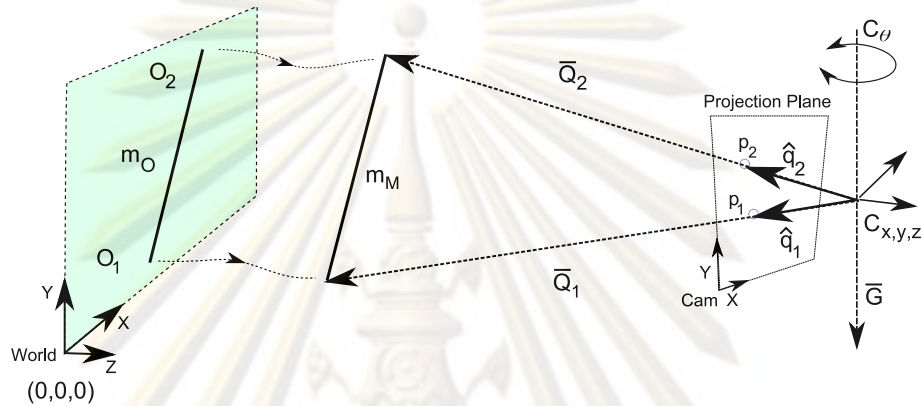
ระเบียบวิธีในการแก้ไขความผิดรูปนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งพบว่าการหาตำแหน่งได้อย่างแม่นยำนั้น จำนวนการวนซ้ำ (iterate) และระเบียบวิธีที่ใช้ มีผลอย่างมาก ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ระเบียบวิธีแบบ Gauss-Newton ในการคำนวณแก้ความผิดพลาดของจุดแต่ละจุด เนื่องจากสามารถเข้าสู่ผลลัพธ์ได้อย่างรวดเร็วกว่าวิธีอื่นๆ เช่นระเบียบวิธีแบบ Gauss-Jordan

5.3.4 การคำนวณหาตำแหน่ง (Triangulation)

การหาตำแหน่งคือการนำเอาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของมาร์คเกอร์และพิกัดอ้างอิงมาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของกล้อง ดังนั้นค่าที่ใช้ในการคำนวณจะประกอบด้วยค่าพิกัดของมาร์คเกอร์บนฉากรับภาพ (ของอุปกรณ์รับภาพ) ซึ่งอยู่ในสองมิติและค่าพิกัดอ้างอิงของมาร์คเกอร์ในโลกจริงซึ่งอยู่ในสามมิติ ปัญหาการคำนวณตำแหน่งของกล้องจากพิกัดมาร์คเกอร์ที่กล้องเห็นนี้ ถูกเรียกว่าปัญหา PnP (Perspective n Point(s) Problem) ซึ่ง n เป็นจำนวนของคู่อุปกรณ์ที่ทราบ อีกทั้งวิธีการหาคำตอบและรูปแบบของคำตอบจะมีความแตกต่างกันตามจำนวนคู่อุปกรณ์ที่ทราบ

5.3.4.1 กรณี P2P

การคำนวณเริ่มต้นจากความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูป 5.4 จากตำแหน่งจุดของมาร์คเกอร์ ที่ กล้องมองเห็น p_1, p_2 ในระนาบของการฉายของกล้อง (projection plane) ที่ระยะโฟกัส f ซึ่งในที่นี้ให้ระยะโฟกัสของทั้งแกนตั้ง f_y และแกนนอน f_x มีค่าเท่ากันและใช้รูปแบบการฉายภาพแบบ Pin-hole ซึ่งไม่มีค่าความผิดเพี้ยนของเลนส์ ด้วยสมการ (5.2) การคำนวณในลักษณะดังกล่าว คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ [45] แต่ในงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าโดยทำการปรับปรุงบนพารามิเตอร์ เพียงตัวเดียว α



รูปที่ 5.4: การหาตำแหน่งจากการมองเห็นจุด 2 จุด

$$\vec{q}_i \equiv (q_{i \cdot x}, q_{i \cdot y}, q_{i \cdot z})$$

$$q_{i \cdot x} = p_{i \cdot x} / f \quad (5.2)$$

$$q_{i \cdot y} = p_{i \cdot y} / f$$

$$q_{i \cdot z} = 1$$

จากสมมุติฐานที่ว่า \hat{q}_1, \hat{q}_2 จะต้องตัดผ่านจุดอ้างอิงหรือตำแหน่งพิกัดในโลกจริงของ มาร์คเกอร์ O_1, O_2 แต่เนื่องจาก \hat{q}_1, \hat{q}_2 ซึ่งอยู่ในพิกัดอ้างอิงของกล้อง (Camera Reference Frame) แตกต่างกับ O_1, O_2 ซึ่งอยู่ในพิกัดอ้างอิงของโลก (World Reference Frame) ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยนให้พิกัดของ \hat{q}_1, \hat{q}_2 อยู่ในพิกัดอ้างอิงของโลก

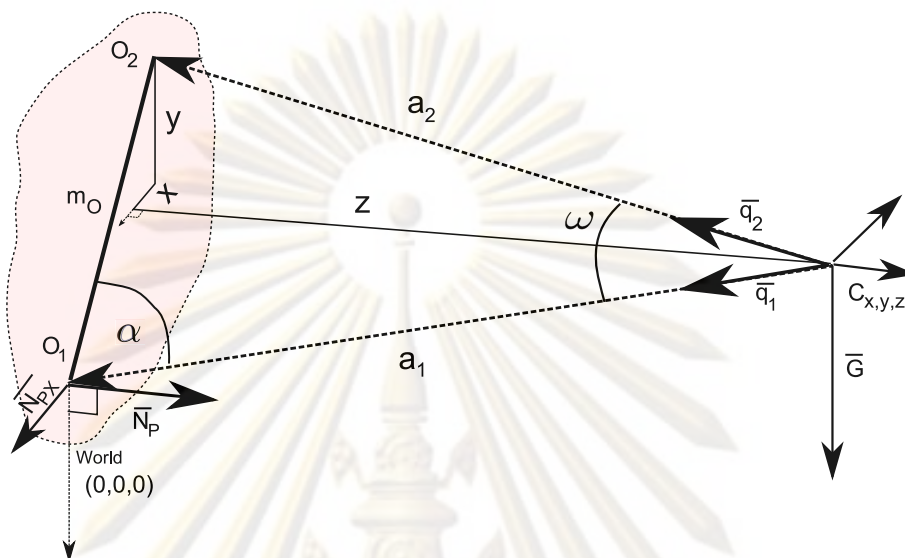
เนื่องจากกล้องอาจมีการเอียงตัว ซึ่งค่าความเอียงตัวนี้ มีความสอดคล้องและสัมพันธ์กับ ค่าทิศทางของแรงดึงดูดของโลก \vec{G} ซึ่งวัดได้จากตัววัดอัตราเร่งที่ติดตั้งอยู่ ในการคำนวณนี้ได้ทำ ภายใตสมมุติฐานที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนของการติดตั้งกล้องและตัววัดอัตราเร่ง ดังนั้นเพื่อให้ \hat{q}_1, \hat{q}_2 อยู่ในพิกัดอ้างอิงของโลก จึงสามารถทำได้โดยการหมุน \hat{q}_1, \hat{q}_2 โดยอาศัยเมทริกซ์การหมุน $M_{CamtoWorld}$ ที่คำนวณจาก ค่าอัตราเร่งที่วัดได้ $Accel$

จากการทราบ $M_{CamtoWorld}$ แนวการส่องผ่าน \hat{q}_1, \hat{q}_2 จึงคำนวณได้จากสมการ (5.3)

$$\hat{q}_i = \vec{q}_i / \|\vec{q}_i\| \quad (5.3)$$

$$\hat{q}_i = M_{CamtoWorld} \hat{q}_i$$

ในการหมุนดังกล่าว เราทราบเพียงค่าของทิศทางแนวแรงดึงดูดของโลก ยังขาดองศาการหันในแนวระนาบของกลอง C_θ และตำแหน่งของกลองทั้งสามตัวแปร C_X, C_Y, C_Z ดังนั้นในการคำนวณต่อไป จึงเป็นการใช้ความสัมพันธ์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวแปรดังกล่าว



รูปที่ 5.5: การหาตำแหน่งจากการมองเห็นจุด 2 จุด

จากการที่เวกเตอร์หนึ่งหน่วย \hat{q}_1, \hat{q}_2 จะส่องผ่านจุด O_1, O_2 ดังแสดงในรูป 5.5 ได้เส้นที่ลากจากจุดกำเนิดของกลอง \vec{Q}_1, \vec{Q}_2 ไปยัง O_1, O_2 ตามลำดับ โดย \vec{Q}_1, \vec{Q}_2 มีทิศเดียวกับ \hat{q}_1 และ \hat{q}_2 ดังนั้นขนาดของ \hat{q}_1, \hat{q}_2 จึงเท่ากับ a_1, a_2 ตามลำดับ ดังในสมการ (5.4)

$$\begin{aligned}\vec{Q}_1 &= a_1 \hat{q}_1 \\ \vec{Q}_2 &= a_2 \hat{q}_2\end{aligned}\quad (5.4)$$

และค่ามุมระหว่าง \vec{Q}_1 กับ \vec{Q}_2 คือ ω คำนวณได้จาก (5.5)

$$\omega = \text{Cos}^{-1} \hat{q}_1 \cdot \hat{q}_2 \quad (5.5)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ที่เราสามารถนำมาใช้ได้ ซึ่งต้องไม่แปรตามค่าตัวแปร C_θ, C_X, C_Y, C_Z ความสัมพันธ์แรกคือระยะจากจุด O_1 ไปยัง O_2 หรือระยะ $\|O_1O_2\|$ ดังนั้นขนาดของเวกเตอร์ a_1, a_2 จึงมีความสัมพันธ์กับระยะ $\|O_1O_2\|$ ตามกฎของ Sin ดังสมการ (5.6)

$$\frac{\|O_1O_2\|}{\text{Sin}(\omega)} = \frac{a_1}{\text{Sin}(\alpha)} = \frac{a_2}{\text{Sin}(\acute{\alpha})} \quad (5.6)$$

$$\acute{\alpha} = \Pi - \alpha - \omega$$

ความสัมพันธ์ต่อมาซึ่งใช้ในการหาค่า α คือค่าความชันของเวกเตอร์ O_1O_2 ในแนวตั้ง m_o จะเท่ากับความชันของผลต่าง ของ เวกเตอร์ \vec{Q}_1 กับ \vec{Q}_2 ในแนวตั้ง m_q เช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถหาค่าผลต่าง m_{qo} ของ m_q กับ m_o โดยฟังก์ชัน m_{qo} แสดงในสมการ (5.7)

$$\begin{aligned}
m_q &= \sqrt{\frac{\|q_{1 \cdot xy}\|^2 S_\alpha^2 - 2(E)S_\alpha S_{\alpha+\omega} + \|q_{2 \cdot xy}\|^2 S_{\alpha+\omega}^2}{-q_{1 \cdot z} S_\alpha + q_{2 \cdot z} S_{\alpha+\omega}}} \\
m_{qo} &= m_q - m_o \\
\|q_{1 \cdot xy}\|^2 &= q_{1 \cdot x}^2 + q_{1 \cdot y}^2 \\
\|q_{2 \cdot xy}\|^2 &= q_{2 \cdot x}^2 + q_{2 \cdot y}^2 \\
E &= q_{1 \cdot x} q_{2 \cdot x} + q_{1 \cdot y} q_{2 \cdot y} \\
S_\alpha &= \text{Sin}(\alpha) \\
S_{\alpha+\omega} &= \text{Sin}(\alpha + \omega) \\
S_\omega &= \text{Sin}(\omega)
\end{aligned} \tag{5.7}$$

ดังนั้นค่าตัวแปร α ที่ทำให้ m_{qo} มีค่าน้อยสุด จึงสามารถคำนวณได้หลายวิธี แต่เนื่องจากเราทราบว่าช่วงของค่า α อยู่ระหว่าง 0 ถึง Π อีกทั้งค่า α ยังสามารถประมาณได้หากทราบตำแหน่งกลองในสถานะก่อนหน้า ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการเชิงเลขในการหาค่า α

ในการหาค่า α ด้วยวิธีทางตัวเลขนั้นได้เลือกใช้วิธีการไล่ความชัน เนื่องจากสามารถให้คำตอบที่ใกล้เคียงที่สุดในกรณีที่ค่า m_q และ m_o ไม่สามารถเท่ากันได้ การไล่ความชันนั้นสามารถหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชัน ของตัวแปร α ได้ดังแสดงในสมการ (5.8)

$$\frac{\partial m_{qo}}{\partial \alpha} = \frac{(S_\omega (\|q_{1 \cdot xy}\|^2 q_{2 \cdot z} - q_{1 \cdot z} (E)) S_\alpha + (q_{1 \cdot z} \|q_{2 \cdot xy}\|^2 - (E) q_{2 \cdot z}) S_{\alpha+\omega})}{(q_{1 \cdot z} S_\alpha - q_{2 \cdot z} S_{\alpha+\omega})^2 \sqrt{\|q_{1 \cdot xy}\|^2 S_\alpha^2 - 2(E)S_\alpha S_{\alpha+\omega} + \|q_{2 \cdot xy}\|^2 S_{\alpha+\omega}^2}} \tag{5.8}$$

เมื่อได้ค่า m_q ที่ใกล้ค่า m_o ที่สุดแล้ว ค่าตำแหน่งของกลองจึงสามารถหาได้ เนื่องจากการหาตำแหน่งของกลองอาจอิงกับพิกัดโลกนั้น จำเป็นจะต้องหาระนาบอ้างอิงของพิกัดโลกให้ได้ก่อน เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้จุดมาร์คเกอร์ทั้งหมดอยู่ในระนาบเดียวกัน $O_{1 \cdot z} = O_{2 \cdot z} = 0$ ดังนั้นจึงสามารถหาระนาบ ซึ่งแทนด้วยทิศตั้งฉากของระนาบ \hat{N}_p

ดังนั้นระยะ Z จึงหาได้จาก (5.9)

$$Z = \vec{Q}_1 \cdot \hat{N}_p \tag{5.9}$$

ดังนั้นระยะ X ซึ่งขนานกับแกน C_x ซึ่งหาได้โดยการหาผลคูณไขว้ของเวกเตอร์ \hat{N}_p และ \hat{G} ซึ่ง \hat{G} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ \vec{G} ดังสมการ (5.10)

$$X = \vec{Q}_1 \cdot (\hat{N}_p \times \hat{G}) \tag{5.10}$$

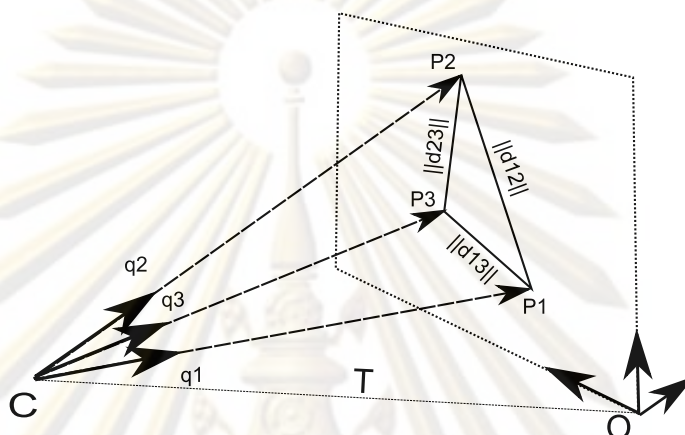
ดังนั้นระยะ Y ซึ่งขนานกับแกน C_y ซึ่งหาได้โดยการหาได้จากส่วนประกอบที่ขนานเวกเตอร์ \hat{G} ดังสมการ (5.11)

$$Y = \vec{Q}_1 \cdot \hat{G} \tag{5.11}$$

5.3.4.2 กรณี P3P

ปัญหา P3P หรือ "Perspective 3 Points Problem" คือปัญหาการคำนวณหาพิกัดหรือความสัมพันธ์ของตำแหน่งของกล้อง จากการปรากฏของจุด 3 จุด

วิธีการในการคำนวณ รูปแบบแรกคือวิธีการที่นำเสนอโดย [46] ดังแสดงในรูป 5.6 ซึ่งอาศัยการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของมาร์คเกอร์ต่างๆ ในวัตถุจริง d_{mn} แล้วจึงทำการ optimization เพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 5.6: การประมาณค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องจากจุด 3 จุด

จากพิกัดของมาร์คเกอร์ของวัตถุจริงในสามมิติ P_i สามารถอธิบายโดยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย q_i ที่ชี้จากจุดกำเนิดกล้อง C และค่าสเกลาร์ a_i

$$P_i = a_i q_i \quad (5.12)$$

จากระยะห่างของมาร์คเกอร์ในวัตถุจริง d_{mn}

$$\begin{aligned} d_{mn}^2 &= (\|a_m \mathbf{q}_m - a_n \mathbf{q}_n\|)^2 \\ &= (a_m \mathbf{q}_m - a_n \mathbf{q}_n) \cdot (a_m \mathbf{q}_m - a_n \mathbf{q}_n) \\ &= a_m^2 - 2a_m a_n (\mathbf{q}_m \cdot \mathbf{q}_n) + a_n^2 \end{aligned} \quad (5.13)$$

ค่า q_m, q_n สามารถคำนวณได้จากพิกัดของมาร์คเกอร์ที่ปรากฏบนฉากรับภาพหรือ Q_i

ในกรณีที่มีมาร์คเกอร์จำนวน 3 จุด ทำให้สามารถเขียนสมการ (5.14) ได้โดยมีพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน 3 สมการ

$$\begin{aligned} f(a_1, a_2, a_3) &= a_1^2 - 2a_1 a_2 ((q)_1 \cdot (q)_2) + a_2^2 - d_{12}^2 \\ g(a_1, a_2, a_3) &= a_2^2 - 2a_2 a_3 ((q)_2 \cdot (q)_3) + a_3^2 - d_{23}^2 \\ h(a_1, a_2, a_3) &= a_1^2 - 2a_1 a_3 ((q)_1 \cdot (q)_3) + a_3^2 - d_{13}^2 \end{aligned} \quad (5.14)$$

ในการหาคำตอบจะเป็นการหาค่าของแต่ละสมการโดยใช้ non-linear optimization โดยการหาค่า $(\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3)$ ที่ทำให้สมการ f, g, h มีค่าเข้าใกล้ 0, $f(a_1 + \Delta_1, a_2 + \Delta_2, a_3 + \Delta_3) \rightarrow 0$ เนื่องจากสมการ f, g, h ไม่เป็นเชิงเส้นดังนั้นจึงทำให้สมการ f, g, h เป็นเชิงเส้น โดยการประมาณจากย่านใกล้เคียง (Neighborhood) พารามิเตอร์ทั้งสามตัวของแต่ละสมการ ดังนั้นจึงได้สมการที่ (5.15)

$$f(a_1 + \Delta_1, a_2 + \Delta_2, a_3 + \Delta_3) = f(a_1, a_2, a_3) + \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial a_1} & \frac{\partial f}{\partial a_2} & \frac{\partial f}{\partial a_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

หรือสามารถเขียนให้ทั้ง 3 สมการอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้ (5.16)

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(a_1, a_2, a_3) \\ g(a_1, a_2, a_3) \\ h(a_1, a_2, a_3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial a_1} & \frac{\partial f}{\partial a_2} & \frac{\partial f}{\partial a_3} \\ \frac{\partial g}{\partial a_1} & \frac{\partial g}{\partial a_2} & \frac{\partial g}{\partial a_3} \\ \frac{\partial h}{\partial a_1} & \frac{\partial h}{\partial a_2} & \frac{\partial h}{\partial a_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

เมทริกซ์ partial derivative ที่ได้คือ jacobian matrix(J) ถ้าหาก J สามารถหาเมทริกซ์ผกผันได้จะทำให้สามารถใช้การค้นหาคำตอบเช่นการค้นหาคำตอบแบบการไล่ความชัน (gradient descend) ดังนั้นจึงสามารถเขียนเมทริกซ์ที่ใช้ในการ optimization ได้ดังสมการ (5.17)

$$\begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{bmatrix} = -J^{-1}(a_1, a_2, a_3) \begin{bmatrix} f(a_1, a_2, a_3) \\ g(a_1, a_2, a_3) \\ h(a_1, a_2, a_3) \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

ในการคำนวณแบบ iterate เพื่อให้ได้คำตอบสามารถแสดงเป็นสมการ (5.18) ได้ โดย A คือคำตอบที่ได้จากการคำนวณในแต่ละครั้งของฟังก์ชัน f, g และ h

$$A^{k+1} = A^k - J^{-1}(A^k)f(A^k) \quad (5.18)$$

หาคำตอบของสมการนี้ สามารถมีได้หลายคำตอบ [47—49] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ค่าเริ่มต้นในการคำนวณจากค่าพิกัดและการหาค่าเริ่มต้นของกล่องเขาหอย

5.3.4.3 กรณี P4P

ในกรณีที่มีจุดที่สัมพันธ์กัน 4 จุด ในงานวิจัยนี้จะอาศัยฟังก์ชัน `cvFindExtrinsicParam2` และเนื่องจากตำแหน่งการติดตั้งมาร์คเกอร์อินฟราเรดนั้น ทั้งหมดอยู่ในระนาบเดียวกัน ทำให้ในการหาผลเฉลย ฟังก์ชัน `cvFindExtrinsicParam2` จะอาศัยการคำนวณค่าเริ่มต้นจากการหาโดยวิธี directed homography เป็นวิธีที่มีความเสถียรภาพอย่างมาก หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณปรับแก้ค่าตำแหน่งให้ละเอียดยิ่งขึ้นโดยอาศัยวิธีกำลังสองน้อยสุด (least-square)

5.3.5 การคัดกรองและคัดเลือกผลลัพธ์

ในขั้นตอนนี้ ค่าสมมุติฐานและฐานคติที่ได้รับการคำนวณหาพิกัดและทิศทางเรียบร้อยแล้ว จะถูกกรองและคัดเลือกเพื่อหา คำตอบที่ถูกต้องที่สุด โดยอาศัยกฎในการหาดังนี้

- ต้องมีทิศทางการหันสัมพันธ์กับทิศทางการหันที่เซนเซอร์วัดอัตราเร่งประมาณได้
- ต้องมีระยะจัดเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งล่าสุดไม่เกินค่าที่กำหนดไว้
- มีระยะจัดใกล้กับตำแหน่งล่าสุดที่สุด
- มีตำแหน่งในปริมาตรที่เป็นไปได้ คืออยู่หน้าจอแสดงผล และอยู่ภายในบริเวณใช้งาน
- เมื่อทำการฉายตำแหน่งของมาร์คเกอร์ลงไปยังฉากรับภาพ โดยตำแหน่งที่ได้จากสมมุติฐานและฐานคติแล้ว ค่าความผิดพลาด หรือระยะจัดของคู่จุดที่สัมพันธ์กันต้องมีค่าไม่เกินที่กำหนด

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.6 Kalman filter

เมื่อสามารถเลือกค่าตำแหน่งและทิศทางที่คิดว่าน่าจะถูกที่สุดแล้ว ก็จะนำค่าที่ได้มาคำนวณผ่านตัวกรอง Kalman ซึ่งจะช่วยในการคาดการณ์ตำแหน่งและกรองความผิดพลาดได้โดยอาศัยทฤษฎีของ Kalman

5.3.6.1 ทฤษฎี Kalman filter

ตัวกรอง Kalman จัดได้ว่าเป็นตัวกรองชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการจัดการกับข้อมูลของระบบติดตามตำแหน่งรูปแบบต่างๆ เช่น Radar GPS และ Head Tracking ในการทำงานสามารถอธิบายได้จากการลองจินตนาการถึงนกที่กำลังบินอยู่ในป่าที่เต็มไปด้วยกิ่งไม้และใบไม้ ภาพของนกที่เราเห็นจะปรากฏแฉบเป็นช่วงๆ ปรากฏเพียงชั่วขณะที่ไม่ได้โดนบังด้วยใบไม้ ดังนั้นถ้าเราต้องการที่จะประมาณตำแหน่งของนก เราก็สามารถคาดเดาโดยการประมาณความเป็นไปได้ที่นกจะอยู่ ณ ตำแหน่งใดๆ จากความเร็วและทิศทางในการบินของนก การคาดเดานี้สามารถใช้หลักความน่าจะเป็น ร่วมกับโมเดลในการบินของนกจากการประมาณ ในกรณีที่การเผ่าสังเวยมีความคลาดเคลื่อน ตำแหน่งที่ระบุได้มีความผิดพลาดนั้น วิธีการประมาณดังกล่าวก็จะสามารถช่วยลดความผิดพลาดจากการสังเกตได้ วิธีการประมาณนี้เรียกว่า Kalman Filtering ซึ่งพัฒนาโดย Rudolf E. Kalman [50]

จากกฎทางฟิสิกส์ การเคลื่อนที่ของวัตถุตำแหน่ง X, Y, Z จะมีความสัมพันธ์กับความเร็ว $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$ ในทิศทางนั้นๆ ดังสมการ (5.19)

$$X_{t+\Delta} = X_t + \dot{X}\Delta \quad (5.19)$$

จากโมเดลความน่าจะเป็น ซึ่งใช้รูปแบบการแจกแจงแบบเกาส์ (linear gaussian distributions) ดังนั้นเราจึงประมาณรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นแบบเกาส์ (linear gaussian transition model) ได้ดังสมการ (5.20)

$$P(X_{t+\Delta} = x_{t+\Delta} | X_t = x_t, \dot{X}_t = \dot{x}_t) = N(x_t + \dot{x}_t\Delta, \sigma)(x_{t+\Delta}) \quad (5.20)$$

ในขณะที่วัตถุมีการเคลื่อนที่ ณ ขณะเวลาต่างๆ ในช่วงนั้น เราจะสามารถประมาณความน่าจะเป็นของตำแหน่งของวัตถุได้จากความสัมพันธ์ในสมการ (5.21) ซึ่งให้ $P(X_t | \mathbf{e}_{1:t})$ เป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นของตำแหน่งวัตถุ ณ ขณะนั้น และ $P(X_{t+1} | \mathbf{x}_t)$ เป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นของตำแหน่งที่วัตถุจะปรากฏจากตำแหน่งในครั้งที่แล้ว

$$P(X_{t+1} | \mathbf{e}_{1:t}) = \int_{\mathbf{x}_t} P(X_{t+1} | \mathbf{x}_t) P(\mathbf{x}_t | \mathbf{e}_{1:t}) d\mathbf{x}_t \quad (5.21)$$

และเมื่อได้รับทราบพิกัดตำแหน่งใหม่จากอุปกรณ์วัด $P(\mathbf{e}_{t+1}|\mathbf{X}_{t+1})$ ก็จะทำการประมาณตำแหน่งของวัตถุ โดยพิจารณาควบคู่กับข้อมูลใหม่ ภายใต้โมเดลความผิดพลาดของข้อมูลแบบ Gaussian ที่ได้ทำการประมาณมาจากขั้นที่แล้ว $P(\mathbf{X}_{t+1}|\mathbf{e}_{1:t})$ ดังนั้นจึงสามารถทำการปรับปรุงสถานะ (ตำแหน่ง) ได้ดังแสดงในสมการ (5.22)

$$P(\mathbf{X}_{t+1}|\mathbf{e}_{1:t+1}) = \alpha P(\mathbf{e}_{t+1}|\mathbf{X}_{t+1})P(\mathbf{X}_{t+1}|\mathbf{e}_{1:t}) \quad (5.22)$$

ตลอดเวลาที่ผ่านมา เมื่อได้รับข้อมูลใหม่เข้ามา การปรับปรุงการประมาณตำแหน่งจะสามารถกระทำได้โดยการทำตามสมการ (5.21) และสมการ (5.22) วนซ้ำกันไปเรื่อยๆ ได้อย่างต่อเนื่อง

จากหลักการพื้นฐานของตัวกรอง Kalman ดังนั้นสำหรับกรณีทั่วไป จึงสามารถเขียนสมการที่ใช้ในการปรับปรุง ซึ่งจะประมาณสถานะปัจจุบัน \mathbf{x}_k จากสถานะที่แล้ว \mathbf{x}_{k-1} โดยมีการเพิ่มให้สามารถทำการควบคุมระบบผ่านทางตัวแปรควบคุม (control) u_k ได้ดังสมการ (5.23) กำหนดให้

- \mathbf{x} สถานะ (State)
- F รูปแบบการเปลี่ยนแปลง (Transition Model)
- W ความแปรปรวนของขบวนการ (Process Noise)
- B รูปแบบการส่งผ่านควบคุม
- u สัญญาณควบคุม
- z การวัด (Measurement)
- V ค่าความผิดพลาดของการวัด (Measurement Noise)
- H แบบจำลองการวัด (Measurement Model)

$$\mathbf{x}_k = F_k \mathbf{x}_{k-1} + B_k u_k + W_k \quad (5.23)$$

โดยค่าความแปรปรวนของขบวนการ W_k นั้นถูกสมมุติให้เป็นการแจกแจงปกติแบบหลายตัวแปรที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 ภายใต้ความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (covariance) Q_k ดังสมการ (5.24)

$$W_k \sim (N, Q_k) \quad (5.24)$$

ณ เวลา k ข้อมูลจากการสังเกตหรืออุปกรณ์วัด (z_k) ของสถานะ \mathbf{x}_k จากสามารถหาได้โดยสมการ (5.24) ซึ่งกำหนดให้ H_k เป็นแบบจำลองการวัดหรือรูปแบบการแปลงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลวัดกับสถานะ และ V_k เป็นรูปแบบการแจกแจงค่าความผิดพลาดจากการวัดซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ (5.26) โดยสมมุติว่ามีความผิดพลาดแบบ white noise ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 บนค่าความแปรปรวนร่วมเกี่ยว R_k

$$z_k = H_k \mathbf{x}_k + V_k \quad (5.25)$$

$$V_k \sim N(0, R_k) \quad (5.26)$$

ณ สถานะเริ่มต้นค่าความผิดพลาดหรือสัญญาณรบกวนของทุกข้อมูล x_0, w_i, V_i และสถานะจะถูกสมมติให้มีความอิสระจากกัน

ในการประยุกต์ใช้งานตัวกรอง Kalman สามารถแบ่งออกสองขั้นตอนคือขั้นตอนการประมาณ (predict) กับปรับปรุง (update) ซึ่งมีพื้นฐานจากสมการที่ (5.21) และ (5.22) ตามลำดับ โดยในการนำเสนอนี้กำหนดให้ $\hat{x}_{n|m}$ แทนการประมาณสถานะ x ที่เวลา n จากการสังเกตจนถึงเวลา m สถานะของตัวกรองสามารถแสดงได้เป็นสองตัวแปรดังนี้

$\hat{x}_{k|k}$ คือเวกเตอร์การประมาณสถานะ
 $P_{k|k}$ คือเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (covariance matrix) ซึ่งบ่งบอกความแม่นยำของการประมาณค่า

ขั้นตอนการประมาณ (Predict)

การประมาณสถานะ

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_{k-1} u_{k-1}$$

การประมาณเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมเกี่ยว

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_{k-1}$$

ขั้นตอนการปรับปรุง (Update)

นวัตกรรมหรือผลการวัดตกค้าง

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_{k-1} u_{k-1}$$

(Innovation or measurement residual)

นวัตกรรมหรือผลตกค้างของค่าความแปรปรวนร่วมเกี่ยว

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_{k-1}$$

(Innovation or residual covariance)

อัตราขยาย Kalman ที่เหมาะสมที่สุด

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1}$$

(Optimal Kalman gain)

การปรับปรุงค่าการประมาณสถานะ

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k$$

(Updated state estimate)

การปรับปรุงการประมาณค่าความแปรปรวนร่วมเกี่ยว

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}$$

(Updated estimate covariance)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.6.2 พารามิเตอร์ของตัวกรอง Kalman

ในงานวิจัยนี้แบบจำลองของการเคลื่อนที่ของศีรษะเป็นแบบจำลองอย่างง่าย ซึ่งเป็นการประมาณการเคลื่อนที่ในรูปเชิงเส้น ดังแสดงในสมการ (5.27) โดยให้ทิศการหันศีรษะถูกเขียนอยู่ในรูปแบบของ Rodrigues rotational vector

กำหนดให้

- T_t ตำแหน่งพิกัดในกรอบอ้างอิงของโลก ณ เวลา t
- \dot{T}_t ความเร็วเชิงเส้นในกรอบอ้างอิงของโลก ณ เวลา t
- R_t ทิศทางการหันศีรษะในกรอบอ้างอิงของโลก ณ เวลา t
- \dot{R}_t ความเร็วเชิงมุมของทิศการหันศีรษะในกรอบอ้างอิงของโลก ณ เวลา t
- Δt คาบเวลา

$$T_{t+1} = T_t + \Delta t \cdot \dot{T}_t \quad (5.27)$$

$$R_{t+1} = R_t + \Delta t \cdot \dot{R}_t$$

ในการคำนวณค่าของตัวกรอง Kalman ได้ใช้ฟังก์ชันตัวกรอง Kalman ของ OpenCV ดังนั้นค่าของเมทริกซ์ต่างๆ จึงแสดงได้ดังนี้

- สถานะ (State)

$$x = \begin{bmatrix} T \\ R \\ \dot{T} \\ \dot{R} \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

- รูปแบบการเปลี่ยนแปลง (Transition Model)

$$F = \begin{bmatrix} I & 0 & \Delta t I & 0 \\ 0 & I & 0 & \Delta t I \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

- ความแปรปรวนของขบวนการ (Process Noise)

$$W = \begin{bmatrix} AI & 0 & \dot{A}I & 0 \\ 0 & BI & 0 & \dot{B}I \\ 0 & 0 & CI & 0 \\ 0 & 0 & 0 & DI \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

- A ความเชื่อมั่นของการประมาณตำแหน่ง
- B ความเชื่อมั่นของการประมาณทิศการมอง
- A ความเชื่อมั่นของการใช้ค่าประมาณความเร็วเชิงเส้น
- B ความเชื่อมั่นของการใช้ค่าประมาณความเร็วเชิงมุมของทิศการมอง
- C ความเชื่อมั่นของการประมาณความเร็วเชิงเส้น
- D ความเชื่อมั่นของการประมาณความเร็วเชิงมุมของทิศการมอง

- การวัด (Measurement)

$$z = \begin{bmatrix} T \\ R \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

- แบบจำลองการวัด (Measurement Model)

$$H = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

- ค่าความผิดพลาดของการวัด (Measurement Noise)

$$V = \begin{bmatrix} \alpha I & 0 \\ 0 & \beta I \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

- α ความคลาดเคลื่อนของการวัดตำแหน่ง
- β ความคลาดเคลื่อนของการวัดทิศการมอง

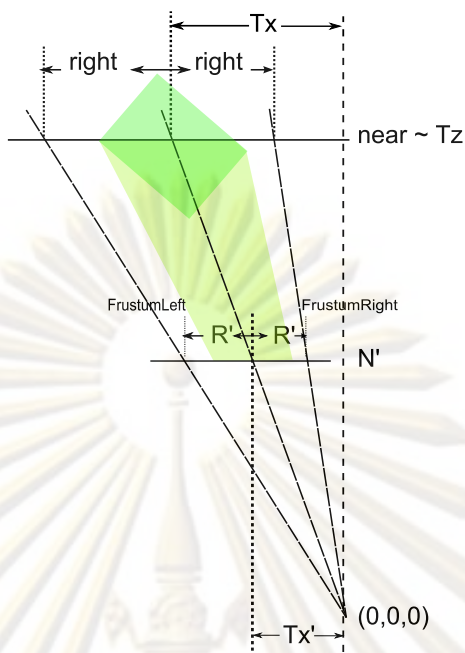
5.4 การแสดงผล

เมื่อสามารถประมาณตำแหน่งของศีรษะได้จากขั้นตอนในขั้นต้น ก็จะทำการนำเอาค่าตำแหน่งที่ได้มาใช้ในการสร้างเมทริกซ์การฉาย เพื่อใช้ในการวาดภาพสามมิติ ซึ่งในกรณีที่ตำแหน่งของผู้ชมหรือดวงตา ไม่ได้อยู่ที่จุดกำเนิดนั้น การคำนวณค่า frustum จะสามารถทำได้ดังนี้

5.4.1 การคำนวณ Frustum

ในงานวิจัยนี้การแสดงผลจะอาศัยการวาดภาพสามมิติ โดยไลบรารี OpenGL จะสามารถคำนวณค่า frustum ที่สัมพันธ์กับมุมมองได้ดังนี้

ในกรณีที่ให้ฉากรับภาพอยู่ที่ระยะอิสระจากระยะฉากฉายภาพจริง (สมมุติให้ near plane $N' = 1$) สามารถคำนวณได้ดังรูป 5.7 และแสดงในสมการ (5.4.1)



รูปที่ 5.7: การคำนวณค่า Frustum

กำหนดให้

<i>right</i>	ขนาดครึ่งหนึ่งของความกว้างของหน้าจอในโลกจริง
R'	ขนาดครึ่งหนึ่งของหน้าจอ ใน Frustum
<i>near</i>	ระยะห่างจากฉากรับภาพในโลกจริง
N'	ระยะห่างจากฉากรับภาพในโลกเสมือน
T_x	ตำแหน่งของดวงตาในแกน X หรือตำแหน่งของดวงตาในระนาบจอภาพ
T_z	ตำแหน่งของดวงตาในแกน Z หรือระยะห่างของดวงตากับจอภาพ
T'_x	ตำแหน่งของดวงตาในระนาบจอภาพของฐานของ Frustum
<i>FrustumLeft</i>	ค่า Frustum ของขอบจอด้านซ้าย
<i>FrustumRight</i>	ค่า Frustum ของขอบจอด้านขวา

$$T_z = near$$

$$T'_x = T_x N' / T_z$$

$$R' = right N' / T_z$$

$$FrustumLeft = T'_x - R'$$

$$FrustumRight = T'_x + R'$$

การคำนวณนี้สามารถนำไปใช้กับทั้งสองแกนของระนาบจอแสดงผล

บทที่ 6

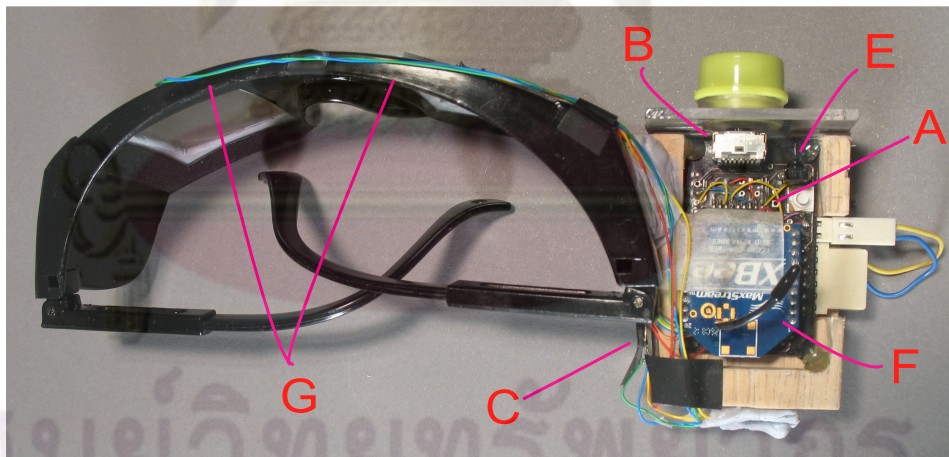
ระบบที่ได้รับการพัฒนา

ระบบที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้เมื่อเสร็จสิ้นแล้วประกอบด้วยชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้น ประกอบด้วย

6.1 แว่นชัตเตอร์ (Shutter Glasses with Head Tracking)

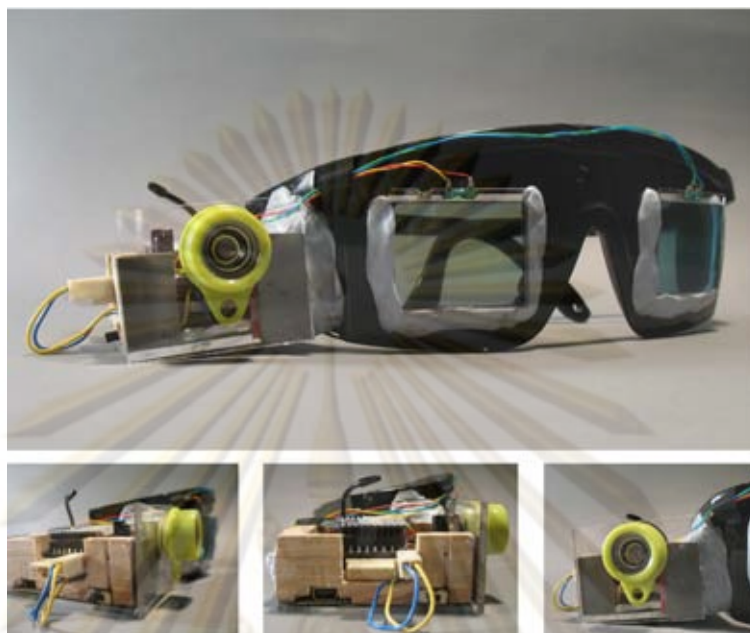
แว่นชัตเตอร์ ดังแสดงในรูป 6.1 ประกอบด้วย

- (A) ระบบประมวลผลกลาง PIC24H12GP201
- (B) กล้อง
- (C) วงจรขับแว่น MAX3238
- (D) ระบบไฟเลี้ยงและแบตเตอรี่
- (E) อุปกรณ์รับสัญญาณประสานจังหวะ
- (F) ระบบสื่อสาร
- (G) LCD Shutter



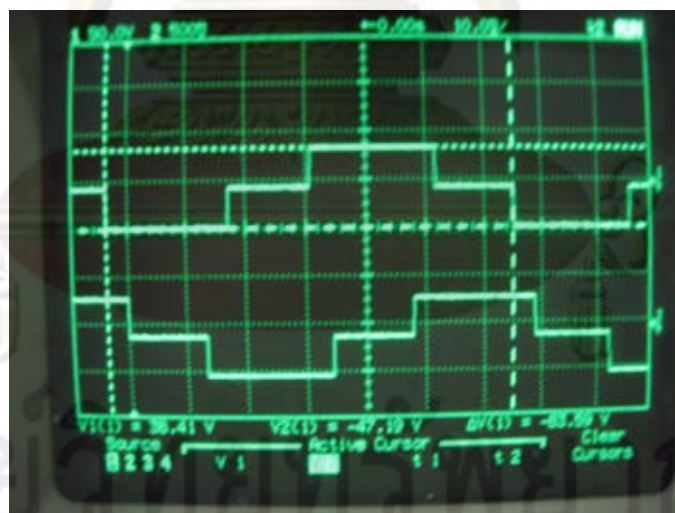
รูปที่ 6.1: แว่นชัตเตอร์ (มูมบ่น)

รูป 6.2 แสดงภาพโดยรวมของแว่นชุดเตอร์



รูปที่ 6.2: แว่นชุดเตอร์

รูป 6.3 สัญญาณที่ได้จากวงจรรับแว่นชุดเตอร์

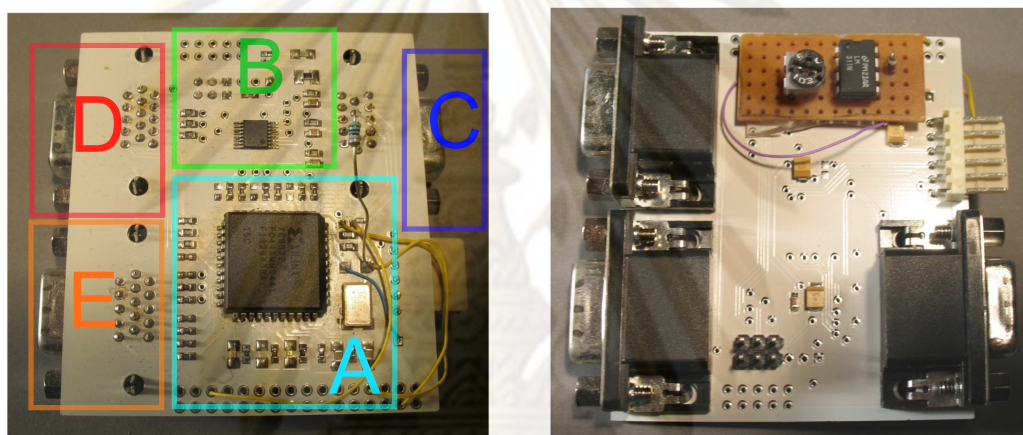


รูปที่ 6.3: สัญญาณจากวงจรรับแว่นชุดเตอร์

6.2 อุปกรณ์แทรกสัญญาณ (Marker Insertion Box)

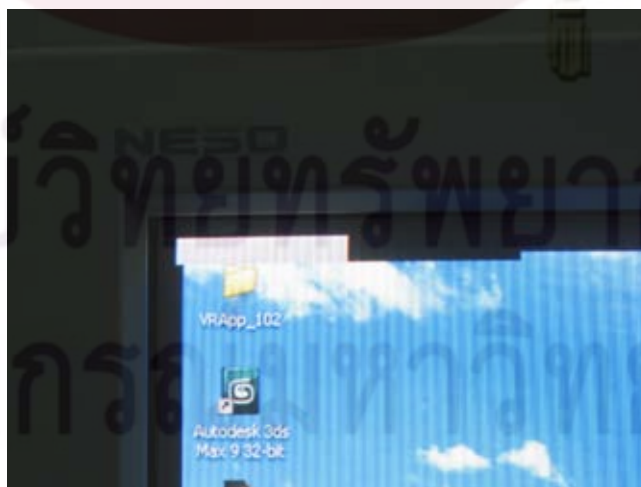
รูป 6.4 แสดงอุปกรณ์แทรกสัญญาณซึ่งประกอบด้วย

- (A) อุปกรณ์ CPLD XC9572XL และวงจรดิจิทัล
- (B) วงจรรวมสลับลายแอนะล็อก MAX4028
- (C) สัญญาณเข้า
- (D) สัญญาณออกชุดแรก
- (E) สัญญาณออกชุดที่สอง



รูปที่ 6.4: อุปกรณ์แทรกสัญญาณ

รูป 6.5 แสดงภาพสัญญาณที่ปรากฏบนหน้าจอ (CRT) ซึ่งได้จากการแทรกสัญญาณโดยอุปกรณ์แทรกสัญญาณ

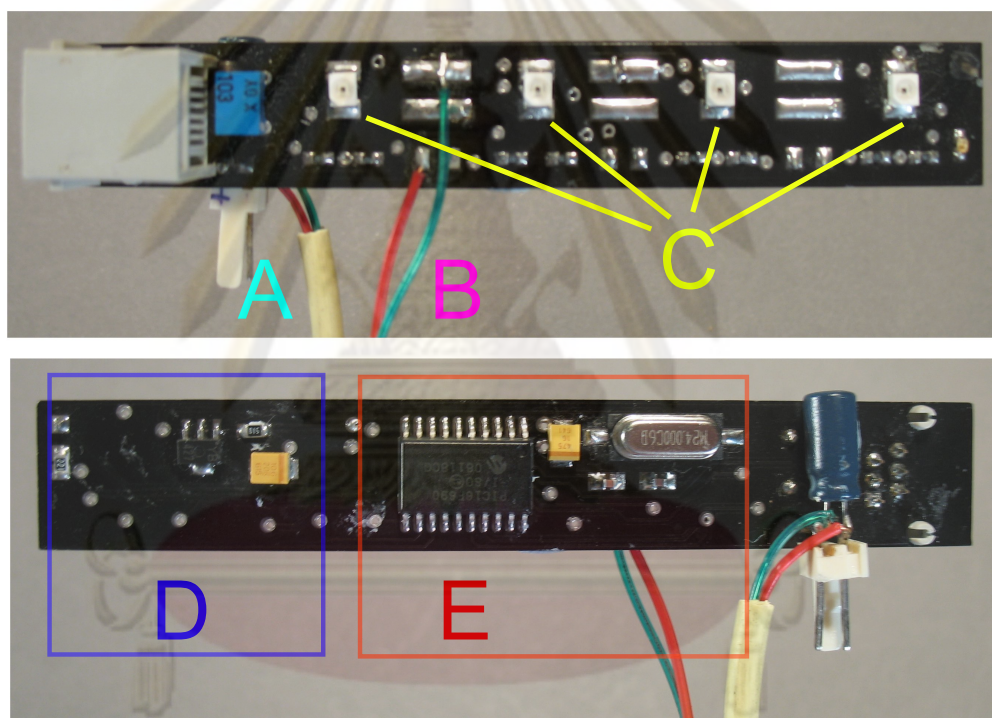


รูปที่ 6.5: สัญญาณที่ปรากฏบนหน้าจอ

6.3 ตัวตรวจจับการปรากฏของสัญญาณบนฉากรับภาพ (ODD)

วงจรตรวจจับการปรากฏของสัญญาณบนฉากรับภาพที่ได้รับการพัฒนาแสดงในรูป 6.6 แสดงอุปกรณ์ต่างๆในวงจร ODD

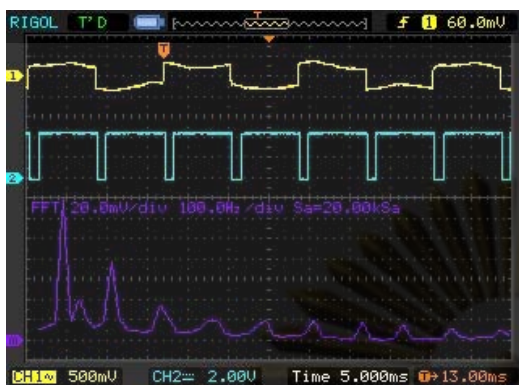
- (A) ไฟเลี้ยง
- (B) สายต่อไปยังไดโอดเปล่งแสง
- (C) ไดโอดไวแสง
- (D) ภาคขับไดโอดเปล่งแสง
- (E) ระบบประมวลผล PIC16F690



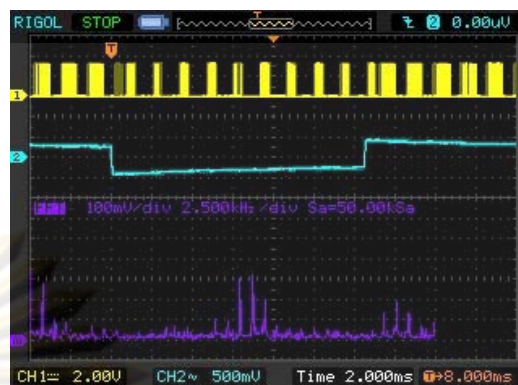
รูปที่ 6.6: ตัวตรวจจับการปรากฏของสัญญาณบนฉากรับภาพ

จากการทดลองพบว่า ODD สามารถตรวจจับสัญญาณได้ที่ความถี่ตั้งแต่ $20Hz$ จนถึง $400Hz$ ซึ่งแสดงในรูป 6.7

สัญญาณอินฟราเรดที่ส่งออกมาจากวงจร ODD ซึ่งจะมีรหัสตามข้างของตาที่ตรวจจับได้ แสดงในรูป 6.8



รูปที่ 6.7: การตรวจจับสัญญาณของ ODD ที่ความถี่ $50Hz$



รูปที่ 6.8: สัญญาณอินฟราเรดจาก ODD $40Hz$

6.4 ระบบโดยรวม

ระบบโดยรวมแสดงในรูป 6.9



รูปที่ 6.9: ระบบโดยรวม

บทที่ 7

การเทียบค่าพารามิเตอร์ของกล้อง

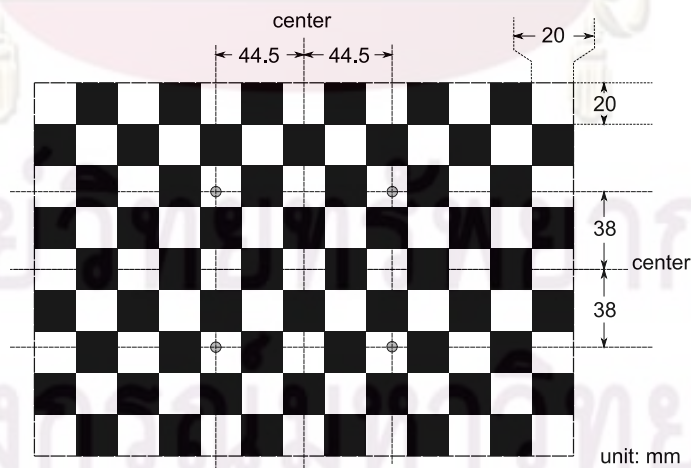
7.1 ขั้นตอนการทำงาน

การจำลองโมเดลของกล้องรูเข็มในทางทฤษฎีเป็นการสมมุติให้แสงจากจุดกำเนิดฉายผ่านรูเข็มขนาดเล็กมากๆ ไปยังฉากรับภาพ แต่ในทางปฏิบัติกล้องจะใช้เลนส์ที่มีช่องรับแสงขนาดใหญ่ในการรวมแสง ซึ่งทำให้เกิดความผิดรูป (distortion) อีกทั้งความคลาดเคลื่อนในการผลิต ความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งกับกล้อง ปัจจัยทั้งหมดนี้ส่งผลให้ในการใช้งานจริงจำเป็นต้องปรับแก้ไขความผิดรูปดังกล่าว เพื่อให้ระบบระบุตำแหน่งสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

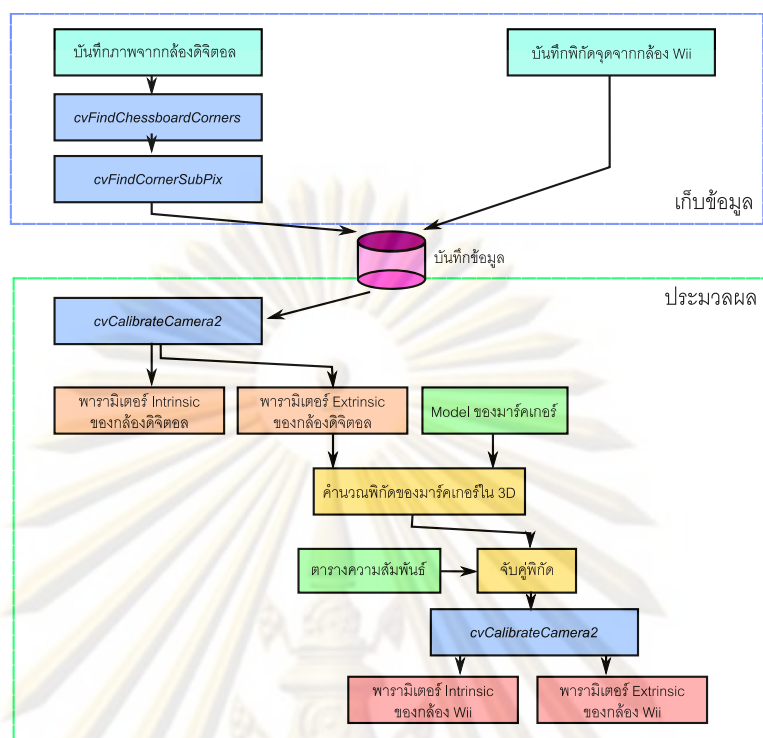
จากโมเดลความผิดรูปที่ได้กล่าวมาในบทข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงใช้การหาค่าความผิดรูปของกล้อง Wii โดยอาศัยไลบรารี OpenCV ทว่ในการที่จะหาค่าความผิดรูปของกล้อง Wii ซึ่งสามารถมองเห็นจุดได้ในรูปแบบพิกัดและได้เพียงครั้งละ 4 จุด จึงทำได้ยากกว่าการหาค่าความผิดรูปจากอุปกรณ์รับภาพที่สามารถเห็นภาพทั้งภาพโดยทั่วไป ทำให้ไม่สามารถใช้ระบบการเทียบค่าโดยใช้ตารางหมากรุกดังที่ใช้ใน OpenCV ได้

เพื่อให้สามารถเทียบค่าพารามิเตอร์ได้ จึงมีแนวคิดที่จะทำระบบเทียบค่าโดยอาศัยการอ้างอิงจากกล้องที่สามารถเทียบค่าได้ง่ายและแม่นยำ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้องดิจิทัล Canon PowerShot A620 มาช่วยในการเทียบค่า โดยจะทำหน้าที่หาพิกัดของวัตถุต่างๆ ในโลกสามมิติ

ขั้นตอนการเทียบค่าดังแสดงในรูป 7.2 สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนคือการเก็บผลและการคำนวณ ในขั้นการเก็บผล จะอาศัยแผนเทียบค่าดังรูป 7.1 ซึ่งประกอบด้วยตารางหมากรุกเพื่อใช้ในการเทียบตำแหน่งกับกล้องดิจิทัล และอินฟราเรดมาร์คเกอร์เพื่อใช้ในการเทียบค่ากับกล้อง Wii โดยมาร์คเกอร์อินฟราเรดจะถูกติดตั้งอย่างแม่นยำบนตารางหมากรุกซึ่งจะทำให้สามารถระบุความสัมพันธ์ในทางเรขาคณิตของตารางหมากรุกและมาร์คเกอร์ได้

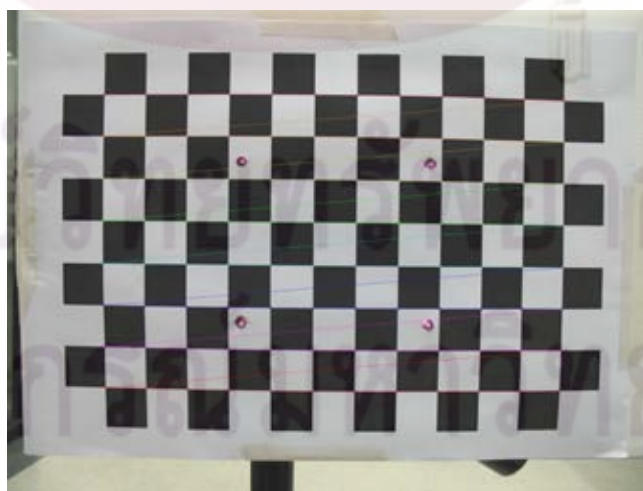


รูปที่ 7.1: แผนปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง



รูปที่ 7.2: ขั้นตอนการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ของกล้อง

ทั้งกล้องดิจิทัลและกล้อง Wii จะทำการเก็บค่าพร้อมๆกัน โดยกล้องดิจิทัลจะทำการถ่ายรูปตารางหมากรุก และกล้อง Wii จะทำการบันทึกพิกัดของมาร์คเกอร์ในพลาเนตที่เห็น หลังจากนั้นภาพของกล้องดิจิทัลจะถูกส่งไปยังประมวลผลในขั้นแรก เพื่อหาพิกัดของมุมในตารางหมากรุก โดยอาศัย ฟังก์ชัน *cvFindChessconner* หลังจากนั้นจึงผ่านฟังก์ชัน *cvFindconnersubpix* เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ดังแสดงในรูป 7.3 เป็นภาพที่ถ่ายจากกล้องดิจิทัลจะถูกทำการแปลงเพื่อหามุมต่างๆของตารางหมากรุก



รูปที่ 7.3: ผลลัพธ์ของการหามุมของตารางหมากรุก

เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการเก็บค่าขั้นตอนต่อมาคือการประมวลผลข้อมูล โดยในขั้นแรกจะเป็นการเทียบค่าพารามิเตอร์ของกล้องดิจิทัล โดยการนำค่ามุมของตารางหมากรุกที่บันทึกไว้ไปผ่านฟังก์ชัน *cvCameracalibration* จะทำให้ได้พารามิเตอร์ภายใน (intrinsic) และพารามิเตอร์ภายนอก (extrinsic) ของกล้องดิจิทัล

จากค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องดิจิทัล เมื่อทำการแปลงพิกัดของกล้องก็จะทำให้ทราบว่า มุมต่างๆของตารางหมากรุกนั้นอยู่ในตำแหน่งใดในกรอบอ้างอิงโลกในกรณีให้กล้องอยู่กับที่ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาตำแหน่งของมาร์คเกอร์อินฟราเรดได้จากรูปแบบการติดตั้งดังแสดงในรูป 7.1

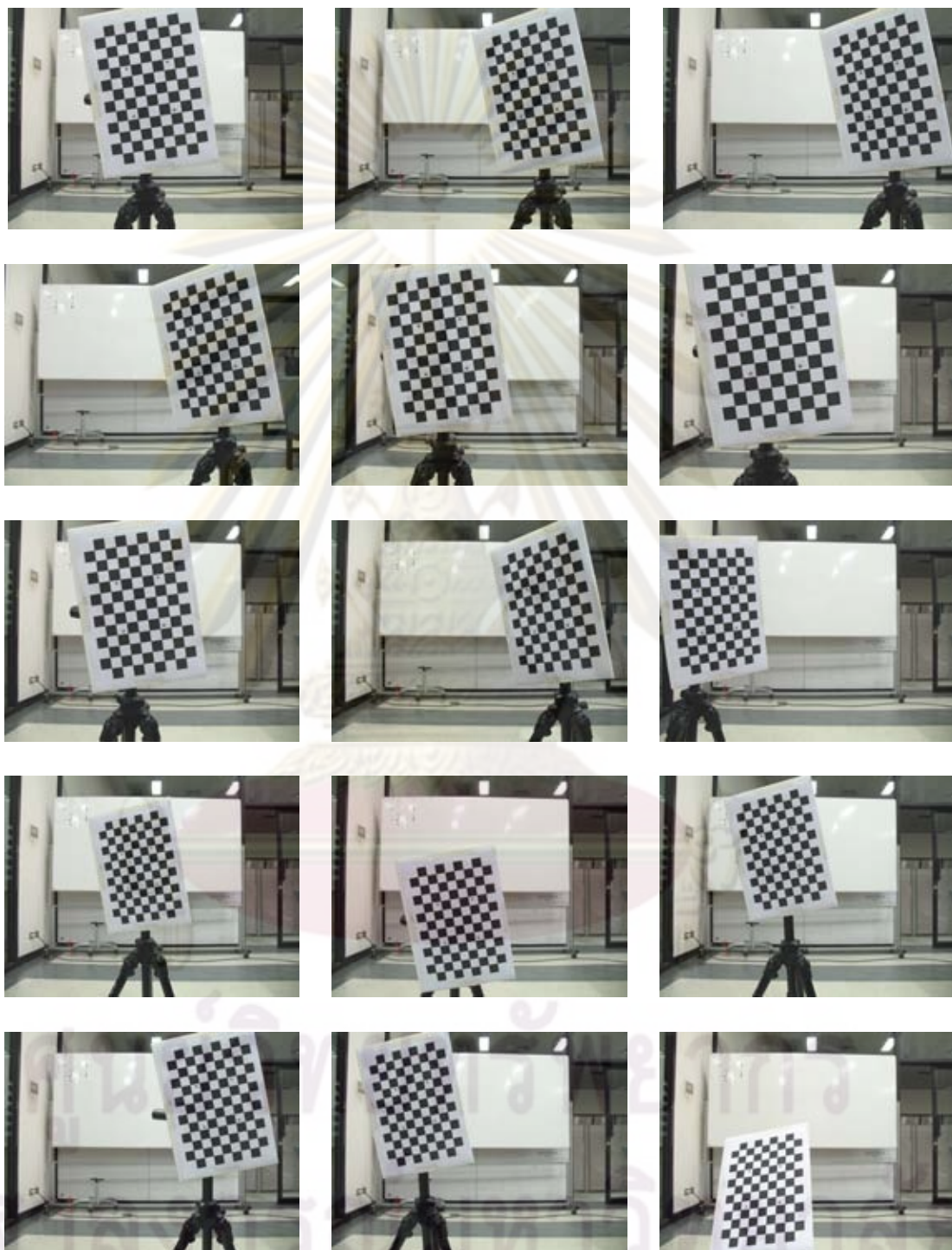
พิกัดของมาร์คเกอร์อินฟราเรดที่ได้นั้นจะถูกใช้เป็นพิกัดอ้างอิงเพื่อใช้ในการเทียบค่าพารามิเตอร์ของกล้อง Wii ทว่าในการเทียบค่านั้นจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ของพิกัดอ้างอิงที่หาได้และพิกัด (ในสองมิติ) ที่เก็บค่าไว้ ดังนั้นตารางความสัมพันธ์ ซึ่งผู้ปรับค่าจะป้อนความสัมพันธ์หรือระบุว่าพิกัดอ้างอิงกับค่าที่เก็บไว้อันใดเป็นจุดเดียวกัน

เมื่อสามารถจับคู่พิกัดอ้างอิงกับจุดที่ปรากฏบนกล้อง Wii ได้แล้ว ก็จะทำกรหาพารามิเตอร์ของกล้อง Wii ได้โดยอาศัยฟังก์ชัน *cvCamcal* ซึ่งจะทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ ความผิดพลาดของเลนส์ในกล้อง Wii

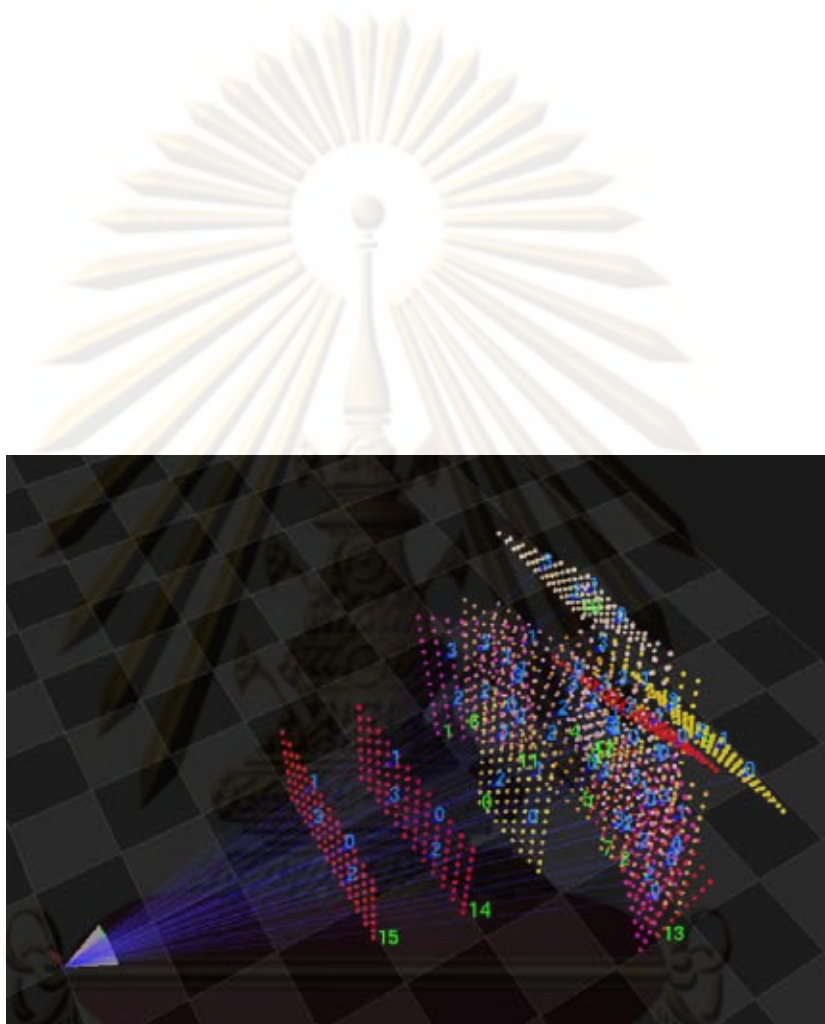
7.2 ผลการปรับเทียบค่า

จากการปรับเทียบค่าด้วยวิธีการที่ได้กล่าวมาในขั้นต้น รูป 7.4 แสดงข้อมูลภาพที่เก็บได้จากกล้องถ่ายภาพดิจิทัล Canon PowerShot A620 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณได้เป็นพิกัดตั้งสมการ (7.1) และสามารถแสดงการวางตัวของแผ่นปรับเทียบค่าได้ในรูป 7.5

$$\begin{aligned}
 F_x &= 1001.130 \\
 F_y &= 1006.909 \\
 C_x &= 509.653 \\
 C_y &= 389.467 \\
 k_1 &= -0.2667 \\
 k_2 &= -0.6114 \\
 p_1 &= -3.7597 \times 10^{-3} \\
 p_2 &= -9.7897 \times 10^{-4}
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$



รูปที่ 7.4: ภาพจากกล้องดิจิทัล



รูปที่ 7.5: การวางตัวของแผ่นปรับเทียบค่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

การทดลองและสรุปผล

8.1 การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวกรอง Kalman

เพื่อให้ตัวกรอง Kalman สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นจะต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวกรอง Kalman โดยค่าพารามิเตอร์ที่ปรับนั้นประกอบด้วย

8.1.1 พารามิเตอร์ในการทดลอง

- ค่าความแปรปรวนของขบวนการ (Process Noise)

$$W = \begin{bmatrix} AI & 0 & \dot{A}I & 0 \\ 0 & BI & 0 & \dot{B}I \\ 0 & 0 & CI & 0 \\ 0 & 0 & 0 & DI \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

กำหนดให้

$$A = 10^{-5} \quad (8.2)$$

$$B = 10^{-2} \quad (8.3)$$

$$\dot{A} = 0 \quad (8.4)$$

$$\dot{B} = 0 \quad (8.5)$$

$$C = 10^{-3} \quad (8.6)$$

$$D = 10^{-1} \quad (8.7)$$

- ค่าความผิดพลาดของการวัด (Measurement Noise)

$$V = \begin{bmatrix} \alpha I & 0 \\ 0 & \beta I \end{bmatrix} \quad (8.8)$$

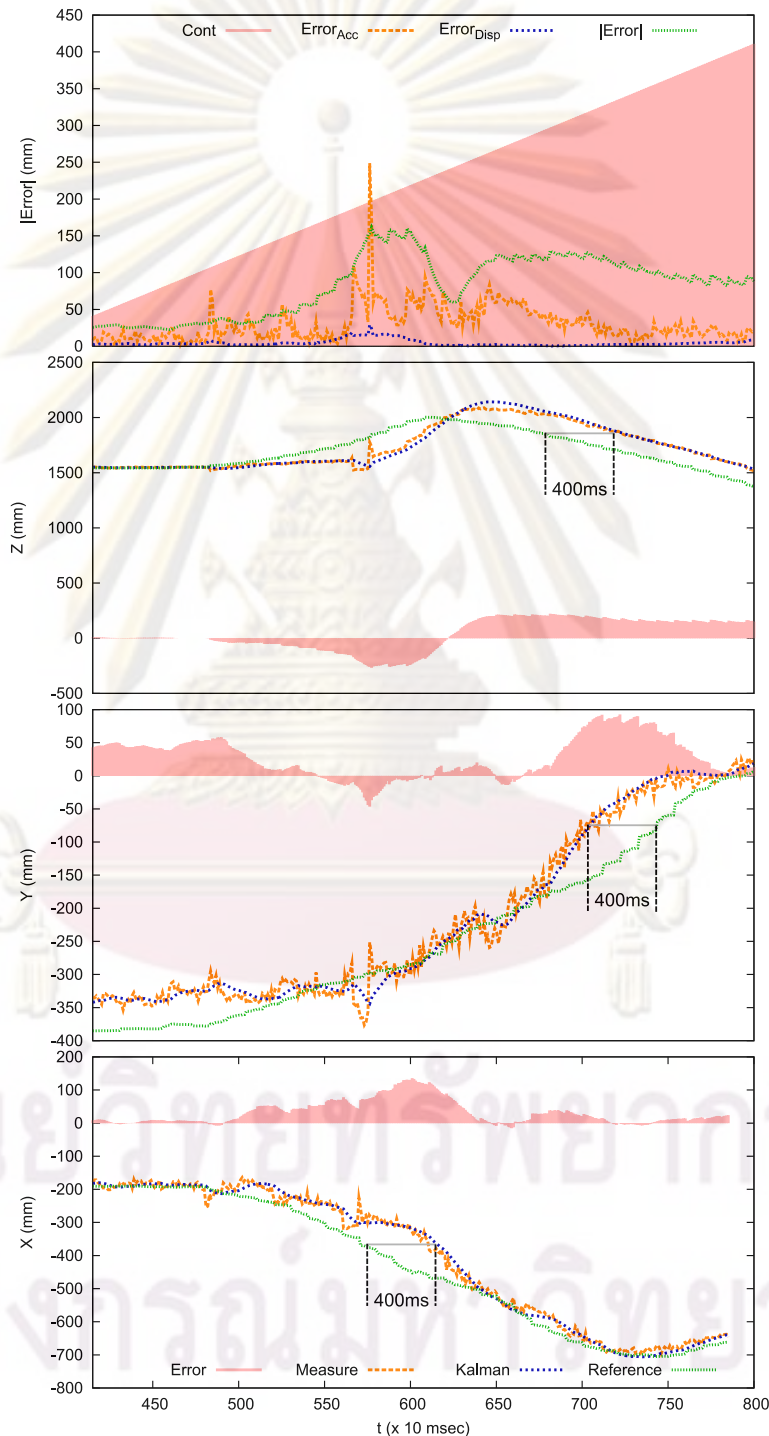
กำหนดให้

$$\alpha = 40 \quad (8.9)$$

$$\beta = 20 \quad (8.10)$$

8.1.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองจากการเก็บข้อมูลในการใช้งานจริง ประกอบด้วยผลการทดลองของตัวแปรสถานะ X, Y, Z, R_X, R_Y และ R_Z โดยจำแนกออกเป็นค่าต่างๆ คือค่าผลจากการวัด (measurement), ค่าจากการคาดการณ์ (predicted) และ ค่าจากการปรับปรุงแก้ไข (corrected) ปรากฏผลดังกราฟที่ 8.1



รูปที่ 8.1: ผลการทดลองวัดค่าจากตัวกรอง Kalman (X, Y, Z)

8.1.3 อภิปรายผล

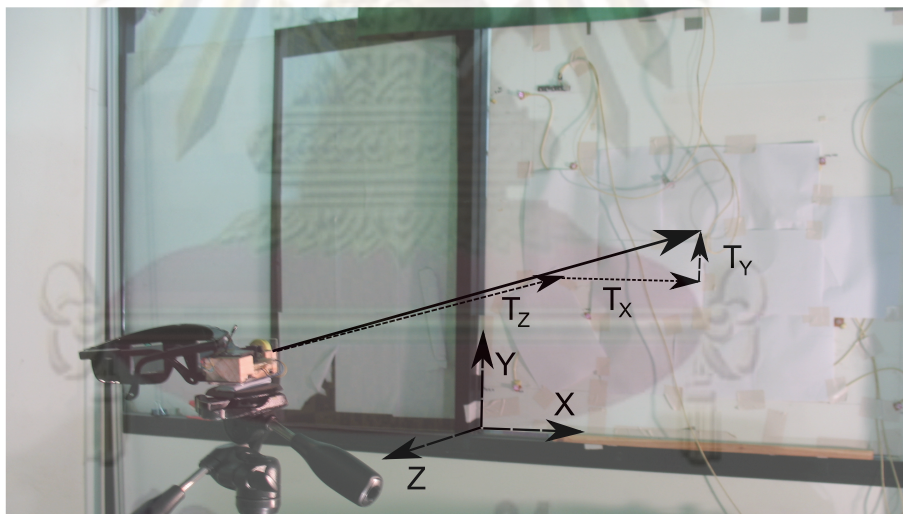
จากผลการทดลอง เมื่อทำการรอกค่าการวัด (measurement) โดยอาศัยตัวกรอง Kalman ที่มีค่าพารามิเตอร์ในขั้นต้น พบว่าตัวกรอง Kalman สามารถรอกผลการวัดให้ค่าที่ได้ มีความราบเรียบและต่อเนื่องยิ่งขึ้น โดยผลลัพธ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์ กับค่าจากการวัดโดยมีค่าการหน่วงที่ต่ำ

ค่าอ้างอิงซึ่งในการทดลองนี้ ได้ใช้ค่าอ้างอิงจาก อุปกรณ์ติดตามตำแหน่งแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า Flock of Bird ซึ่งจากเอกสารอ้างอิง [51] มีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเชิงสถิติ อยู่ที่ 1.8mm เมื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากตัวกรอง Kalman กับค่าอ้างอิง พบว่ามีค่าความหน่วงประมาณ 400ms และมีค่าความผิดพลาดขจัด ($\|Err\|$) อยู่สูงที่สุดที่ 150mm และมีค่า ($\|Err\|$) โดยเฉลี่ยประมาณ 40.8mm ภายใต้การติดตามตำแหน่งได้อย่างต่อเนื่อง

8.2 การทดสอบวัดความแม่นยำของอุปกรณ์ระบุตำแหน่ง

8.2.1 การทดสอบเชิงสถิติ

ในการทดลองนั้น ได้ทำการทดลองโดยการตั้งอุปกรณ์ระบุตำแหน่ง โดยอาศัยฐานที่มั่นคง ในตำแหน่งต่างๆ และจึงเก็บค่าตำแหน่งที่อ่านได้ ทั้งจากระบบติดตามตำแหน่งและการวัดระยะในโลกจริงมาทำการเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูป 8.2 ผลที่ได้แสดงในตาราง 8.1

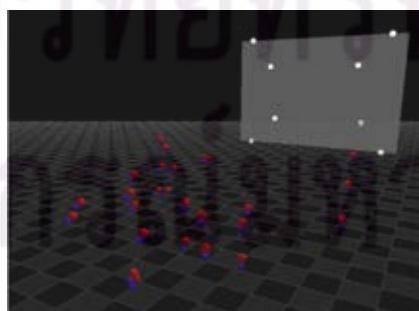


รูปที่ 8.2: การทดลอง

การทดลองในตาราง 8.1 ได้ทำการเก็บค่าจำนวน 25 ตัวอย่าง โดยให้การเก็บค่าแต่ละครั้งจะรอจนค่าตำแหน่งของกล้องหยุดนิ่ง แล้วจึงทำการบันทึกผล เมื่อทำการวัดผลจากการทดลองในรูปแบบสามมิติ สามารถแสดงในรูป 8.3 และสามารถแจกแจงได้ตามระยะในแกน Z ที่แตกต่างกัน คือ 1200mm ,1700mm และ 2000mm ได้ดังรูป 8.4 ตามลำดับ

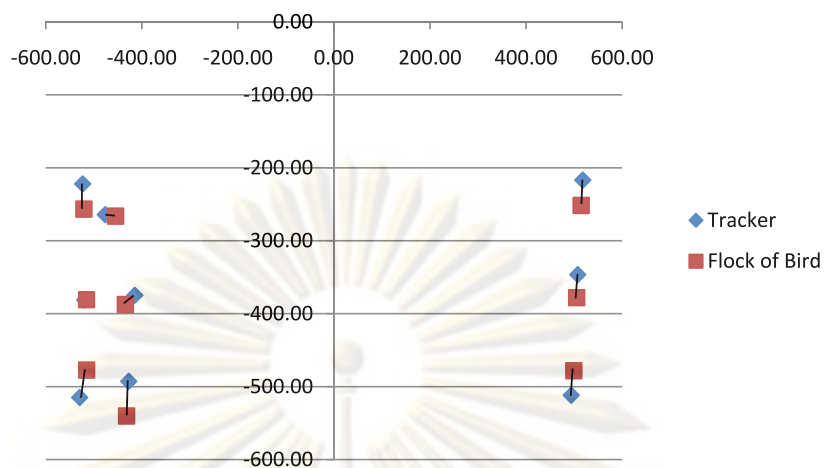
#	ค่าที่วัดได้			ค่าอ้างอิง			ค่าผิดพลาด			E
	M_X	M_Y	M_Z	R_X	R_Y	R_Z	E_X	E_Y	E_Z	
1	26.00	-475.00	1759.00	18.09	-504.48	1764.50	-16.57	4.38	-7.49	18.70
2	30.57	-326.00	1761.00	22.87	-347.51	1766.50	-22.87	-22.95	-11.04	34.23
3	97.90	-164.00	1731.00	93.13	-176.84	1736.50	-93.13	-74.24	21.51	121.03
4	-203.72	-370.00	1768.00	-221.54	-393.85	1773.40	-32.46	15.77	-15.39	39.24
5	-204.00	-249.00	1766.00	-221.82	-266.37	1771.40	-42.34	6.15	-7.31	43.41
6	249.00	-499.00	1738.00	250.72	-529.78	1743.50	15.98	19.37	7.61	26.23
7	249.00	-368.00	1738.00	250.73	-391.77	1743.60	10.38	21.31	9.37	25.49
8	256.00	-321.00	1714.00	258.05	-342.25	1719.50	-0.75	90.41	38.49	98.27
9	9.80	-502.00	2020.00	1.06	-532.97	2026.10	3.26	24.84	-14.06	28.73
10	13.21	-480.00	2030.00	4.61	-509.79	2036.10	-0.80	1.16	-26.63	26.67
11	59.30	-338.00	2027.00	52.70	-360.20	2033.10	-55.24	-8.99	-21.13	59.82
12	13.39	-220.00	2027.00	4.82	-235.88	2033.10	-12.44	-15.20	-16.04	25.36
13	-252.00	-342.00	2026.00	-272.03	-364.39	2032.00	12.95	-13.69	-22.51	29.36
14	-220.90	-290.00	2014.00	-239.58	-309.61	2020.00	-27.12	48.37	-7.96	56.02
15	265.70	-345.00	2012.00	268.01	-367.59	2018.20	-7.41	0.94	-11.02	13.31
16	252.89	-253.00	2012.00	254.66	-270.66	2018.20	-0.66	19.58	-8.74	21.45
17	-401.00	-464.00	1294.00	-427.09	-492.79	1298.20	-4.71	-47.60	-25.84	54.37
18	-389.00	-352.00	1249.00	-414.54	-374.79	1253.10	-19.80	-12.69	-0.32	23.52
19	-448.00	-247.00	1246.00	-476.08	-264.16	1250.10	21.42	-2.16	24.80	32.84
20	482.00	-482.00	1225.00	494.04	-511.80	1229.50	5.58	33.55	29.47	45.00
21	495.00	-325.00	1219.00	507.62	-346.40	1223.50	-2.16	-31.68	31.34	44.61
22	505.00	-202.00	1206.00	518.07	-216.82	1210.50	-3.21	-34.77	38.35	51.86
23	-499.00	-485.00	1252.00	-529.30	-514.89	1256.00	14.44	37.50	-4.01	40.38
24	-489.00	-358.00	1227.00	-518.84	-381.10	1231.00	3.73	0.22	20.51	20.85
25	-493.00	-207.00	1232.00	-523.01	-222.02	1236.00	2.31	-34.65	22.34	41.29
	ค่าผิดพลาดโดยเฉลี่ย									40.88

ตารางที่ 8.1: ผลการทดสอบเชิงสถิติ

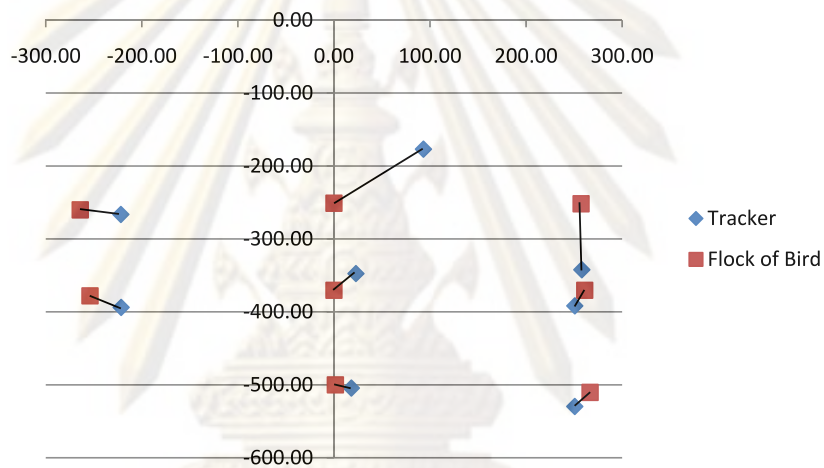


● ค่าจากการวัด
 ■ ค่าอ้างอิง

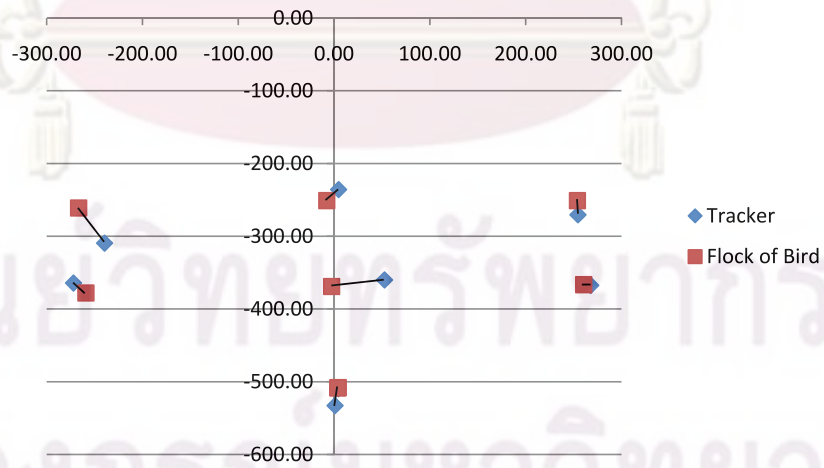
รูปที่ 8.3: ผลการทดสอบเชิงสถิติในสามมิติ



ผลการทดสอบเชิงสถิติที่ระยะ 1200mm



ผลการทดสอบเชิงสถิติที่ระยะ 1700mm

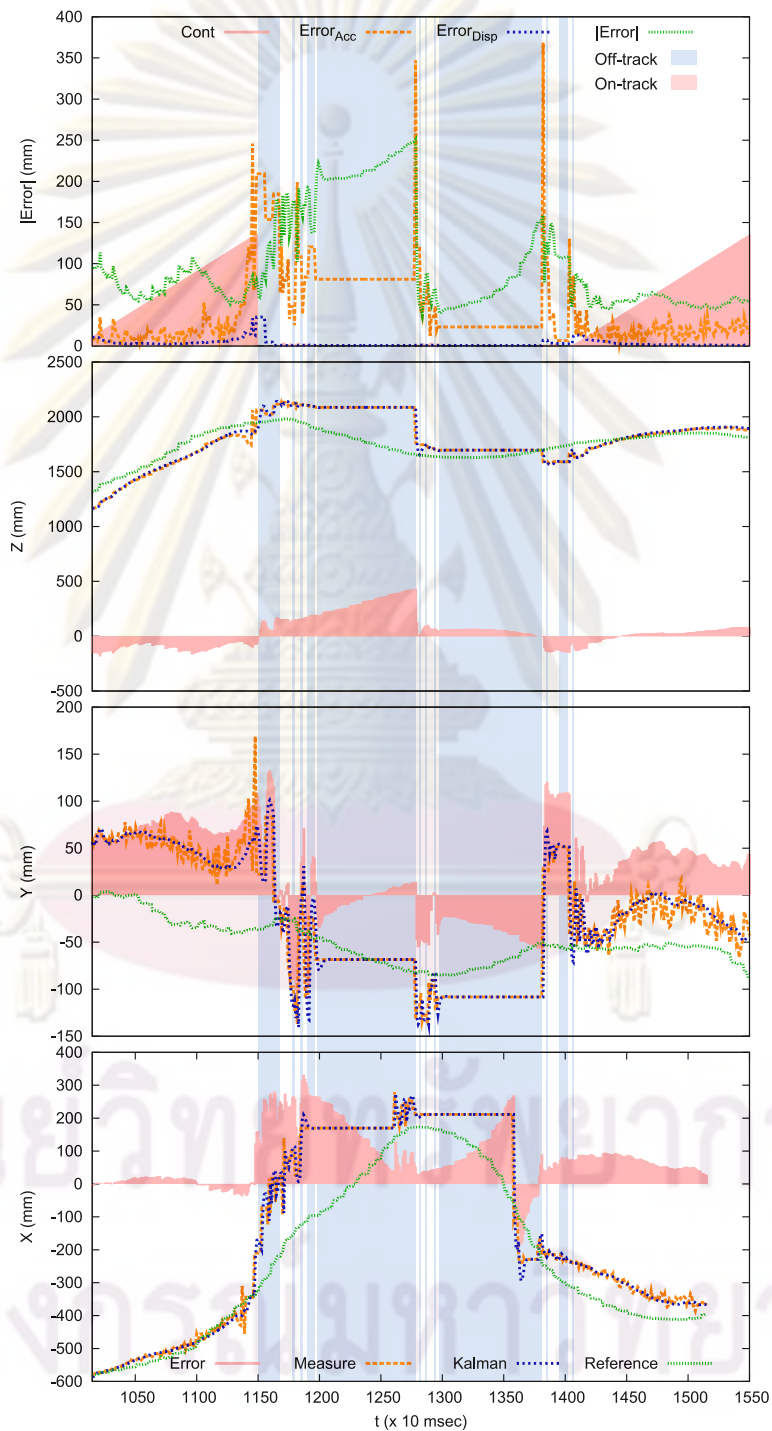


ผลการทดสอบเชิงสถิติที่ระยะ 2000mm

รูปที่ 8.4: ผลการทดสอบเชิงสถิติ

8.2.2 การทดสอบเชิงพลวัต

การทดลองเชิงพลวัต เป็นการทดลองเพื่อวัดความสามารถในการติดตามตำแหน่ง การทำงานของตัวกรอง Kalman และความสามารถในการกรองผลลัพธ์ ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวัดผลในการติดตามตำแหน่งโดยอ้างอิงกับอุปกรณ์ Flock of Birds ซึ่งจากการทดลองสามารถแสดงได้ดังกราฟ 8.5



รูปที่ 8.5: ผลการทดสอบเชิงพลวัต

8.2.3 อภิปรายผล

จากผลการทดลอง ในช่วงแรก ระบบสามารถติดตามและสามารถหาค่าตำแหน่งจากกล้องได้ (พื้นที่ On-track) แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ไม่สามารถใช้ข้อมูลจากกล้องได้ (พื้นที่ Off-track) เนื่องจากมีค่า $|Error|$ มากกว่ากำหนด พบว่า ในช่วงแรกที่ระบบยังพอที่จะสามารถหาค่าตำแหน่งจากกล้องได้บางเป็นบางภาพ ระบบจะสามารถประมาณค่าตำแหน่งได้ โดยอาศัยตัวกรอง Kalman แต่เมื่อหลุดการติดตามตำแหน่ง เป็นระยะเวลาสั้น ก็จะทำให้ความผิดพลาดระหว่างค่าจริงกับค่าการคาดเดาจากตัวกรอง Kalman มีมากขึ้น

8.3 สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาระบบฉายภาพสามมิติแบบมีระบบติดตามศีรษะ ที่มีต้นทุนต่ำ ซึ่งสามารถแสดงภาพสามมิติแบบสองตาโดยอาศัยแว่นชุดเตอร์ได้ ซึ่งเมื่อประกอบกับระบบติดตามตำแหน่งศีรษะ ทำให้ได้ระบบแสดงผลภาพสามมิติที่มีความสมจริงกว่าระบบแสดงผลสามมิติที่ไม่มีระบบติดตามตำแหน่งศีรษะโดยทั่วไป

ระบบการติดตามตำแหน่งเชิงแสงแบบ inside-out ที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้ ซึ่งแตกต่างกับระบบติดตามตำแหน่งเชิงแสงแบบ outside-in โดยทั่วไป แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ระบบแบบ inside-out แม้ว่าอาจมีอุปสรรคบางประการ เช่นมุมมองที่แคบของกล้อง แต่จากการทดลองพบว่าสามารถลดผลกระทบจากปัญหาดังกล่าวได้โดยใช้การประมวลผลต่างๆ เช่นการใช้ตัวกรอง Kalman และเงื่อนไขต่างๆ

จากการพัฒนาพบว่าระบบติดตามตำแหน่งแบบ inside-out มีความไวในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและการวางตัว มากกว่าระบบแบบ outside-in อีกทั้งในการหาตำแหน่งในรูปแบบดังกล่าว ความแม่นยำของระบบ จะสัมพันธ์กับความแม่นยำที่ต้องการในการวาดภาพสามมิติ เนื่องจากปริมาตร frustum ของทั้งระบบหาตำแหน่งและตัววาดภาพสามมิติ นั้นวางตัวในรูปแบบเดียวกัน ทำให้เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบแสดงผลภาพสามมิติ

จากงานวิจัยนี้จึงได้ระบบแสดงผลภาพสามมิติแบบมีระบบติดตามศีรษะ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นระบบพื้นฐานในการพัฒนาประยุกต์ทางด้านต่างๆ ต่อไป.

ศูนย์วิทยุโทรพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] T. Caudell and D. Mizell. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. System Sciences, 1992. inproceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on, vol. 2, pp. 659–669, Jan 1992.
- [2] C. Wheatstone. Contributions to the physiology of vision. part the first. on some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision. Philosophical Transactions 128(1838):371–394.
- [3] J. J. Koenderink and A. J. v. Doorn. Geometry of binocular vision and a model for stereopsis. Biological Cybernetics, vol. 21, pp. 29–35, 1975.
- [4] STEREOSCOPIC-TELEVISION APPARATUS FOR INDIVIDUAL USE. M. Heilig. U.S patent no. 2,955,156, October 1960.
- [5] I. Sutherland, E. The ultimate display. inproceedings of IFIP Congress 2, 1965.
- [6] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, and T. A. DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the cave. the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 135–142. ACM Press, 1993.
- [7] C. Schmandt. Spatial input/display correspondance in a stereoscopic computer graphic workstation. ACM SIGGRAPH Computer Graphics inproceedings of the 10th annual conference on Computer graphics and interactive techniques SIGGRAPH '83, vol. 17, pp. 253–261, 1983.
- [8] K. Arthur, T. Preston, R. Taylor, F. Brooks, M. Whitton, and W. Wright. Designing and building the PIT: A head-tracked stereo workspace for two users. Technical report, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, 1998.
- [9] M. Agrawala, A. C. Beers, I. McDowall, B. Frohlich, M. Bolas, and P. Hanrahan. The two-user responsive workbench: Support for collaboration through individual views of a shared space. SIGGRAPH 97, 1997.
- [10] DMD DiscoveryTM 3000 Chip Set(Dallas, TX USA:Texas Instruments, Inc.2005).
- [11] I. Sexton and P. Surman. Stereoscopic and autostereoscopic display systems. IEEE Signal Processing Magazine, vol. 16, pp. 85–99, 1999.
- [12] A. J. Woods and T. Rourke. Ghosting in anaglyphic stereoscopic images. SPIE-IS&T Electronic Imaging, vol. 5291, 2004.
- [13] STEREOSCOPIC PROCESS AND APPARATUS. R. A. Steenblik. U.S patent no. 4,597,634, July 1986.

- [14] S.-C. Kim and E.-S. Kim. A new liquid crystal display-based polarized stereoscopic projection method with improved light efficiency. *Optics Communications* 249,1-3(2005):51 – 63. ISSN 0030-4018. URL <http://www.sciencedirect.com/science/inproceedings/B6TVF-4F8TG4S-2/2/90a709c5de6a7ec3e063697dfeaba377> .
- [15] C. Ware, A. Kevin, and S. B. Kellogg. Fish tank virtual reality. *Proc. SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pp. 37–42, 1993.
- [16] M. Deering. High resolution virtual reality. *SIGGRAPH 92*, pp. 192–202, 1992.
- [17] B. Lacotte. *Elimination of keystone and crosstalk effects in stereoscopic video*. Technical report, University of Quebec, National Institute of Scientific Research, INRS-Telecommunications, 22 Dec 1995.
- [18] J. Konrad, B. Lacotte, and D. Eric. Cancellation of image crosstalk in time-sequential displays of stereoscopic video. *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 9, pp. 897–908, 2000.
- [19] A. Woods and S. Tan. Characterising sources of ghosting in time-sequential stereoscopic video displays. *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IX, Proc. SPIE*, pp. 66–77, 2002.
- [20] A. M. Kunz and C. P. Spagno. Simultaneous projection and picture acquisition for a distributed collaborative environment. *Virtual Reality Conference, IEEE*, vol. 0, pp. 279, Los Alamitos, CA, USA. IEEE Computer Society, 2002.
- [21] B. Fröhlich, J. Hochstrate, J. Hoffmann, K. Klüger, R. Blach, M. Bues, and O. Stefani. Implementing multi-viewer stereo displays. *WSCG 2005 conference inproceedings*, 2005.
- [22] O. Bimber, B. Fröhlich, D. Schmalstieg, and L. M. Encarnação. The virtual showcase. *SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, pp. 9, New York, NY, USA. ACM, 2006.
- [23] *The Republic*(380 BC).
- [24] M. McCarthy and H. Muller. Rf free ultrasonic positioning. *17th International Symposium on Wearable Computers*, pp. 79–85, 2003.
- [25] A. Ward, A. Jones, and A. Hopper. A new location technique for the active office. *IEEE Personnel Communications*, pp. 42–47, 1997.
- [26] G. S. Fischer. *Electromagnetic tracker characterization and optimal tool design (with applications to ent surgery)*. PhD thesis, Johns Hopkins University, 2005.
- [27] E. Paperno, I. Sasada, and E. Leonovich. A new method for magnetic position and orientation tracking. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, pp. 1938–1940, 2001.

- [28] J. D. Mulder, J. Jansen, and A. v. Rhijn. An affordable optical head tracking system for desktop vr/ar systems. Eurographics Workshop on Virtual Environments, An International Immersive Projection Technologies Workshop, 2003.
- [29] E. Sharlin, P. Figueroa, M. Green, and B. Watson. A wireless, inexpensive optical tracker for the cave. IEEE Virtual Reality Conference 2000 (VR'00), pp. 271, 2000.
- [30] A. Poonsilp and A. Sudsang. Interactive virtual human head with fish tank vr technology. The 9th National Computer Science and Engineering Conference: NCSEC2005, 2005.
- [31] D. Kim, S. Richards, and T. Caudell. An optical tracker for augmented reality and wearable computers. Virtual Reality Annual International Symposium, 1997, pp. 146–150, 1997.
- [32] A. Hogue, M. Robinson, M. R. Jenkin, and R. S. Allison. A vision-based head tracking system for fully immersive displays. 7th International Immersive Projection Technologies Workshop in conjunction with the 9th Eurographics Workshop on Virtual Environments, 2003.
- [33] M. Ward, R. Azuma, R. Bennett, S. Gottschalk, and H. Fuchs. A demonstrated optical tracker with scalable work area for head-mounted display systems. in proceedings of 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics, pp. 43–52, 1992.
- [34] J. Caarls, P. Jonker, and S. Persa. Sensor fusion for augmented reality. In Ambient Intelligence, pp. 160–176. Springer Verlag, 2003.
- [35] V. Taylor, E., J. Chen, T. Disz, L., M. Papka, E., and R. Stevens. Immersive visualization of supercomputer applications: A survey of lag models. Computational Science and Engineering, vol. 3, pp. 54, 1996.
- [36] Data sheet MAX4028/MAX4029 Rev.0 (Sunnyvale, CA USA:Maxim Integrated Products Inc., Mar 2004).
- [37] Data sheet PIC16F631/677/685/687/689/690 Rev.E (Chandler, AZ USA:Microchip Technology Inc., Jun 2008).
- [38] Data sheet TSAL7400 Rev.1.7 (Malvern, PA USA:Vishay Intertechnology Inc., Aug 2008).
- [39] Data sheet TSAL6200 Rev.2.1 (Malvern, PA USA:Vishay Intertechnology Inc., Sep 2008).
- [40] Data sheet TSOP34838 Rev.1.5 (Malvern, PA USA:Vishay Intertechnology Inc., Feb 2005).
- [41] Data sheet MAX3238 Rev.1 (Sunnyvale, CA USA:Maxim Integrated Products Inc., Oct 2002).
- [42] WiiBrew, Available from: <http://wiibrew.org/wiki/Wiimote>, [2008, Nov 30 13:0:0].
- [43] I²C Manual (AN10216-01)(AG Eindhoven, Netherlands:Philips Semiconductors Inc.Mar 2003).

- [44] Data sheet LIS3LV02DL Rev.2 (GENEVA, Switzerland:ST Microelectronic Inc., Jan 2008).
- [45] L. Merckel and T. Nishida. Evaluation of a method to solve the perspective-two-point problem using a three-axis orientation sensor. IEEE the 8th International Conference on Information Technology (CIT), pp. 862–867, Sydney, Australia. IEEE Computer Society, 2008.
- [46] Computer Vision and Image Processing(Academic Press1992).
- [47] X.-S. Gao, X.-R. Hou, J. Tang, and H.-F. Cheng. Complete solution classification for the perspective-three-point problem. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 25,8(2003): 930–943. ISSN 0162-8828.
- [48] C.-X. ZHANG and Z.-Y. HU. Why is the danger cylinder dangerous in the p3p problem? Acta Automatica Sinica 32,4(2006):504–511.
- [49] J.-C. Faugère, G. Moroz, F. Rouillier, and M. S. El Din. Classification of the perspective-three-point problem, discriminant variety and real solving polynomial systems of inequalities. ISSAC '08: Proceedings of the twenty-first international symposium on Symbolic and algebraic computation, pp. 79–86, New York, NY, USA. ACM, 2008.
- [50] R. E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. Transactions of the ASME–BookTitle of Basic Engineering 82, Series D(1960):35–45.
- [51] Flock of Birds Installation and Operation Guide,910141 Rev A1. Ascension Technology Corporation. Burlington,VT USA, 2002.
- [52] OpenCV Open Source Computer Vision Library, Available from: <http://www.intel.com/technology/computing/opencv/index.htm>, [2006-05-23 21:10:46].
- [53] OpenGL reference manual (2nd ed.): the official reference document to OpenGL, Version 1.1(Boston, MA USA:Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.1997).
- [54] K. W. Arthur, K. S. Booth, and C. Ware. Evaluating 3d task performance for fish tank virtual worlds. ACM Transaction on Information Systems, vol. 11, pp. 239–265, 1993.
- [55] W. Robinett and R. Holloway. The Visual Display Transformation for Virtual Reality. Technical report, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC, USA, 1994.

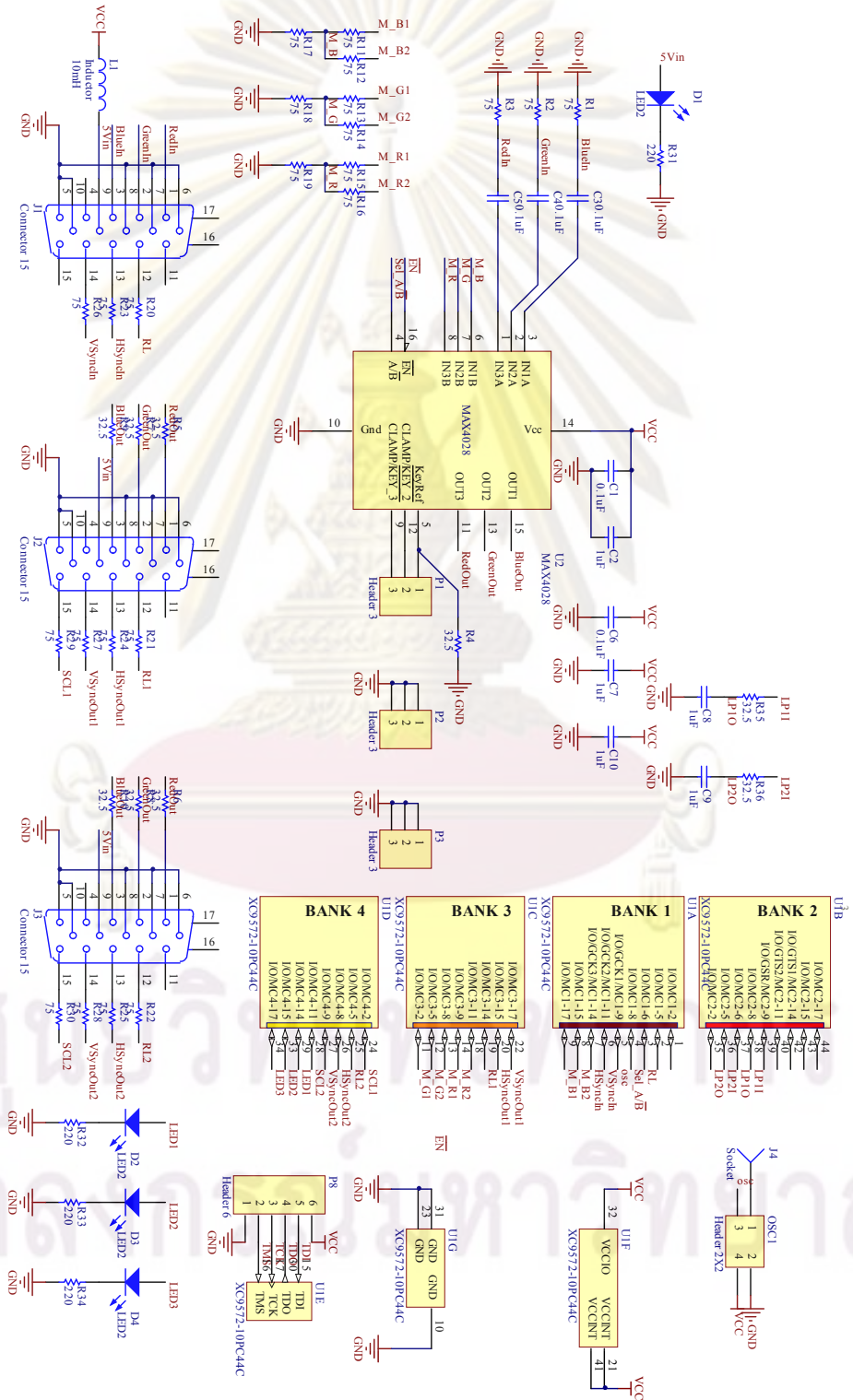


ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก วงจรที่ได้รับการพัฒนา

ก.1 วงจรแทรกสัญญาณสัญลักษณ์



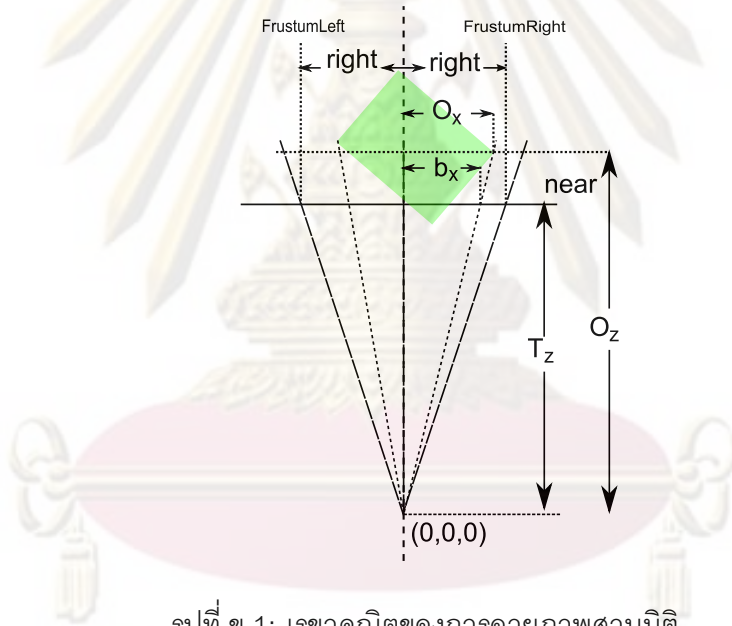
ภาคผนวก ข

การวาดภาพสามมิติและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวาดภาพสามมิติ (3D Rendering) เป็นศาสตร์และศิลป์ที่ใช้ในการเปลี่ยนพิกัดตัวเลข ให้เป็นจุด เส้น และภาพเสมือนภาพถ่ายของวัตถุนั้น ทำให้ผู้ชมสามารถรับรู้ภาพที่เสมือนมีมิติความนูน ลึก แตกต่างกับภาพสองมิติที่มีลักษณะแบนราบ

ข.1 เรขาคณิตของการฉายภาพสามมิติ (Projective Geometry)

หลักการวาดภาพสามมิติเริ่มจากนำเอาพิกัดสามมิติของวัตถุ (O_x, O_y, O_z) มาทำการคำนวณเพื่อแสดงผลบนจอแสดงผลสองมิติ โดยพื้นฐานการฉายภาพนั้นสามารถอธิบายด้วยกฎของตรีโกณมิติดังแสดงในรูป ข.1 โดยการหาค่าตำแหน่งของจุดภาพ (b_x, b_y) ที่ปรากฏบนฉากฉายภาพภายใต้ตำแหน่งของตา (T_x, T_y, T_z) ในการคำนวณแต่ละแกนจะสามารถแยกคิดและคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการ (ข.1)



รูปที่ ข.1: เรขาคณิตของการฉายภาพสามมิติ

$$b_x = (O_x - T_x) \frac{T_z}{O_z} \quad (\text{ข.1})$$

$$b_y = (O_y - T_y) \frac{T_z}{O_z} \quad (\text{ข.2})$$

โดยทั่วไป การคำนวณการฉายภาพโดยอาศัยโมเดลกล้องรูเข็ม (pinhole) สามารถถูกอธิบายได้ด้วยการคูณกันของเมทริกซ์ต่างๆ เช่นในไลบรารี OpenCV [52] การฉายภาพสามารถเขียนได้ดังสมการ (ข.3)

$$\begin{bmatrix} b'_x \\ b'_y \\ b'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x \\ 0 & F_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R|T] \begin{bmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \end{bmatrix} \quad (ข.3)$$

$$b_x = b'_x/b'_z \quad (ข.4)$$

$$b_y = b'_y/b'_z \quad (ข.5)$$

กำหนดให้

F_x ค่าโฟกัสของกล้องในแกน X

F_y ค่าโฟกัสของกล้องในแกน Y

C_x ค่าพิกัดของจุดที่ปรากฏกลางจอภาพในแกน X

C_y ค่าพิกัดของจุดที่ปรากฏกลางจอภาพในแกน Y

$[R|T]$ เมทริกซ์พารามิเตอร์ภายนอก (Extrinsic parameter Matrix)

ในกรณีที่มีการแก้ไขความผิดรูป (distortion) เช่นรูปแบบความผิดพลาดของกล้องในไลบรารี OpenCV [52] สามารถอธิบายความผิดรูปเชิงรัศมี (radial distortion) และความผิดรูปเชิงเส้นสัมผัส (tangential distortion) ได้โดยอาศัย การประมาณแบบพหุนาม (polynomial) ดังแสดงในสมการ (ข.6)

$$x' = b'_x/b'_z \quad (ข.6)$$

$$y' = b'_y/b'_z \quad (ข.7)$$

$$x'' = x'(1 + k_1\psi^2 + k_2\psi^4 + k_3\psi^6) + 2p_1x'y' + p_2(\psi^2 + 2x'^2) \quad (ข.8)$$

$$y'' = y'(1 + k_1\psi^2 + k_2\psi^4 + k_3\psi^6) + p_1(\psi^2 + 2y'^2) + 2p_2x'y' \quad (ข.9)$$

กำหนดให้

$$\psi^2 = x'^2 + y'^2 \quad (ข.10)$$

$$b''_x = F_x * x'' + c_x \quad (ข.11)$$

$$b''_y = F_y * y'' + c_y \quad (ข.12)$$

ในทางปฏิบัติการคำนวณการฉายจะอาศัย perspective projection ซึ่งมีลักษณะเป็น linear transformation โดยทั่วไป projection matrix จะถูกนำเสนอในรูปแบบเมทริกซ์แบบ homogeneous coordinates ดังแสดงในสมการ (ข.13)

กำหนดให้

T_x, T_y, T_z คือตำแหน่งกล้อง
 O_x, O_y, O_z คือพิกัดของจุดในสามมิติ R^3
 b_x, b_y คือภาพที่ปรากฏบนฉากฉาย

$$\begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \\ b_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -T_x \\ 0 & 1 & 0 & -T_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_z} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ข.13})$$

ข.2 การแปลงพิกัด (Transformation)

การแปลงพิกัด transformation คือการแปลงให้ค่าพิกัดที่มีอยู่เคลื่อนย้าย หมุนหรือย่อขยาย ซึ่งในกรณีของการเลื่อน สามารถทำได้โดยการนำพิกัดของวัตถุคูณกับ translation matrix (T) โดยเมื่อกำหนดให้ T_x, T_y, T_z เป็นระยะขจัดที่ต้องการเลื่อน สมการแสดงการเลื่อนจะสามารถแสดงได้ในสมการ(ข.14)

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + T_x \\ y + T_y \\ z + T_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ข.14})$$

หากต้องการให้มีการหมุนก็สามารถทำได้โดยการนำไปคูณกับ Rotation Matrix (R) วิธีการสร้าง (R) สามารถกระทำได้โดยนำเอาการหมุนสองมิติรอบแกนที่ละแกนมาคูณกัน สำหรับการหมุนสามมิติรอบแกนที่ละแกน สามารถแจกแจงเป็นสมการการหมุนซึ่งเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการ (ข.15)(ข.16) และ (ข.17)

$$R_{Xrol} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x & 0 \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ข.15})$$

$$R_{Yrol} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & 0 & \sin \theta_x & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_x & 0 & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ข.16})$$

$$R_{Zrol} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x & -\sin \theta_x & 0 & 0 \\ \sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (ข.17)$$

ดังนั้นในกรณีที่ต้องการหมุนรอบจึงสามารถทำได้โดยการนำเอาเมทริกซ์ของการหมุนแต่ละแกนมาคูณกัน (ข.18) แต่ปัญหาประการหนึ่งที่เกิดจากการคูณเมทริกซ์ดังกล่าวคือการเกิด "Gimbals-Locked" ซึ่งทำให้หมุนวัตถุในสามมิติสูญเสีย องศาอิสระในการหมุน เนื่องจากมีพารามิเตอร์ในการหมุนสองตัวที่มีทิศทางในการหมุนไปในทางเดียวกัน

$$R = R_{Zrol} R_{Yrol} R_{Xrol} \quad (ข.18)$$

การอธิบายรูปแบบของการเลื่อนและหมุนในรูปแบบเมทริกซ์ เป็นที่นิยมในระบบการ์ดแสดงผลสามมิติเนื่องจากความยืดหยุ่นในการใช้งาน

ข.3 สมการของ Rodrigues

จากที่นำเสนอมาขึ้นการหมุนภาพสามารถกระทำด้วยเมทริกซ์ R แต่เนื่องจากเมทริกซ์ R นั้นสมาชิกหรือพารามิเตอร์มีจำนวนที่เยอะเกินพารามิเตอร์ที่ต้องการนำเสนอ ดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานจึงต้องทำการยุบให้เหลือเพียงพารามิเตอร์ที่จำเป็น การนำเสนอแบบหนึ่งที่นิยมใช้คือ Rotational Vector (ω) ซึ่งเป็น Vector ที่มีทิศทางเป็นแกนหมุนและมีขนาดเท่ากับองศาในการหมุน ข้อดีประการหนึ่งในการนำเสนอโดยอาศัย ω คือการป้องกันปัญหา Gimbals-Locked ในการแปลง ω เป็น R จะอาศัยสมการของ Rodrigues ซึ่งถูกเสนอโดย Olinde Rodrigues กำหนดให้ $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ แทนค่าเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแกนหมุนและ θ แทนค่ามุมที่ต้องการจะหมุน โดยทั่วไปจะกำหนดให้ ω' มีค่าเวกเตอร์หนึ่งหน่วยมีทิศทางเดียวกับ ω และมีขนาดเท่ากับมุมของการหมุน θ

$$e^{\vec{\omega}'\theta} = 1 + \vec{\omega}' \sin \theta + \vec{\omega}'^2 (1 - \cos \theta)$$

$$= \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta + \omega_x^2 \lambda & \omega_x \omega_y \lambda + \omega_z \sin \theta & \omega_y + \omega_x \omega_z \lambda & 0 \\ \omega_z + \omega_x \omega_y \lambda & \cos \theta + \omega_y^2 \lambda & -\omega_x \sin \theta + \omega_x \omega_y \lambda & 0 \\ -\omega_y \sin \theta + \omega_x \omega_z \lambda & \omega_x \sin \theta + \omega_y \omega_z \lambda & \cos \theta + \omega_z^2 \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (ข.19)$$

$$\lambda = 1 - \cos \theta$$

หรือหมุนภาพ ค่าของแต่ละ vertex จะถูกแปลงโดย transformation matrix ขนาด 4x4 ซึ่งการสร้าง transformation matrix สามารถทำได้โดยทฤษฎีที่กล่าวมาในขั้นต้น ในการคำนวณอื่น ๆ เช่นการส่งผ่านพื้นผิว (texture mapping) หรือการคำนวณจุดกำเนิดแสงก็จะถูกคำนวณในขั้นตอนนี้

ขั้นตอนต่อมาคือ primitive assembly ซึ่งจะทำการขลิบขอบภาพเพื่อให้เหลือเฉพาะจุดที่ปรากฏอยู่ในหน้าจอ อีกทั้งยังใช้ในการกำหนดระยะ near plane หรือระยะใกล้สุดที่จะวาดภาพ และระยะ far plane หรือระยะไกลสุดที่จะวาด โดยการกำหนดระยะ near plane ก็เพื่อป้องกันปัญหาที่วัตถุอยู่ใกล้เกินหรืออยู่บนจุดกำเนิด ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอน primitive assembly จะถูกส่งไปทำการแปลงเป็นภาพโดย rasterization ซึ่งจะทำการฉายพิกัดต่างๆ ลงไปยังระนาบของฉากฉายภาพซึ่งจะอาศัยการคำนวณของ projection matrix ในขั้นตอนนี้จะวาดภาพไปยัง frame buffer ซึ่งอาจจะมีการทำขบวนการ fragment operations ก่อนถึง frame buffer

ในกรณีที่มีต้องการวาดภาพซ้ำๆ กันก็สามารถทำได้ โดยอาศัยระบบ display list ซึ่งจะทำการเก็บคำสั่งต่างๆ ไว้ในรูปแบบของ list ซึ่งสามารถเรียกใช้ซ้ำๆ ได้ โดยส่งแค่เพียงคำสั่ง *glCallList* โดยไม่ต้องส่งคำสั่งการวาดภาพทั้งหมด ทำให้ประหยัดเวลาและปริมาณข้อมูลลงไปได้

ข.7 ระบบเมทริกซ์ใน OpenGL

ในขั้นตอนนี้ per-vertex operations และ rasterization ซึ่งจะทำการแปลงพิกัดต่างๆ ของวัตถุในรูปนั้น จากการใช้เมทริกซ์ในการคำนวณภายในการ์ดแสดงผลจะแบ่งเมทริกซ์ออกเป็นสามประเภทคือ model projection และ texture ซึ่งจะขอล่าวแต่เพียงแต่เมทริกซ์ที่สำคัญกับงานวิจัยนี้ คือ model และ projection สำหรับ per-vertex operations และ rasterization ตามลำดับ ซึ่งภายใน OpenGL จะทำการจัดการกับเมทริกซ์ต่างๆ ด้วย matrix stack ซึ่งค่าเมทริกซ์ขณะปัจจุบันจะเป็นค่าของเมทริกซ์บนสุดใน stack คำสั่ง *glPushMatrix* และ *glPopMatrix* จะถูกใช้ในการจัดการกับ matrix stack

สำหรับเมทริกซ์ model view นั้นจะเป็นเมทริกซ์ที่ใช้ในการแปลงพิกัด ซึ่งใน OpenGL เมื่อเรียกใช้คำสั่งต่างๆ เช่น *glTranslate* ซึ่งใช้ในการเลื่อนพิกัดและ คำสั่ง *glRotate* ซึ่งใช้ในการหมุนพิกัด ก็จะทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนค่าในเมทริกซ์ปัจจุบัน ทำให้ในการวาดภาพตำแหน่งของวัตถุต่างๆ จะถูกส่งผ่านไปยังจุดต่างๆ กันได้ ใน OpenGL จะมีจำนวนชั้นของ model view stack เท่ากับ 32 ในการฉายภาพด้วย rasterization ค่าเมทริกซ์ที่ใช้การคำนวณ projection จะเรียกว่า projection matrix ซึ่งเมื่อเรียกคำสั่งต่างๆ เช่น *glPerspective* ก็จะทำให้การคำนวณค่าเมทริกซ์ดังกล่าวจากค่าองศามุมมองของกล้องและตำแหน่ง โดยจำนวนชั้นของ projection matrix stack จะเท่ากับ 2

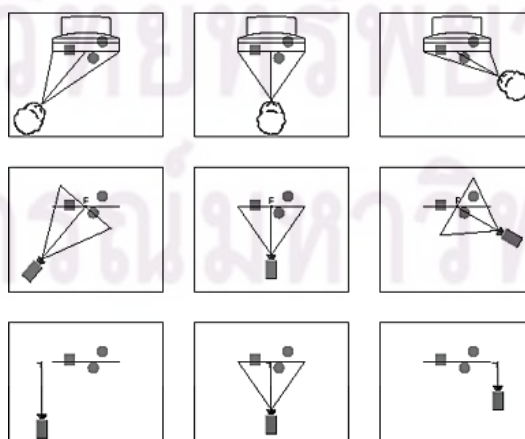
ข.8 การคำนวณ Frustum

มุมมองแบบ Fish Tank VR เป็นมุมมองที่ได้รับการนำเสนอโดย [15, 54] ระบบโลกเสมือนจริงนี้ เมื่อมองเข้าไปในจอแสดงผลจะเปรียบเสมือนกับการมองเข้าไปในตู้ปลา ถ้าหากปลาหรือวัตถุภายในตู้ใ้มน้อยู่นิ่ง ผู้ชมก็จะเห็นวัตถุดังกล่าวอยู่นิ่ง แม้มีการขยับปรับเปลี่ยนมุมมองไปก็ตาม ดังรูป ข.4



รูปที่ ข.4: ตัวอย่างระบบโลกเสมือนจริงแบบ Fish Tank VR

ในงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องใช้ระบบภาพเสมือนจริงที่มีความถูกต้องแม้มีการเคลื่อนที่เปลี่ยนมุมมองของผู้ชม หลักการในการคำนวณวาดภาพสามมิติแบบ Fish Tank VR นั้น จะเป็นการสร้าง projection matrix ที่สัมพันธ์กับทัศนมิติ (perspective) โดยอาศัยข้อมูลจากระบบติดตามตำแหน่งศีรษะ (head tracking) จากการฉายภาพสามมิติโดยอาศัยโมเดลของกล้องรูเข็ม เส้นแสง (ray) จะถูกลากผ่านตำแหน่งจุดกำเนิดของกล้องผ่านฉากฉายภาพไปยังวัตถุ ทำให้เกิดเป็น frustum หรือพีระมิดหัวตัดซึ่งแทนเส้นทางการเดินทางของแสง ในการคำนวณหน้าจอแสดงผลดังในงานวิจัย [16, 17, 55] จะมีระนาบเดียวกับฉากฉายภาพอยู่นิ่งกับที่ เพียงแต่จุดกำเนิดกล้องจะเป็นตำแหน่งศีรษะ ที่มีการเคลื่อนไหว ทำให้ค่าพิกัดของขอบจอแสดงผล (บนระนาบของฉากฉายภาพ) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อจุดกำเนิดกล้องเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูป ข.5



รูปที่ ข.5: การผิดเพี้ยนของภาพจากมุมมอง

ข.9 Frustum

การสร้าง projection matrix เพื่อใช้ในการวาดภาพสามมิติสามารถทำได้หลายวิธี เช่นคำสั่ง *gluPerspective* ในไลบรารี OpenGL [53] สามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัวคือ ค่ามุมมองของกล้อง (*F.O.V.*) อัตราส่วนของหน้าจอ (*aspect ratio*) ค่าขอบระยะใกล้ (*Near*) และค่าขอบระยะไกล (*Far*) แต่เนื่องจากในการสร้าง projection matrix สำหรับระบบสามมิติที่มีการติดตามตำแหน่งผู้ชมนั้นจำเป็นจะต้องนำเอาค่าตำแหน่งของผู้ชมหรือตำแหน่งกล้องในการวาดภาพเข้าไปคิดด้วย ทำให้การสร้าง projection matrix ในงานวิจัยนี้แตกต่างจากการใช้งานทั่วไป คำสั่ง *glFrustum* เป็นคำสั่งหนึ่งในการสร้าง projection matrix แต่มีจุดแตกต่างตรงที่เป็นคำสั่งที่ใช้การอธิบายรูปร่างของพีระมิดตัดหัวหรือ frustum แทนที่ใช้ค่า intrinsic และ extrinsic parameter เช่นในคำสั่ง *gluPerspective* ในการสร้างเมทริกซ์ค่า *glFrustum* นั้นค่า projection matrix ($P_{Frustum}$) สามารถคำนวณได้จากสมการ (ข.9)

กำหนดให้	
<i>Near</i>	ค่าขอบระยะใกล้
<i>Far</i>	ค่าขอบระยะไกล
<i>Top</i>	ค่าขอบด้านบน
<i>Bottom</i>	ค่าขอบด้านล่าง
<i>Left</i>	ค่าขอบด้านซ้าย
<i>Right</i>	ค่าขอบด้านขวา

$$P_{Frustum} = \begin{bmatrix} \frac{2Near}{Right - Left} & 0 & A & 0 \\ 0 & \frac{2Near}{Top - Bottom} & B & 0 \\ 0 & 0 & C & D \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \frac{Right + Left}{Right - Left}$$

$$B = \frac{Top + Bottom}{Top - Bottom}$$

$$C = \frac{Far + Near}{Far - Near}$$

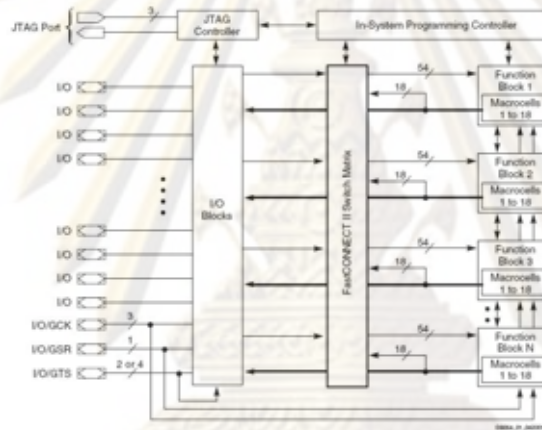
$$D = \frac{2 \times Far \times Near}{Far - Near}$$

ภาคผนวก ค

ฮาร์ดแวร์

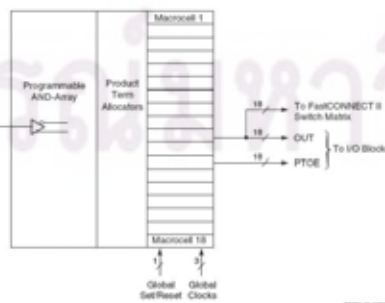
ค.0.1 อุปกรณ์ CPLD และการใช้งาน

อุปกรณ์ CPLD หรืออุปกรณ์ลอจิกโปรแกรมได้แบบซับซ้อนดังแสดงในรูป ค.1 เป็นอุปกรณ์ที่ถูกเลือกเพื่อใช้งานในวงจรแทรกสัญญาณ เนื่องจากมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับวงจรที่มีความซับซ้อนไม่มาก แต่ต้องทำงานที่ความถี่สูง ภายในอุปกรณ์ CPLD นั้นประกอบด้วยกลุ่มของวงจรลอจิกซึ่งเรียกว่า "Function Block" ซึ่งจะสามารถเชื่อมต่อเข้าด้วยกันหรือเชื่อมต่อกับพอร์ตภายนอกผ่านทาง "Switch Matrix" โดย CPLD นั้นจะถูกทำการคอนฟิกูเรชันเพื่อให้สามารถทำงานต่างๆได้ตามต้องการ โดยการทำงานปรับแก้จุดเชื่อมต่อของ switch matrix และ จุดเชื่อมต่อภายใน function block



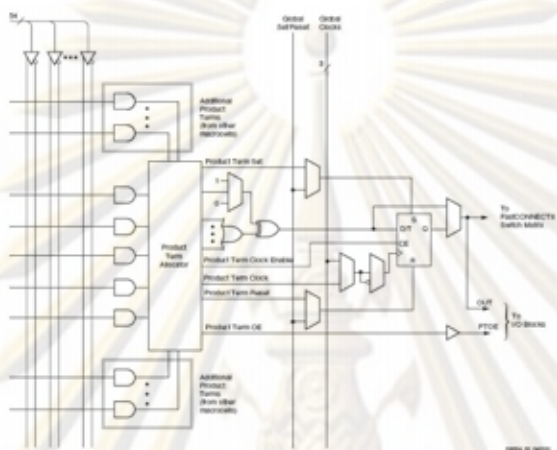
รูปที่ ค.1: โครงสร้างภายใน CPLD

รูป ค.2 แสดงภายในของ function block นั้นจะประกอบด้วย macrocells โดยใน CPLD เบอร์ XC9572 ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้ จะมีจำนวน 18 macrocells ต่อหนึ่ง function block วงจรส่วนนี้สามารถจะโปรแกรมให้สร้างได้ทั้ง combination logic และ sequential logic ประกอบด้วยวงจร programmable AND-array ทำหน้าที่นำเอาสายสัญญาณที่มาจาก switch matrix มาทำให้เป็นสัญญาณ true และ complement รวมเป็น 72 เส้นสัญญาณส่งไปยังวงจร product term allocators และต่อไปยังส่วนอื่นๆต่อไป



รูปที่ ค.2: โครงสร้างภายใน Function Block

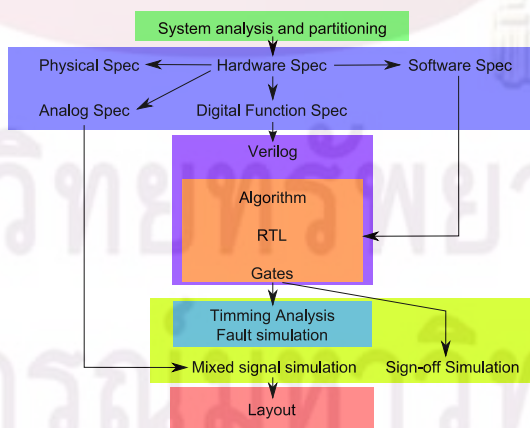
รูป ค.3 แสดง macrocell ที่อยู่ภายใน function block สามารถหาค่า product term จาก สัญญาณอินพุตจำนวน 36 เส้น โดยอาศัยวงจรถอดค่า product term จำนวน 5 ชุด ซึ่งมีลักษณะเป็น AND-array ผลลัพธ์ของวงจรถอดค่า product term ซึ่งจะให้ข้อมูลลอจิกป้อนรวมภูมิ ซึ่งนำไปใช้สร้างวงจรถอดค่าประเภท combination หรือใช้เป็นสัญญาณควบคุมวงจรถอดค่า macrocell register ดังนั้นจึงสามารถทำการกำหนดให้ทำงานเป็นเป็นฟลิป-ฟล็อปแบบต่าง ๆ ได้ เช่น D-Flip-flop, T-Flip-flop หรืออาจกำหนดให้เป็น transparent buffer ในกรณีที่ต้องการให้เป็นเป็นวงจรถอดค่าประเภท combination



รูปที่ ค.3: โครงสร้างภายใน Macro Cell

ค.1 ภาษา Verilog

ภาษา Verilog เป็นภาษา hardware description language (HDL) ชนิดหนึ่งที่ใช้ในอธิบายโมเดลของวงจรถอดค่าหรือเล็ททอนิกส์ภาษา Verilog นั้นจะสามารถนำไปตีความโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะแปลงเป็นวงจรถอดค่า และแปลงเป็นโปรแกรมสำหรับใช้ในการปรับเปลี่ยนโครงแบบของอุปกรณ์ CPLD ได้ตามลำดับ



รูปที่ ค.4: ขั้นตอนการแปลโปรแกรมภาษา Verilog

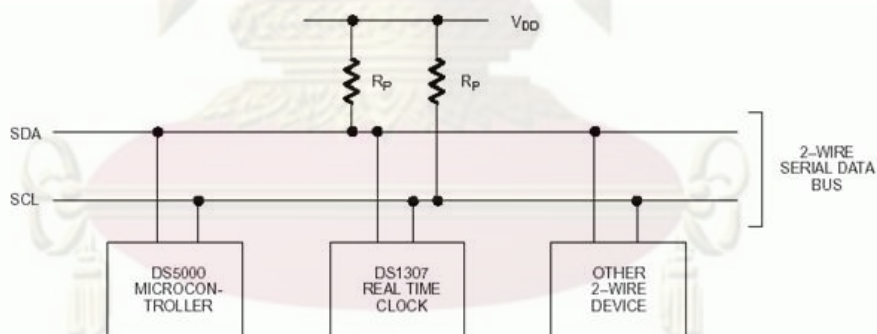
ดังแสดงในรูป ค.4 โดยเบื้องต้น เมื่อทำการออกแบบวงจรถอดค่าส่วนฮาร์ดแวร์และฟังก์ชันการทำงานเรียบร้อยแล้ว ก็จะมีการเขียนโปรแกรมโดยอาศัยภาษา Verilog ซึ่งจะทำให้การอธิบายโมเดลในการทำงาน จากโมเดลในการทำงาน ก็จะถูกเปลี่ยนเป็นอัลกอริทึมในการทำงานไปยัง register

transfer level (RTL) โดย RTL จะเป็นการอธิบายการทำงานของวงจรดิจิทัลแบบสมวาร โดยวงจรดิจิทัลแบบสมวาร ประกอบด้วยวงจร combination และ register ซึ่งจะมีจังหวะทำงานที่สอดคล้องประสานกัน ดังนั้น RTL จะระบุรูปแบบการทำงานของทั้งสองส่วนนี้ไว้ ทำให้ CPLD สามารถทำงานเป็นวงจร sequential ได้ ขั้นตอนสุดท้ายคือการเปลี่ยนจาก RTL เป็น gates ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของตัวตระกูล CPLD นั้นๆ เพื่อให้สามารถทำงานโปรแกรมลงไปในตัวชิพได้

ดังนั้นขั้นตอนการออกแบบโดย Verilog จึง เริ่มต้นโดยการวิเคราะห์ระบบและทำการแบ่งวงจรเป็นโมดูลต่างๆ เมื่อทำการเขียนโปรแกรมของโมดูลต่างๆ เรียบร้อยแล้ว ก็จะมีการตรวจสอบฟังก์ชันการทำงานของโมดูลต่างๆ และจึงเอาโมดูลต่างๆนำไปประกอบรวมกัน แล้วจึงทำการจำลองการทำงานโดยรวม ก่อนที่จะนำไปทำการทดสอบกับวงจรจริง

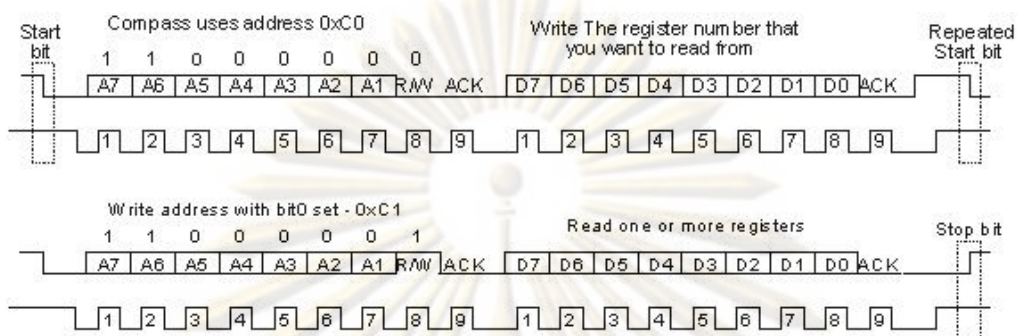
ค.2 I²C บัส

I²C บัส ย่อมาจาก "Inter Integrate Circuit Bus" [43] ซึ่งเป็นระบบบัสที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท Philip เพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่างวงจรรวมหลายวงจรเข้าด้วยกัน โดยระบบบัส I²C บัส นั้นเป็นเป็นการสื่อสารอนุกรม แบบซิงโครนัสโดยใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้นเท่านั้น คือ serial data (SDA) และสาย serial clock (SCL) ทำให้สามารถ เชื่อมต่ออุปกรณ์ จำนวนหลายๆ ตัว เข้ากับ MCU โดยใช้พอร์ตเพียง 2 พอร์ตเท่านั้น เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลได้สองทิศทางในลักษณะ master โดยอาศัยสายไฟเส้นเดียวกับ slave หลายตัว การเชื่อมต่อทางดานไฟฟ้าของ I²C บัส จึงใช้ลักษณะแบบ open-drain และอาศัยตัวต้านทาง pull-up ในการจ่ายกระแสดังแสดงในรูป ค.5



รูปที่ ค.5: ลักษณะการการเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบ I²C บัส

โครงสร้างของสัญญาณไฟฟ้าของ I²C บัส ดังรูป ค.6 นั้นประกอบด้วยสถานะต่างๆดังนี้



รูปที่ ค.6: สถานะของบัส I²C

Start เป็นสถานะเริ่มต้นของการรับส่งสัญญาณ ซึ่งเป็นขอบขาลงของสัญญาณ SDA ขณะที่ SCL เป็นลอจิกสูง สถานะนี้กำเนิดโดย master

Bit Transfer เป็นการรับส่งข้อมูลหนึ่งบิต โดยข้อมูลนี้อาจจะเป็น control byte หรือ Data ระดับลอจิกของสัญญาณจะระบุจากสถานะที่ค้างคงที่ของสัญญาณ SDA ภายใต้พัลส์ของสัญญาณ SCL สัญญาณนี้สามารถกำเนิดได้ทั้ง master และ slave

Acknowledge เป็นสถานะตอบสนองซึ่งกำเนิดโดย slave ซึ่งในขณะดังกล่าว SDA ของ master จะมีสถานะมีความต้านทานสูง (high impedance) เพื่อให้สามารถตรวจสอบได้ว่า slave นั้นมีการตอบสนองที่ถูกต้องหรือไม่

Stop เป็นสถานะสิ้นสุดของการรับส่งข้อมูลซึ่งเป็นขอบขาขึ้นของสัญญาณ SDA ในขณะที่ SCL มีลอจิกสูง

ภาคผนวก ง งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

งานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการวิทยาการคอมพิวเตอร์และวิศวกรรมคอมพิวเตอร์แห่งชาติครั้งที่ 12 (NCSEC2008) ในหัวข้อ “ระบบฉายภาพสามมิติต้นทูนต่ำ” โดย ณฤทธิ์ บุญให้เจริญ, อรรถวิทย์ สุดแสง หน้า 27-32



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**NCSEC
2008**

NCSEC 2008

**The 12th National Computer Science
and Engineering Conference**

Past, Present, and Future of Research in Thai Computing
November 20th - 21st, 2008

Sponsored by:



NECTEC
a member of NSTDA



WD Western
Digital

Organized by:



Department of Electrical Engineering
King Mongkut's University of Technology
North Bangkok
ELECTRICAL
Engineering ๒๕๓๒
Power | Control | Communication | Computer

ระบบฉายภาพสามมิติต้นทุนต่ำ Low Cost Stereoscopic Projection System

ณฤทธิ์ บุญให้เจริญ และ อรรถวิทย์ สุดแสง

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 Email: bnariti@gmail.com, attawith@cp.eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

หลักการพื้นฐานของการฉายภาพสามมิติคือการทำให้ตาแต่ละข้างของผู้ใช้เห็นภาพต่างกัน ถึงแม้ว่าแนวความคิดนี้จะเป็นที่ทราบกันมานานแล้ว การฉายภาพสามมิติขนาดใหญ่ในปัจจุบัน ก็ยังเป็นเรื่องที่มีต้นทุนสูง บทความนี้นำเสนอการพัฒนาของระบบฉายภาพสามมิติต้นทุนต่ำ โดยระบบที่นำเสนอประกอบไปด้วย เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีการ์ดแสดงผล NVIDIA เครื่องฉายภาพแบบ DLP แว่นตาชัตเตอร์ แบบ LCD และชุดวงจรที่ออกแบบขึ้นเพื่อประสานการสลับเปิดปิดตาซ้ายและตาขวาของแว่นให้สัมพันธ์กับภาพที่ฉายจากเครื่องฉายภาพ ความท้าทายของงานอยู่ที่การควบคุมแว่นชัตเตอร์ให้เปิดปิดสัมพันธ์กับภาพที่ฉาย ทั้งนี้เพราะสัญญาณจากคอมพิวเตอร์ต้องผ่านการประมวลผลในเครื่องฉายก่อนจะปรากฏเป็นภาพฉาย โดยเวลาที่ใช้ในการประมวลผลนี้ที่ไม่สามารถคาดเดาได้โดยง่าย ดังนั้นเราจึงไม่สามารถใช้สัญญาณ VGA จากคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมแว่นตาโดยตรง ในงานวิจัยนี้เราจึงขอเสนอการแทรกรหัสลงในสัญญาณ VGA ก่อนต่อเข้าเครื่องฉาย และทำการตรวจจับรหัสดังกล่าวจากแสงที่ฉายออกมาโดยตรงเพื่อระบุว่าจะควบคุมการเปิดปิดชัตเตอร์ของแว่นให้เหมาะสมได้อย่างไร แนวความคิดดังกล่าวได้รับการพัฒนาเป็นระบบต้นแบบแล้ว ซึ่งระบบต้นแบบนี้สามารถฉายภาพสามมิติได้เป็นที่น่าพอใจระดับหนึ่ง โดยมีค่าใช้จ่ายในการพัฒนาจบรวมเพียง 3,000 บาท และการติดตั้งไม่ต้องการปรับแต่งเครื่องฉายแต่อย่างใด

คำสำคัญ: เครื่องฉายภาพสามมิติ, แว่นชัตเตอร์

Abstract

General idea to a stereoscopic projection is to allow each eye to see different images. Although the key idea is available for a long time, creating large stereoscopic image is still available only at high price. In this paper, development of a low-cost stereoscopic projection system is presented. The system consists of a PC with an NVIDIA video card, a DLP projector, LCD shutter glasses and a proposed system for synchronizing the operation of the shutter with the

projected image. A main challenge is that the projector need some processing time (normally difficult to be predicted) before an image can be projected, therefore the VGA signal from the PC cannot be directly used to control the shutter glasses. Our idea is to insert some pattern into the VGA signal to indicate which eye an image is intended; the pattern is then retrieved by a light sensor placed on the projector screen so that appropriate control to the shutter can be issued. A prototype according to this idea has been constructed. In preliminary testing, the prototype is capable of displaying stereoscopic images. The cost for the synchronization system is around 3,000 baht and the installation does not require any modification of the projector.

Keywords: Stereoscopic projection, shutter glasses

1. คำนำ

การรับรู้ความเป็นสามมิติเป็นธรรมชาติพื้นฐานของมนุษย์ที่เชื่อมโยงกับความเข้าใจในการมีอยู่ของโลกจริง การแสดงภาพสามมิติที่ให้ความรู้สึกถึงความลึกอย่างแท้จริง (Stereographic image) จึงสามารถดึงดูดความสนใจได้เป็นอย่างดี และถูกนำไปใช้ในงานต่างๆ อย่างกว้างขวาง ทั้งในด้านบันเทิง สื่อโฆษณาแบบใหม่ การแสดงผลข้อมูลทางภูมิศาสตร์ การจำลองการประกอบชิ้นงาน การออกแบบผลิตภัณฑ์ หรืองานอื่นๆ ที่ต้องอาศัยการมองเห็นวัตถุในสามมิติในมุมมองที่หลากหลาย หรือต้องทดลองจัดวางวัตถุให้เหมาะสมในสิ่งแวดล้อมสามมิติที่ซับซ้อน ความต้องการดังกล่าวทำให้เกิดการพัฒนาของระบบแสดงภาพสามมิติอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการแสดงผลภาพสามมิติบนจอขนาดใหญ่ ด้วยความละเอียดสูง ก็ยังมีการใช้งานในวงจำกัด เพราะต้องใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งมีราคาและค่าใช้จ่ายสูงมาก

เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาาระบบฉายภาพสามมิติ (Stereographic Projection System) ที่มีต้นทุนต่ำ โดยระบบที่นำเสนอประกอบไปด้วย เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีการ์ดแสดงผล NVIDIA เครื่องฉายภาพแบบ DLP แวนดาซัดเตอร์ แบบ LCD (สามารถควบคุมให้ตาแต่ละข้างปิดมิดได้) และชุดวงจรที่ออกแบบขึ้นเพื่อประสานการสลับเปิดปิดตาซ้ายและตาขวาของแวนดาให้สัมพันธ์กับภาพที่ฉายจากเครื่องฉายภาพ เพื่อให้ตาแต่ละข้างของผู้ใช้เห็นภาพต่างกัน อันจะทำให้ผู้ใช้รับรู้ถึงความสามมิติ อนึ่ง แนวความคิดในการสร้างภาพสามมิติจากเครื่องฉายภาพไม่ใช่เรื่องใหม่ ระบบที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางใช้การฉายภาพด้วยเครื่องฉายสองตัว ตัวหนึ่งฉายภาพสำหรับตาซ้าย และอีกตัวสำหรับตาขวา โดยฉายผ่านแผ่นโพลาไรเซอร์ ลงบนฉากรับภาพชนิดพิเศษ ซึ่งผู้ใช้ต้องสวมแว่นโพลาไรเซอร์ที่ติดตั้งแกนโพลาไรเซชันให้ตาแต่ละข้างมองเห็นเฉพาะภาพจากเครื่องฉายเครื่องเดียว ข้อดีของระบบดังกล่าวคือต้องใช้เครื่องฉายสองตัว ที่ปรับตั้งให้ฉายภาพให้ซ้อนทับกันพอดี นอกจากนี้ยังต้องใช้ฉากรับภาพชนิดพิเศษซึ่งสามารถรักษาโพลาไรเซชันของแสงที่ฉายไว้ได้ ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องฉายแบบ DLP ที่มีจำหน่ายทั่วไปเพียงเครื่องเดียว โดยจะฉายภาพสำหรับตาซ้ายและตาขวาสลับกันเฟรมเว้นเฟรม ความท้าทายของงานอยู่ที่การควบคุมแวนดาซัดเตอร์ให้เปิดปิดสัมพันธ์กับภาพที่ฉาย ทั้งนี้เพราะสัญญาณจากคอมพิวเตอร์ต้องผ่านการประมวลผลในเครื่องฉายก่อนจะปรากฏเป็นภาพฉาย โดยเวลาที่ใช้ในการประมวลผลนี้ที่ไม่สามารถคาดเดาได้ ดังนั้นเราจึงไม่สามารถใช้สัญญาณ VGA จากคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมแวนดาโดยตรง ในงานวิจัยนี้เราจึงขอเสนอการแทรกรหัสลงในสัญญาณ VGA ก่อนต่อเข้าเครื่องฉาย และทำการตรวจจับรหัสดังกล่าวจากแสงที่ฉายออกมาโดยตรงเพื่อระบุว่าจะควบคุมการเปิดปิดซัดเตอร์ของแวนดาให้เหมาะสมได้อย่างไร แนวความคิดดังกล่าวได้รับการพัฒนาเป็นระบบต้นแบบแล้ว ซึ่งระบบต้นแบบนี้สามารถฉายภาพสามมิติได้เป็นที่น่าพอใจระดับหนึ่ง โดยมีค่าใช้จ่ายในการพัฒนางานวิจัยเพียง 3,000 บาท และ การติดตั้งก็ไม่ต้องการปรับแต่งเครื่องฉายแต่อย่างใด

2. งานวิจัยและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีจอแสดงผลภาพสามมิติ

จุดเริ่มต้นของการประดิษฐ์ระบบแสดงผลภาพสามมิตินั้นสามารถย้อนกลับไปในยุคของนักคณิตศาสตร์ยุคเรอเนซองส์กล่าวถึงในงานวิจัย [1] จากสมมุติฐานดังกล่าว ทำให้เกิดทฤษฎีการวาดภาพสามมิติซึ่งอาศัยหลักการคือ มุมมองที่แตกต่างกันทำให้เห็นภาพแตกต่างกัน

สอดคล้องกับการมองเห็นของมนุษย์ซึ่งอาศัยตาแต่ละข้างซึ่งมองเห็นภาพที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเกิดการประดิษฐ์จอแสดงผลภาพสามมิติโดยอาศัยหลักการของการลวงตาให้ภาพที่ปรากฏในตาแต่ละข้างเห็นแตกต่างกัน

Chales Wheatstone เป็นนักประดิษฐ์คนแรกที่ได้ใช้หลักการดังกล่าวในการประดิษฐ์แวนดาภาพสามมิติ [2] เมื่อเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาขึ้นได้มีความพยายามที่จะประดิษฐ์อุปกรณ์แสดงผลสามมิติที่ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ในการแสดงผลรูปแบบต่างๆ รูปแบบหนึ่งคือแวนดาซัดเตอร์ ซึ่งนิยมใช้ใน โลกเสมือนหรือ Virtual Reality (VR) งานวิจัยหลายชิ้นได้ทำการพัฒนาระบบ VR เช่นในงานวิจัยของ Ware [3] และได้มีการพัฒนาระบบดังกล่าวเพื่อประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย [4-7]

งานวิจัยหลายชิ้นได้ทำการวิเคราะห์ทฤษฎีทางเรขาคณิตของการวาดภาพสามมิติเช่นในงานของ Lacotte [8] ซึ่งแสดงผลของความคิดที่เห็นต่างๆทางเรขาคณิตที่เกิดจากขั้นตอนการวาดภาพสามมิติของอุปกรณ์แสดงผลที่มีพื้นฐานเดียวกับแวนดาซัดเตอร์ ในงานวิจัยนี้ยังนำเสนอถึงปัญหาการ Crossstalk ซึ่งเกิดจากจิตวิทยาของการรับรู้ภาพของมนุษย์

2.2 แวนดาซัดเตอร์

แวนดาซัดเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบ โดยจะทำหน้าที่ทำหน้าที่เปิด-ปิด เพื่อควบคุมแสงของภาพที่ปรากฏบนหน้าจอให้ผ่านมาปรากฏบนตาแต่ละข้าง สัมพันธ์กับจังหวะการฉายของภาพบนหน้าจอในขณะนั้นๆ ดังนั้นการควบคุมจังหวะการทำงานของแวนดาซัดเตอร์จึงเป็นส่วนสำคัญ ดังในงานวิจัยของ Kunz [9] ซึ่งต้องอาศัยการศึกษาคุณสมบัติของ LCD ที่ใช้ในแวนดา และงานวิจัยของ Woods [10] ซึ่งเป็นการศึกษาการตอบสนองของ LCD เพื่อคำนวณการชดเชยความหน่วงที่เกิดขึ้นจากการทำงานของ LCD ในขั้นตอนการสร้างสัญญาณควบคุมแวนดา

2.3 อุปกรณ์ฉายภาพ

ปัญหาการประยุกต์ใช้งานระบบเครื่องฉายภาพหรือจอแสดงผลแบบต่างๆกับแวนดาซัดเตอร์ ดังการศึกษาในงานวิจัยของ Woods [10] ซึ่งเป็นการศึกษาการปล่อยแสงของจอแสดงผล CRT และการส่องผ่าน LCD ของแสงสีต่างๆของ ในขณะที่มีการเปิดปิดซัดเตอร์ ทำให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของสีที่จะเกิดขึ้นจากจังหวะการเปิด-ปิดของแวนดา

ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีแสดงผล DLP ซึ่งมีพื้นฐานการทำงานที่แตกต่างจากจอแสดงผล CRT ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานเครื่องฉายภาพ DLP กับแว่นชัตเตอร์ จึงแตกต่างกัน เครื่องฉายภาพแบบ DLP โดยทั่วไปประกอบด้วยอุปกรณ์จำนวน 3 ส่วนคือแหล่งกำเนิดแสงวงล้อสี และอุปกรณ์ DMD (Digital Micromirror Device)

การทำงานของเครื่องฉาย DLP เริ่มจากแสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะส่องผ่านวงล้อสีซึ่งจะทำหน้าที่กรองแสงให้เหลือเพียงแสงที่เป็นแม่สีคือแดง เขียวและน้ำเงิน แสงที่ได้จะถูกฉายไปยังกระจกขนาดเล็กลึบบนอุปกรณ์ DMD ซึ่งอุปกรณ์ DMD จะทำการเลือกสะท้อนให้แสงถูกฉายไปตกกระทบบนหน้าจอหรือไม่ ดังนั้นเครื่องฉาย DLP จึงใช้การควบคุมความของช่วงที่กระจกทำการสะท้อนแสงไปยังจอรับภาพ โดยปกติรูปแบบของการหันกระจกจะเป็นการทำงานแบบทวิภาค (Binary) ที่มีความถี่ประมาณ 16.3 kHz [11] ดังนั้นการเข้ารหัสสัญญาณควบคุมจังหวะของการฉายดังกล่าวในงานวิจัยของ Cotting [12] จึงแสดงให้เห็นถึงโอกาสที่จังหวะการปิดเปิดของแว่นชัตเตอร์จะทำให้เกิดความสูญเสียค่าช่วงพลวัต (Dynamic Range) ของภาพที่ปรากฏบนหน้าจอได้

2.4 การ์ดแสดงผลภาพสามมิติ

การ์ดแสดงผลสามมิติคืออุปกรณ์หนึ่งที่ใช้ในการวาดภาพสามมิติซึ่งได้รับการพัฒนาอย่างมากและมีราคาที่ถูกลง GPU เป็นวิวัฒนาการหนึ่งของการ์ดแสดงผลสามมิติ จากในอดีตที่ภาพจะถูกวาดโดยคำสั่งจะส่งไปยัง CPU เพื่อวาดลงไปบนหน่วยความจำแสดงผล แต่ในปัจจุบันคำสั่งจะถูกส่งจาก CPU ไปยัง GPU ซึ่ง GPU จะเป็นผู้วาดภาพจากขั้นตอนการทำงานนี้เองที่ทำให้ผู้ผลิตการ์ดแสดงผลสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการแสดงผลโดยอาศัยการปรับเปลี่ยนไดรเวอร์

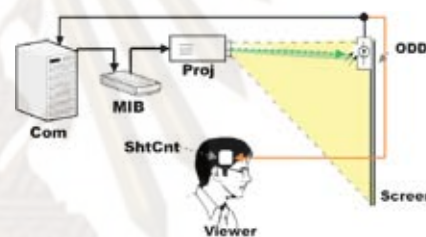
รูปแบบหนึ่งของการคิดแปลงคือการวาดภาพ Stereoscopic โดยอาศัยหลักการสร้างภาพลวงตาสามมิติดังกล่าวในขั้นต้น ตัวอย่างเช่นในการ์ดแสดงผล NVIDIA การวาดภาพ Stereoscopic เป็นการวาดภาพสามมิติสองภาพที่มีตำแหน่งต่างกันบนแนวนอนหรือมีค่า Separation ในทางทฤษฎีค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากระยะห่างของตาซ้ายและขวาของผู้ชม แต่ในทางปฏิบัติผู้ใช้สามารถปรับได้ผ่านทางไดรเวอร์เนื่องจากค่า Separation ที่มากไปอาจทำให้เกิดอาการปวดตาได้

ในการวาดภาพ Stereoscopic ของการ์ดแสดงผล NVIDIA จะอาศัยหน่วยความจำแสดงผล (Frame Buffer) จำนวน 4 ชุดสำหรับสองตา โดยจะแบ่งเป็นหน่วยความจำตาซ้ายสองชุด และตาขวาสองชุด โดยในแต่ละชุดจะแบ่งเป็นหน่วยความจำในการวาดภาพในขณะนั้นและ

หน่วยความจำที่ถูกเตรียมสำหรับการวาดภาพต่อไปหรือในตำแหน่งต่อไป เมื่อภาพที่ปรากฏบนหน้าจอจะปรากฏภาพของหน่วยความจำทั้ง 4 สลับหมุนเวียนไปโดยอัตโนมัติ ภาพของตาซ้ายและตาขวาจะถูกฉายสลับกันและสัญญาณบ่งบอกข้างของตาจะถูกส่งตามออกไป

3. ระบบที่นำเสนอ

จากปัญหาและการศึกษาที่กล่าวมาในขั้นต้น เราได้พัฒนาระบบฉายภาพสามมิติดังแสดงในแผนภาพในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ชิ้นคือ อุปกรณ์แทรกสัญญาณในสัญญาณ VGA (Marker Insertion Box -- MIB) อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (On-Display Dongle -- ODD) และส่วนควบคุมแว่นชัตเตอร์ (Shutter Controller -- ShtCnt) โดยผู้ใช้สามารถนำไปใช้กับโปรแกรมวาดภาพสามมิติต่างๆ ที่การ์ดแสดงผล NVIDIA รองรับ



รูปที่ 1 แผนภาพระบบที่ได้รับการพัฒนา

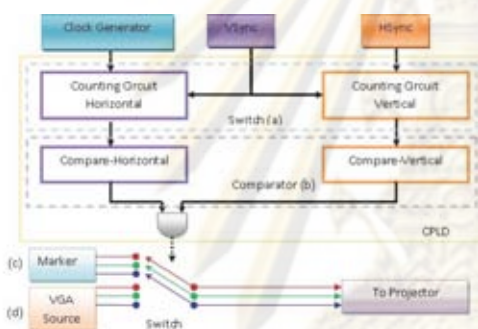
3.1 อุปกรณ์แทรกสัญญาณในสัญญาณ VGA

การแทรกสัญญาณลงไปในสัญญาณภาพนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถทำการจับภาพที่กำลังปรากฏบนหน้าจอว่าเป็นภาพของตาซ้ายหรือตาขวา โดยการอาศัยสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากการ์ดแสดงผลผ่านทางช่องสื่อสาร DDC (Display Data Channel) ซึ่งระดับแรงดันของสัญญาณดังกล่าวจะสามารถระบุว่าเป็นสัญญาณเฟรมภาพที่ปรากฏอยู่นั้นเป็นของตาข้างใด ทำให้อุปกรณ์แทรกสัญญาณในสัญญาณ VGA สามารถทราบว่าเฟรมภาพปัจจุบันเป็นของตาข้างใด

รูปแบบของสัญญาณที่ใช้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่สามารถเป็นสีขาวและดำ จำนวน 2 รูป ซึ่งถูกแทรกลงไปบนมุมบนซ้ายของภาพ โดยรูปสี่เหลี่ยมทั้งสองรูปจะปรากฏสีที่มีความสว่างตรงข้ามกัน ทำให้สามารถใช้วัดความต่างของความสว่างของรูปสี่เหลี่ยมในการระบุข้างของตาได้ วิธีการดังกล่าวมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้สัญญาณสี่เหลี่ยมเพียงรูปเดียว ที่อาจถูกรบกวนโดยแสงจากสภาพแวดล้อมได้ง่าย

วงจรแทรกสัญญาณในสัญญาณ VGA แสดงไว้ในรูปที่ 2 ประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนของวงจรรวภาพที่เปลี่ยนและส่วนของวงจรกำเนิดสี ซึ่งวงจรทั้งสองถูกพัฒนาบนอุปกรณ์ลอจิกโปรแกรมได้ (CPLD) โดยใช้ XC9572XL-10 อาศัยภาษา Verilog โดยวงจรที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นมีขนาด 43 Macro Cells และ 271 Product Terms

ในการพัฒนา สัญญาณขาเข้าของวงจรดังกล่าวประกอบด้วยสัญญาณประสานเวลาแนวตั้ง สัญญาณประสานเวลาแนวนอน ซึ่งได้จากการคัดแสดงผล สัญญาณอีกชุดหนึ่งที่ใช้คือสัญญาณนาฬิกาของจุดภาพ ซึ่งจะถูกกำเนิดจากตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกาความถี่สูง สัญญาณทั้งสามเส้นจะถูกป้อนเข้าสู่วงจรนับ (a) ซึ่งจะทำได้สัญญาณระบุพิกัดของจุดภาพ ในขณะที่น่า ว่าอยู่ในตำแหน่งจุดภาพใด



รูปที่ 2 แผนภาพภายในอุปกรณ์แทรกสัญญาณ

เมื่อทราบตำแหน่งของจุดภาพในขณะที่น่า ก็จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าของพิกัดต่างๆ (b) ของสัญญาณที่เปลี่ยนที่ตรงกลาง ดังนั้นถ้าหากในขณะที่น่า เป็นสัญญาณภาพของสัญญาณที่เปลี่ยน วงจรก็จะทำการแทรกสัญญาณสัญญาณ (c) หากไม่ใช่ก็จะเชื่อมต่อสัญญาณภาพจากการคัดแสดงผล (d) โดยอาศัยวงจรเลือกสัญญาณแบบแอนะล็อกที่มีความถี่ในการสลับสูงกว่าความถี่สัญญาณนาฬิกาของจุดภาพ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ MAX4027 ในการคัดต่อสัญญาณดังกล่าว

ส่วนของวงจรมีหน้าที่จะทำการสร้างสัญญาณภาพที่มีสีตรงความต้องการให้ปรากฏบนหน้าจอ ซึ่งจะสัมพันธ์กับภาพที่กำลังปรากฏว่าเป็นของตาข้างไหน ดังนั้นสัญญาณขาเข้าของส่วนวงจรดังกล่าวจึงต้องอาศัยสัญญาณ 2 เส้นคือ สัญญาณระบุพิกัดของจุดภาพในขณะที่น่าและสัญญาณ DDC ที่บ่งบอกข้างของตา

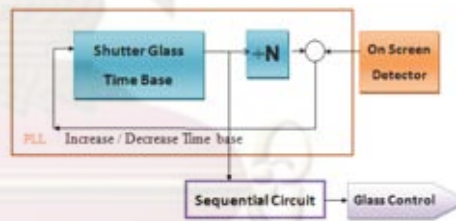
3.2 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง

จากการที่รูปแบบของสัญญาณที่เปลี่ยนทั้งสองรูปนั้นมีสีหรือค่าความสว่างที่ตรงข้ามกัน ดังนั้นวงจรที่ทำการตรวจจับสัญญาณจึงใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงจำนวนสองตัว ซึ่งจะติดตั้งอยู่บนหน้าจอแสดงผลภายในพื้นที่ของรูปที่เปลี่ยนทั้งสองรูป โดยอุปกรณ์ตรวจจับแสงดังกล่าวจะให้แรงดันที่สัมพันธ์กับความสว่าง แต่จากการที่สัญญาณที่เปลี่ยนทั้งสองรูปนี้มีค่าความสว่างที่ตรงข้ามกันทำให้สามารถใช้การเปรียบเทียบแรงดันจากตัวตรวจจับทั้งสองได้โดยตรง การเปรียบเทียบแรงดันจะทำให้ทราบได้ว่าในขณะที่น่าเป็นกรณีฉายภาพของตาข้างใด

เมื่อสามารถตรวจจับและตีความสัญญาณที่ปรากฏบนหน้าจอได้แล้ว วงจรก็จะทำการสร้างสัญญาณอินฟราเรดไร้สายเพื่อส่งไปยังส่วนควบคุมแว่นชุดเตอร์ โดยสัญญาณอินฟราเรดจะถูกใส่สัญญาณด้วยความถี่ 36 kHz จากวงจรรวมกำเนิดความถี่ LM555 เพื่อลดการถูกรบกวนจากแสงในสภาพแวดล้อม

3.3 ส่วนควบคุมแว่นชุดเตอร์

ส่วนควบคุมแว่นชุดเตอร์ประกอบด้วยวงจร 3 ส่วนคือ โมดูลตรวจจับสัญญาณอินฟราเรด 36 kHz วงจรกำเนิดความถี่แบบเฟสล็อกคูล และวงจรจ่ายแรงดันเพื่อขับแว่นดังแสดงในรูปที่ 3



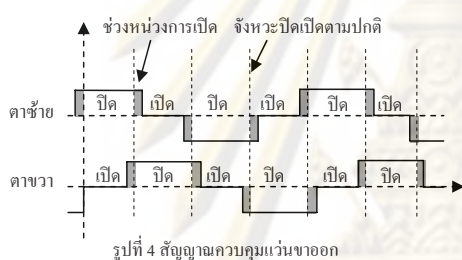
รูปที่ 3 แผนภาพภายในอุปกรณ์ควบคุมแว่นชุดเตอร์

ในการทำงานส่วนวงจรควบคุมจะทำการตรวจจับการปรากฏของสัญญาณอินฟราเรดที่ถูกใส่สัญญาณด้วยความถี่ 36 kHz ด้วย TSOP34836 ซึ่งส่งสว่างจากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ติดตั้งอยู่บนจอแสดงผล โดยสัญญาณอินฟราเรดดังกล่าวจะมีจังหวะการปิดเปิดตรงกับจังหวะการฉายภาพ สัญญาณจังหวะการปิดเปิดของภาพดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยังวงจรมีความถี่แบบเฟสล็อกคูล ซึ่งจะสร้างสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ 10 เท่า โดยในกรณีนี้ภาพถูกฉายด้วยความถี่ 60 Hz ทำให้ได้ความถี่ 600 Hz



สัญญาณนาฬิกาที่สร้างจากวงจรถ่ายความถี่นั้นจำเป็นจะต้องมีจังหวะที่ตรงกับกระจายของภาพ ดังนั้นจึงใช้วงจรถ่ายความถี่แบบเฟสล็อกซึ่งถูกพัฒนาอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F687 ที่ความถี่ 18.432 MHz และเนื่องจากการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณนาฬิกาทำให้สามารถควบคุมความถี่ของการทำงานให้อยู่ในช่วงจำกัด ทำให้สามารถลดผลกระทบเมื่อสัญญาณอินพุตหรือสัญญาณรบกวน

สัญญาณนาฬิกาที่ได้จะถูกนำไปป้อนยังวงจรถ่ายความถี่เพื่อขับแวน โดยสัญญาณนาฬิกาจะถูกนำไปกระตุ้นกลไกสถานะ (State Machine) ที่ถูกเขียนอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะสร้างสัญญาณที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 4 สัญญาณที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณสองขั้วและมีการชดเชยความหน่วงของการเปิดปิดของ LCD ข้อดีของการใช้สัญญาณแบบสองขั้วคือทำให้ LCD สามารถตอบสนองได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4 สัญญาณควบคุมแวนขาออก

ในทางปฏิบัติ ค่าความหน่วงของการเปิดปิดของแวนซ์เตอร์จะถูกนำมาชดเชยโดยอาศัยการตั้งค่าของกลไกสถานะ โดยในการปรับค่าชดเชยนั้นมีเพื่อให้ LCD มีช่วงที่แสงส่องผ่านมากที่สุดโดยเกิดปรากฏการณ์ Ghosting หรือ Crosstalk [9] ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่มีแสงของคาอีกข้างหลุดลอดเข้ามา มองเห็นเป็นภาพสามมิติทำได้ยากให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ปัญหาอีกประการที่เกิดจากเครื่องฉายแบบ DLP คือความเพี้ยนของสี ซึ่งเกิดจากเปิดปิดที่ไม่สัมพันธ์กับการหมุนของวงล้อสี ทำให้การปรับค่าชดเชยนั้นมีความสำคัญ

ดังนั้นวิจัยที่ได้กล่าวมาในข้างต้น จากการใช้การหมุนของวงล้อสีซึ่งทำให้ภาพที่ปรากฏบนหน้าจอนั้นเป็นการฉายของภาพสีแดงเขียวและน้ำเงินสลับกันไปมา ดังนั้นถ้าหากแวนซ์เตอร์ทำการตัดแสงโดยมีจังหวะเวลาเหลื่อมล้ำเข้าสู่ช่วงการฉายของสีใดๆ ก็จะทำให้ค่าแสงสีของภาพที่เห็นนั้นมีความผิดเพี้ยนไป

ลักษณะความผิดเพี้ยนของสีอีกประการคือการเข้ารหัสของจังหวะการหันของกระจกขนาดเล็กบนตัวชิป DMD ในเครื่องฉายภาพ เนื่องจากเทคนิคที่ใช้ในการขับกระจกให้มีคาบหันแตกต่างกันดังลูก

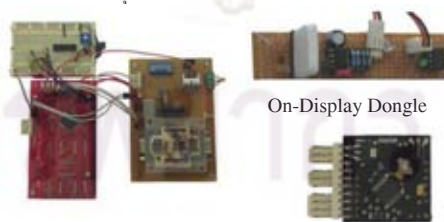
ศึกษาในงานวิจัย [12] แสดงให้เห็นว่า ถ้าหากช่วงที่แวนซ์เตอร์กำลังบั๊งแสงนั้นเป็นช่วงที่กระจกกำลังหันหรือแสดงผลในส่วนของสัญญาณที่เป็น LSB หรือบิตที่มีความสำคัญน้อยสุด ก็จะทำให้ภาพที่ปรากฏเสียช่วงพลวัต จึงทำให้การปรับคาบเวลาของแวนซ์เตอร์นั้นต้องมีความแม่นยำมากขึ้น

จากปัญหาข้างต้นจึงจำเป็นต้องใช้ช่วงเวลาที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ของจังหวะการฉายภาพซึ่งเป็นที่มาของการเลือกให้วงจรถ่ายความถี่สัญญาณนาฬิกาความถี่ 10 เท่า ซึ่งทำให้สามารถปรับจังหวะการเปิดปิดของแวนซ์เตอร์ได้ในความแม่นยำ 10% ของความถี่การฉายในแต่ละภาพหรือประมาณ 1.6ms ซึ่งสูงเมื่อเทียบกับค่าความหน่วงของการเปิดปิดของแวนซ์เตอร์ LCD

4. การประยุกต์และทดสอบการใช้งาน

ระบบจอแสดงผลภาพสามมิติที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์ใช้การโปรแกรมประยุกต์สามมิติต่างๆ ที่ใช้ไลบรารี DirectX หรือ OpenGL ภายใต้ข้อกำหนดในคู่มือการพัฒนาโปรแกรม NVIDIA GPU Programming Guide [13] เช่นการหันมาใช้เทคนิคพิเศษในการปรับแต่งภาพหลังจากที่ภาพสามมิติถูกวาด (Post-Processing) การวาดภาพสามมิติโดยอาศัยซอฟต์แวร์เป็นต้น ซึ่งเป็นการแนะนำสำหรับนักพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ในการนำไปพัฒนาโปรแกรมต่างๆ

การทดสอบกระทำโดยทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 5 และอาศัยภาพที่ถูกฉายจากการแสดงผล NVIDIA GT6600 ภายใต้ไดรเวอร์ ForceWare 93.71 กับเครื่องฉายภาพจำนวนสองรุ่นคือ Optoma รุ่น RP712E และ Mitsubishi รุ่น XD480U จากการโดยใช้ตัวอย่างโปรแกรมใน Microsoft DirectX ด้วยความถี่แสดงผลภาพค่าต่างๆพบว่า ความถี่สูงสุดที่ระบบยังสามารถทำงานได้คือ 60,61,70 Hz โดยในกรณีของเครื่องฉายภาพ Mitsubishi นั้นเนื่องจากเครื่องฉายภาพไม่ได้มีระบบประสานความเร็วของวงล้อสีให้เข้ากับสัญญาณประสานจังหวะการฉายภาพ ดังนั้นจึงประสบกับปัญหาเฟรมครี๊อป ทำให้ภาพที่ผู้ใช้เห็นเกิดการกระตุก



MIB

On-Display Dongle

Shutter Controller

รูปที่ 5 วงจรที่ใช้ทดลอง

5. สรุปผล

จากการพัฒนาระบบแสดงผลภาพสามมิติพบว่าระบบสามารถทำการแสดงผลภาพสามมิติได้โดยมีต้นทุนที่ต่ำ ทว่าปัญหาสำคัญของระบบดังกล่าวคือ ความถี่ในการทำงานของเครื่องฉายภาพ โดยทั่วไปนั้นน้อยทำให้ผู้ใช้เห็นการกระพริบของภาพ ปัญหาต่อมาเมื่อทำการปรับความถี่ของการแสดงผลเพิ่มขึ้นก็อาจเกิดเฟรมครีอปซึ่งเกิดจากการที่เครื่องฉายภาพไม่ได้ใช้ระบบ PLL ในการประสานจังหวะกับสัญญาณภาพ แต่ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ในกรณีที่สามารถทำการปรับความถี่อย่างละเอียดของการแสดงผลของการ์ดแสดงผลได้ในฐานเวลาจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] I. Sexton and P. Surman, "Stereoscopic and autostereoscopic display systems," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 16, pp. 85-99, 1999.
- [2] C. Wheatstone, "Contributions to the Physiology of Vision. Part the First. On some remarkable, and hitherto unobserved, Phenomena of Binocular Vision," Philosophical Transactions, vol. 128, pp. 371-394, 1838.
- [3] C. Ware, A. Kevin, and S. B. Kellogg "Fish tank virtual reality," Proc. SIGCHI conference on human factors in computing systems, pp. 37-42, 1993.
- [4] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, and T. A. DeFanti, "Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE," presented at the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1993.
- [5] V. P. d. S. Goes, L. d. S. Machado, M. C. Cabral, R. B. V. Leitao, R. d. D. Lopes, and M. K. Zuffo, "Low Cost Interactive Stereoscopic Full Color Direct Volume Visualization of the Visible Human Dataset for Virtual Reality Medical Applications."
- [6] M. Deering, "High resolution virtual reality," presented at SIGGRAPH 92, 1992.
- [7] M. Agrawala, A. C. Beers, I. McDowall, B. Frohlich, M. Bolas, and P. Hanrahan, "The two-user responsive workbench: Support for collaboration through individual views of a shared space," presented at SIGGRAPH 97, 1997.
- [8] B. Lacotte, "Elimination of keystone and crosstalk effects in stereoscopic video," University of Quebec, National Institute of Scientific Research, INRS-Telecommunications, Quebec, Canada 22 Dec 1995 1995.
- [9] A. M. Kunz and C. P. Spagno, "Novel shutter glass control for simultaneous projection and picture acquisition," presented at The Immersive Projection Technology and Virtual Environments 2001, 2001.
- [10] A. J. Woods and S. S. L. Tan, "Characterizing sources of ghosting in time-sequential stereoscopic video displays," presented at SPIE, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IX, 2002.
- [11] DMD Discovery™ 3000 Chip Set: Texas Instruments, Inc., 2005.
- [12] D. Cotting, M. Naef, M. Gross, and H. Fuchs, "Embedding Imperceptible Patterns into Projected Images for Simultaneous Acquisition and Display," presented at The 3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2004.
- [13] NVIDIA GPU Programming Guide, vol. 2.5.0: NVIDIA Corporation, 2006.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณฤทธิ์ บุญให้เจริญ เกิดเมื่อวันที่ 10 มกราคม 2526 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนเดียวของนายสมศักดิ์ และนางอัญชญา บุญให้เจริญ สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์เชิงกล ในปีการศึกษา 2548 มีความสนใจทางด้านระบบหุ่นยนต์และระบบสมองกลฝังตัว



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย