



กทปส

## รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วย  
อุปกรณ์รับรู้ความลึก

**Appliance for Real Time Chroma Key Matting with Depth Sensor  
Augmentation**

อรรถวิทย์ สุดแสง

นัทที นิภานันท์

ณัฐพงศ์ ชินธเนศ

ธันวาคม 2560

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์  
สาธารณะ (สำนักงาน กสทช.)

แบบ กทปส. ME-003

รายงานฉบับสมบูรณ์

ทุนส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา  
สัญญารับทุนเลขที่ B๒-๑-๐๐๐๒/๕๗

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก  
Appliance for Real Time Chroma Key Matting with Depth Sensor Augmentation

คณะนักวิจัย

- |                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| 1. ผศ. ดร. อรรถวิทย์ สุดแสง | นักวิจัยหัวหน้าโครงการ |
| 2. ผศ. ดร. นันทิ นิภาพันธ์  | นักวิจัยร่วม           |
| 3. ผศ. ดร. ณัฐพงศ์ ชินธเนศ  | นักวิจัยร่วม           |

ได้รับทุนอุดหนุนจาก  
กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อ  
ประโยชน์สาธารณะ (สำนักงาน กสทช.)

ธันวาคม 2560

## บทสรุปผู้บริหาร

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

ธันวาคม 2560

การใช้งานสื่อวิดีโอมีการเติบโตอย่างก้าวกระโดดในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา และมีแนวโน้มที่จะเติบโตต่อเนื่องอย่างชัดเจน การผลิตสื่อวิดีโอจึงเป็นงานที่มีความสำคัญในการรองรับการขยายตัวดังกล่าว อุปกรณ์สำหรับการผลิตสื่อวิดีโอส่วนใหญ่ต้องจัดหาด้วยการนำเข้าจากต่างประเทศ หลายชิ้นมีราคาสูง และยังมีค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสูงตามไปด้วย การแข่งขันจากผู้ผลิตอุปกรณ์ในประเทศเป็นไปได้ยาก เพราะต้องใช้งบประมาณในการวิจัยพัฒนาเป็นจำนวนมาก พร้อมทั้งต้องมีบุคลากรที่มีความรู้เฉพาะทาง และมีการลงทุนด้านการตลาดเพื่อแข่งขันกับผู้ผลิตต่างประเทศที่มีฐานลูกค้าอยู่แล้ว โครงการวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะสร้างทางเลือกในการแบ่งเบาภาระดังกล่าวสำหรับอุปกรณ์แยกฉากหลัง กล่าวคือโครงการอุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก มีวัตถุประสงค์หลักคือ

1. เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับการแยกภาพวัตถุออกจากฉากหลัง (Matting) โดยใช้วิธีการพิจารณาค่าสี(Chroma Keying) ร่วมกับอุปกรณ์รับรู้ความลึก
2. เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการแยกภาพวัตถุออกจากฉากหลังโดยใช้วิธีการพิจารณาค่าสี ซึ่งสามารถทำงานได้อย่างสะดวก

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ข้อแรก คณะผู้วิจัยได้พิจารณาศึกษาแนวทางการแยกฉากหลังแบบต่างๆ ที่มีการใช้งานจริงและมีการนำเสนอในแวดวงวิจัย และได้ข้อสรุปว่าจะใช้แนวทางของกระบวนการวิธี Color Difference เป็นหลัก โดยได้มีการพัฒนาส่วนกำหนดค่าเริ่มต้นด้วยอุปกรณ์วัดความลึกร่วมด้วย ซึ่งทำให้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นได้แบบอัตโนมัติ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาส่วนเพิ่มคุณภาพของผลลัพธ์การแยกฉากหลังให้แม่นยำมากยิ่งขึ้นด้วยการใช้ตัวกรองแบบนำทางสำหรับวัตถุประสงค์ข้อสองนั้น คณะผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญกับการออกแบบส่วนติดต่อประสานผู้ใช้เป็นหลัก โดยได้มีการพิจารณาเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์หลายตัวที่ใช้ในงานแยกฉากหลังที่มีจำหน่ายในท้องตลาด จากการวิเคราะห์ทำให้ได้รูปแบบการติดต่อผู้ใช้ที่นำมาพัฒนาเป็นต้นแบบ

ผลงานที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นบรรลุวัตถุประสงค์ทั้งสองข้อ และได้อุปกรณ์ต้นแบบที่สามารถใช้งานได้จริง โดยได้ทำการทดลองและวัดผลการทำงานทั้งทางด้านประสิทธิภาพเชิงเวลา โดยวัดเวลาที่ระบบใช้ในการประมวลผลภาพแต่ละเฟรม ซึ่งได้ระบบที่สามารถทำงานได้โดยใช้เวลาน้อยกว่า 12 มิลลิวินาทีต่อเฟรม ที่ความละเอียดระดับ Full HD ซึ่งเพียงพอต่อการกระจายภาพที่ความถี่ 60 เฟรม

ต่อวินาที และได้ ผลเชิงคุณภาพโดยการวัดค่า RMS Error ของค่าความทึบที่ได้จากขั้นตอนวิธีที่ได้พัฒนาขึ้น เทียบกับค่า RMS Error จากวิธีการอ้างอิง (Color Difference) ได้ผลเป็นขั้นตอนวิธีที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นให้ผลที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน

คณะผู้วิจัยเชื่อมั่นว่าต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะใช้งานจริงได้ แต่หากจะต่อยอดในเชิงพาณิชย์อย่างจริงจัง ยังต้องมียางานอีกหลายส่วนที่ต้องดำเนินการ เช่น การเลือกอุปกรณ์ประกอบเครื่องเพื่อลดต้นทุน และให้รองรับกับเทคโนโลยีที่เปลี่ยนไป การพัฒนาส่วนเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือระบบอื่นที่จะให้เห็นศักยภาพของตัวแยกฉากหลัง เช่นการเชื่อมต่อกับระบบสตูดิโอเสมือนจริง นอกจากนี้ยังมีส่วนงานด้านการตลาดที่ต้องได้รับการสนับสนุนอย่างเต็มที่ เพื่อจะได้สามารถแข่งขันกับผู้ผลิตที่มีฐานลูกค้าอยู่แล้ว

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก  
อรรถวิทย์ สุดแสง  
ธันวาคม 2560

วัตถุประสงค์หลักของโครงการนี้คือการพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก เพื่อบรรลุเป้าหมายนี้ กระบวนการแยกฉากหลังโดยพิจารณาค่าสีได้รับการพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของกระบวนการวิธี color difference ในการนี้ ข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้ความลึกได้ถูกนำมาใช้เพื่อตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นแบบอัตโนมัติ รวมทั้งมีการใช้งานตัวกรองแบบนำทางเพื่อเพิ่มคุณภาพของผลลัพธ์ของการแยกฉากหลัง ส่วนติดต่อผู้ใช้แบบกราฟฟิกได้รับการออกแบบและพัฒนาขึ้นจากการพิจารณาส่วนติดต่อผู้ใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ผลงานอุปกรณ์ต้นแบบผลลัพธ์สามารถทำงานแบบทันทีได้ที่ 60 เฟรมต่อวินาที สำหรับความละเอียดระดับ Full HD

## Appliance for Real Time Chroma Key Matting with Depth Sensor Augmentation

Attawith Sudsang

December 2017

The main purpose of this project is to develop a prototype of an appliance for real-time chromakey matting with depth sensor augmentation. To achieve the objective, a method for chromakey background subtraction is developed based on the color difference procedure. Depth sensor information is used for automatic parameter initialization and a guided filter is deployed to enhance the quality of the matting output. A graphical user interface is designed and implemented based on consideration of different user interfaces used by several products in the marketplace. The resulting prototype is able to achieve a real-time performance at 60 frames per second for Full HD resolution.

## สารบัญ

บทสรุปผู้บริหาร .....	3
บทคัดย่อภาษาไทย.....	5
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	6
สารบัญตาราง .....	10
สารบัญภาพ .....	11
บทที่ 1 บทนำ .....	14
ที่มาและความสำคัญของปัญหา .....	14
วัตถุประสงค์ของโครงการ .....	17
ขอบเขตของโครงการ.....	17
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
ปัญหาการแยกฉากหลัง .....	18
การแยกภาพโดยพิจารณาจากค่าสี (CHROMA KEY MATTING).....	19
วิธีการสุ่มตัวอย่างย่อยของสี (CHROMA SUBSAMPLING) .....	24
การกำจัดการเปื้อนของสี (DESPILL) .....	26
ตัวกรอง (FILTER).....	27
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย และภาพรวมของการทำงาน .....	29
บทที่ 4 การทดลองเปรียบเทียบวิธี COLOR DIFFERENCE และ CHROMA KEY .....	31
วัตถุประสงค์.....	31
สมมติฐาน.....	31
ตัวแปรต้น.....	32
ตัวแปรควบคุม .....	32
อุปกรณ์ .....	32
วิธีการทดลอง .....	33
ผลการทดลอง.....	33
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	36

<b>บทที่ 5 การปรับปรุงขั้นตอนวิธี</b> .....	<b>38</b>
ขั้นตอนวิธีพื้นฐาน .....	38
กระบวนการทำงานของขั้นตอนวิธี.....	43
ขั้นตอนวิธีการใช้ข้อมูลความลึก .....	45
การเทียบมาตรฐานกรอบของกล้องวัดความลึกและกล้องสี.....	45
การประมาณระนาบฉากหลังด้วยข้อมูลความลึก.....	46
การกำหนดค่าเริ่มต้นของค่า <i>tmin</i> และ <i>tmax</i> .....	46
ผังงาน.....	46
<b>บทที่ 6 การปรับปรุงค่าความทึบด้วยตัวกรองแบบนำทาง</b> .....	<b>48</b>
การใช้ตัวกรองแบบนำทาง (GUIDED FILTER) เพื่อให้ค่าความทึบมีความราบรื่น.....	49
นิยามปัญหา.....	49
การใช้ตัวกรองแบบนำทางเพื่อให้ค่าความทึบมีความราบเรียบ .....	49
กระบวนการทำงานของตัวกรองแบบนำทาง.....	52
<b>บทที่ 7 การทดลองวัดประสิทธิภาพ</b> .....	<b>54</b>
ข้อมูลตัวอย่างภาพวิดีโอที่ใช้เป็นข้อมูลทดสอบของระบบ .....	54
การดำเนินการเก็บข้อมูล .....	54
ปัจจัยในการจัดเก็บข้อมูล .....	57
การวัดผล.....	57
การทดลองเปรียบเทียบการใช้การประมาณความหนาแน่นเคอร์เนล .....	57
การทดลองเปรียบเทียบการใช้ตัวกรองนำทางมาปรับปรุงข้อมูล .....	64
<b>บทที่ 8 การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ</b> .....	<b>71</b>
เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับขั้นตอนวิธี .....	71
ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้.....	71
หน้าตาของโปรแกรมที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน .....	71
สรุปผลการเปรียบเทียบหน้าตาของโปรแกรมที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน .....	81
หน้าตาส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ของโปรแกรมที่นำเสนอ .....	82
สรุปการออกแบบส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ .....	89
<b>บทที่ 9 สรุปผลการวิจัย</b> .....	<b>90</b>
ข้อเสนอแนะ.....	92



อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

บรรณานุกรม.....	93
ภาคผนวก ก.....	97
ภาคผนวก ข.....	113
อภิธานศัพท์.....	114
การตั้งชื่อตัวแปร.....	114
ภาคผนวก ค.....	117
โพลเดอร์ VIDEO (BLACK SHIRT) .....	118
โพลเดอร์ VIDEO (WHITE SHIRT).....	118
ประวัติผู้วิจัย .....	120

## สารบัญตาราง

ตาราง 1 ผลการวัดเวลาการคำนวณ .....	34
ตาราง 2 การเปรียบเทียบผลระหว่างขั้นตอนวิธี COLOR DIFFERENCE และขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ.....	60
ตาราง 3 ผลการวัดเวลาการคำนวณ .....	61
ตาราง 4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีที่ไม่ผ่านตัวกรอง และขั้นตอนวิธีที่ผ่านตัวกรองที่ นำเสนอ.....	68
ตาราง 5 ผลการวัดเวลาการคำนวณ .....	68
ตาราง 6 ตารางเปรียบเทียบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของระบบแยกฉากหลังต่าง ๆ.....	80
ตาราง 7 สรุปการออกแบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้.....	89

## สารบัญภาพ

รูป 1 ตัวอย่างการใช้ฉากเสมือน.....	14
รูป 2 การแยกวัตถุออกจากฉากหลัง .....	15
รูป 3 แสดงปริภูมิสี YCBCR และตำแหน่งของสีหลัก .....	20
รูป 4 แสดงค่า KFG จะมีค่าน้อยที่สุดคือบริเวณเส้นแบ่งเขตพื้นที่.....	21
รูป 5 ค่าความเข้มของฉากที่นำมาซ้อน จะมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ที่เส้นแบ่งพื้นที่.....	21
รูป 6 การกำหนดบริเวณรอบสีหลักเพื่อแก้ปัญหาจุดรบกวน .....	22
รูป 7(A) ภาพที่พิจารณาค่าสีตามแนวสีแดง (B) ค่าสี RGB ตามแนวเส้นและการแยกส่วนเป็น FOREGROUND-BACKGROUND .....	22
รูป 8 (A) ภาพที่พิจารณาค่าสีตามแนวสีแดง (B) ค่าสี RGB ตามแนวเส้นและการแยกส่วนเป็น FOREGROUND-BACKGROUND .....	23
รูป 9 ตัวอย่างการแยกข้อมูลภาพออกเป็นความสว่างและค่าสี .....	24
รูป 10 วิธีการส่งข้อมูลแบบ SCANLINE .....	25
รูป 11 ตัวอย่างการส่งข้อมูลแบบใช้การสุ่มตัวอย่างย่อยของสี ช่องหนึ่งช่องต่อ 1 ข้อมูล .....	25
รูป 12 ขอบภาพที่ไม่เรียบซึ่งเกิดจากการบีบอัดเพิ่มเติม.....	26
รูป 13 ตัวอย่างการแก้การปนเปื้อนของสีเขียว .....	26
รูป 14 รูปข้อมูลนำเข้าอ้างอิงในการทดลอง .....	31
รูป 15 แผนภาพแสดงห้องที่ใช้ในการถ่ายทำ .....	33
รูป 16 ฮิสโตแกรมของรูปอ้างอิง .....	34
รูป 17 ตัวอย่างผลการทดลองจากวิธี COLOR DIFFERENCE.....	35
รูป 18 ผลการทดลองจากวิธี CHROMAKEY ในปริภูมิสี RGB.....	35
รูป 19 ผลการทดลองจากวิธี CHROMAKEY ในปริภูมิสี HSV.....	36
รูป 20 การประมาณความหนาแน่นคอร์เนล .....	39
รูป 21 ภาพข้อมูลขาเข้าตัวอย่างสำหรับขั้นตอนวิธี KDE .....	42
รูป 22 ผลลัพธ์การปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่ .....	42
รูป 23 ผังงานการแยกฉากหลัง .....	47
รูป 24 ผลลัพธ์ค่าที่บ่งแสงจากการใช้วิธี COLOR DIFFERENT ที่ปรับปรุงด้วยวิธี KERNEL DENSITY ESTIMATION ให้สังเกตจุดที่มีความผิดพลาดบริเวณเท้าของนักแสดง .....	48
รูป 25 ตัวกรองแบบนำทาง .....	52
รูป 26 ผังผังอุปกรณ์สำหรับการทดลอง .....	55
รูป 27 หลอดไฟติดเพดานแบบ LED และแผงไฟส่องสว่างด้านข้างแบบตั้งพื้น .....	55
รูป 28 โครงสร้างห้องถ่ายทำชั่วคราว และตำแหน่งการวางอุปกรณ์ .....	56

รูป 29 รูปการทดลองจากกล้อง VG-NEX30 ในกรณีใส่เสื้อสีดำ, ระยะห่างจากฉากหลัง 80 เซนติเมตร และสภาพแสงไม่สม่ำเสมอ (บน) ภาพจากกล้อง, (กลาง) ขั้นตอนวิธี COLOR DIFFERENCE, (ล่าง) ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ.....	62
รูป 30 รูปเฉพาะส่วนจากทดลองจากกล้อง URSA MINI 4.6K ในกรณีใส่เสื้อสีขาว, .....	63
รูป 31 รูปการทดลองจากกล้อง VG-NEX30 ในกรณีใส่เสื้อสีดำ, ระยะห่างจากฉากหลัง 160 เซนติเมตร และสภาพแสงไม่สม่ำเสมอ (บน) ภาพจากกล้อง, (กลาง) ขั้นตอนวิธีที่ไม่ผ่านตัวกรอง, (ล่าง) ขั้นตอนวิธีที่ผ่านตัวกรองที่นำเสนอ .....	70
รูปที่ 32 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ CHROMA KEY ของโปรแกรม OBS .....	72
รูปที่ 33 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ CHROMA KEY ของโปรแกรม vMIX.....	72
รูปที่ 34 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ CHROMA KEY ของโปรแกรม WIRECAST .....	73
รูปที่ 35 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ CHROMA KEY ของโปรแกรมความคม DATAVIDEO TVS-1200A.....	74
รูปที่ 36 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ CHROMA KEY ของโปรแกรมควบคุม BLACKMAGIC DESIGN ATEM 2 M/E PRODUCTION STUDIO 4K.....	75
รูปที่ 37 สวิตเซอร์ คอนโทรลเลอร์ ของ PANASONIC AV-HS6000 .....	76
รูปที่ 38 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ CHROMA KEY ของโปรแกรมความคม PANASONIC AV-HS6000 ....	76
รูปที่ 39 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ CHROMA KEY ของโปรแกรมความคม NEWTEK TRICASTER 8000 ..	77
รูปที่ 40 เครื่อง DATAVIDEO DVK-300HD .....	77
รูปที่ 41 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ CHROMA KEY ของโปรแกรมความคม DVK-300HD.....	78
รูปที่ 42 เครื่อง BLACKMAGIC DESIGN ULTIMATTE 12 ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น SMART REMOTE (บน) และส่วนที่เป็นเครื่องประมวลผล (ล่าง).....	78
รูปที่ 43 SMART REMOTE สำหรับควบคุมปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ BLACKMAGIC DESIGN ULTIMATTE 12.....	79
รูปที่ 44 การเลือกสีฉากหลังด้วย COLOR PICKER จากภาพโดยตรง หรือ จาก COLOR CHART ของ โปรแกรม vMIX .....	81
รูปที่ 45 การใช้ COLOR PICKER เพื่อเลือกสีฉากหลังจากภาพโดยตรง ของโปรแกรมความคม NEWTEK TRICASTER 8000 .....	81
รูปที่ 46 การปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วย TRACK BAR หรือ SPIN BOXES ของโปรแกรม OBS.....	81
รูปที่ 47 การทำ MASK ด้วย SPIN BOXES ของโปรแกรมควบคุม BLACKMAGIC DESIGN ATEM 2 M/E PRODUCTION STUDIO 4K.....	82
รูปที่ 48 การปรับค่าพารามิเตอร์ส่วนอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย TRACK BAR หรือ SPIN BOXES ของโปรแกรม ความคม DVK-300HD .....	82
รูปที่ 49 รูปเครื่องประมวลผลและอุปกรณ์อื่น ๆ ประกอบด้วยจอมอนิเตอร์, คีย์บอร์ดและเมาส์.....	83

รูปที่ 50 หน้าต่างหลักของโปรแกรมที่นำเสนอ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแสดงภาพ (กรอบสีส้ม) และส่วนปรับค่า (กรอบสีฟ้า).....	84
รูปที่ 51 GUI แบบ TAB สำหรับสับเปลี่ยนการแสดงผล.....	84
รูปที่ 52 ส่วนแสดงผลสามารถแสดงผลได้ทั้งหมด 5 แบบ ดังนี้ INPUT (บนซ้าย), CG (บนขวา) ALPHA (ล่างซ้าย), MATTING (ล่างกลาง) และ COMPOSE (ล่างขวา).....	85
รูปที่ 53 CHECKBOX ADVANCE สำหรับเปลี่ยนรูปแบบการตั้งค่า.....	86
รูปที่ 54 แสดงการใช้งาน GUI ประเภทต่าง ๆ ได้แก่ 1. COLOR PICKER, 2. TRACK BAR, 3. TEXT BOX และ 4. CHECKBOX และเปรียบเทียบส่วนปรับค่าแบบ DEFAULT และ ADVANCE.....	87
รูปที่ 55 แสดง GUI ของ COLOR PICKER ในการเลือกสี BACKGROUND (BG) และ FOREGROUND (FG).	88
รูปที่ 56 แสดงผลลัพธ์เริ่มต้น (ซ้าย), ผลลัพธ์เมื่อการเลือกสี BG เพิ่มบริเวณฉากหลัง (กลาง) และ แสดงการเลือกสี FG เพิ่มบริเวณฉากกลาง(ขวา).....	88
รูปที่ 57 แสดงการ CROP เริ่มจากซ้ายไปขวา เพื่อตัดภาพเก่าออกจากผลลัพธ์.....	88
รูป 58 ตัวอย่างภาพนำเข้าเมื่อใส่เสื้อสีดำ.....	98
รูป 59 ตัวอย่างภาพนำเข้าเมื่อใส่เสื้อสีเทา.....	99
รูป 60 ตัวอย่างภาพนำเข้าเมื่อใส่เสื้อสีขาว.....	100
รูป 61 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี COLOR DIFFERENCE เมื่อใส่เสื้อสีดำ.....	101
รูป 62 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี COLOR DIFFERENCE เมื่อใส่เสื้อสีเทา.....	102
รูป 63 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี COLOR DIFFERENCE เมื่อใส่เสื้อสีขาว.....	103
รูป 64 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี CHROMA KEY ในปริภูมิสี RGB เมื่อใส่เสื้อสีดำ.....	104
รูป 65 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี CHROMA KEY ในปริภูมิสี RGB เมื่อใส่เสื้อสีเทา.....	105
รูป 66 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี CHROMA KEY ในปริภูมิสี RGB เมื่อใส่เสื้อสีขาว.....	106
รูป 67 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี CHROMA KEY ในปริภูมิสี HSV เมื่อใส่เสื้อสีดำ.....	107
รูป 68 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี CHROMA KEY ในปริภูมิสี HSV เมื่อใส่เสื้อสีเทา.....	108
รูป 69 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี CHROMA KEY ในปริภูมิสี HSV เมื่อใส่เสื้อสีขาว.....	109
รูป 70 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี CHROMA KEY ในปริภูมิสี YUV เมื่อใส่เสื้อสีดำ.....	110
รูป 71 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี CHROMA KEY ในปริภูมิสี YUV เมื่อใส่เสื้อสีเทา.....	111
รูป 72 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี CHROMA KEY ในปริภูมิสี YUV เมื่อใส่เสื้อสีขาว.....	112

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ที่มาและความสำคัญของปัญหา

งานฉากเป็นองค์ประกอบสำคัญในการผลิตรายการโทรทัศน์ ปัจจุบันงานฉากมีทั้งการใช้งานฉากจริง และฉากเสมือนที่สร้างขึ้นโดยใช้คอมพิวเตอร์ หรือที่นิยมเรียกว่า CG การใช้งานฉากเสมือนนั้น ถึงแม้จะลดต้นทุนการสร้างฉากจริง และสามารถสร้างฉากที่มีลูกเล่นที่หลากหลายกว่า แต่ก็มีต้นทุนที่สูง ทั้งจากอุปกรณ์การผลิตที่ส่วนใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ค่าใช้จ่ายสำหรับลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์ และบุคลากรที่ต้องได้รับการฝึกฝนมาเป็นการเฉพาะ

ขั้นตอนหลักของการใช้ฉากเสมือนคือการใช้คอมพิวเตอร์แยกภาพนักแสดงออกจากภาพพื้นหลังซึ่งมีสีเขียว โดยการถ่ายทำต้องดำเนินการในห้องที่เตรียมไว้เป็นสีฟ้าหรือสีเขียว (ซึ่งทำให้นิยมเรียกขั้นตอนนี้ว่า เทคนิคกรีนสกรีน) ภาพนักแสดงที่แยกออกมาแล้วนั้นจะถูกนำไปวางซ้อนทับบนภาพฉากหลังที่คอมพิวเตอร์สร้างขึ้นดังตัวอย่างใน รูป 1 ด้านล่างนี้



รูป 1 ตัวอย่างการใช้ฉากเสมือน

การแยกภาพวัตถุออกจากฉากหลัง (Matting) คือการแยกส่วนของภาพที่ได้มาจากกล้องออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนฉากหลัง และส่วนวัตถุที่ต้องการ ส่วนฉากหลังนั้นจะถูกลบออก และแทนที่ด้วยภาพฉากที่ต้องการเข้าไปแทน รูป 1 แสดงถึงตัวอย่างการแยกภาพวัตถุออกจากฉากหลัง โดยรูปทางซ้ายคือรูปภาพต้นฉบับที่ได้จากกล้อง ส่วนรูปทางขวาคือผลลัพธ์ของการแยกส่วน โดยบริเวณสีขาวคือส่วนที่เป็นฉากหลัง ส่วนสีดำคือบริเวณที่เป็นวัตถุ



รูป 2 การแยกวัตถุออกจากฉากหลัง

วิธีการแยกวัตถุออกจากฉากหลังที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปนั้นคือการทำโครมาคีย์ (Chroma Keying) ซึ่งมีหลักการคือการใช้สีพื้น เช่น สีเขียว มาทำเป็นฉากหลังในพื้นที่ถ่ายทำ และกำหนดไว้ว่าบริเวณที่เป็นสีเขียว นั้นคือฉากหลัง คอมพิวเตอร์จะประมวลผลภาพตามข้อกำหนดนี้โดยการแยกส่วนที่เป็นฉากหลัง โดยการพิจารณาจากค่าของสี ถ้ามีค่าเป็นสีเขียวก็จะถือว่าเป็นฉากหลัง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้หลักการของการพิจารณาค่าสีนั้นจะดูเรียบง่าย ในการใช้งานจริงนั้นก็มีปัญหามากมาย ประเด็นสำคัญคือเรื่องของการปนเปื้อนของสีเขียว ในห้องที่มีการถ่ายทำรายการนั้นจะต้องมีแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งแสงเหล่านี้จะตกกระทบฉากหลังสีเขียวและสะท้อนแสงสีเขียวออกมา ทำให้แสงสีเขียวดังกล่าวตกกระทบไปยังวัตถุด้วยเช่นกัน ทำให้วัตถุต่าง ๆ ในฉากนั้น ถึงแม้โดยตัวเองจะไม่มีสีเขียว แต่ก็ยังมีสีเขียวปนเข้ามาอยู่ดี ทำให้ภาพที่ได้มีความไม่สมจริง มีสีสันทึบที่ผิดเพี้ยน และทำให้การแยกฉากหลังออกมานั้นทำได้ยากขึ้น นอกจากนี้ แหล่งกำเนิดแสงดังกล่าวยังทำให้เกิดเงาต่าง ๆ ในฉากด้วยเช่นกัน ทำให้ค่าของสีเขียวที่เป็นฉากหลังนั้นไม่ใช่สีเขียวเหมือนกันทั้งภาพ มีการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา (สังเกตได้จากบริเวณพื้นของรูป 2 จะเห็นว่าบริเวณที่ถูกเงาบังนั้นจะมีความเขียวแตกต่างจากบริเวณที่ไม่ถูกบัง แต่ก็ยังเป็นสีเขียวอยู่ ซึ่งผลลัพธ์ของการพิจารณาค่าสีจะได้ผลลัพธ์ออกมาว่ามีความไม่แน่นอนว่าเป็นฉากหลังหรือว่าเป็นวัตถุ ซึ่งสังเกตได้จากสีในภาพผลลัพธ์ไม่ใช่สีขาวหรือสีดำ แต่เป็นสีเทา) ขั้นตอนวิธีสำหรับการทำโครมาคีย์จึงต้องคำนึงถึงประเด็นเหล่านี้

งานโครมาคีย์ที่ใช้ในการผลิตรายการโทรทัศน์ส่วนใหญ่นั้นใช้อุปกรณ์ (appliance) สำหรับทำโครมาคีย์โดยเฉพาะ ซึ่งมีราคาตั้งแต่หลักแสนไปจนถึงหลักล้านบาท (เช่น ultimate 11 โดย [www.ultimatte.com](http://www.ultimatte.com)) ถึงแม้จะมีโปรแกรมสำหรับทำโครมาคีย์ที่ใช้คอมพิวเตอร์ทั่วไปในการทำงานซึ่งมีราคาต่ำกว่ามาก แต่ด้วยคุณภาพของผลลัพธ์ที่ด้อยกว่า และข้อจำกัดของการเชื่อมต่อสำหรับงานโทรทัศน์ ทำให้ทางเลือกหลักโดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตเพื่อออกอากาศสด จึงเป็นการใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูงดังกล่าว อุปกรณ์เหล่านี้ใช้กระบวนการโครมาคีย์ที่แต่ละบริษัทพัฒนาขึ้นเอง ซึ่งไม่มีการเปิดเผยในแวดวงวิจัยที่เกี่ยวข้อง ข้อเสนอของโครงการนี้มีเป้าหมายหลักคือการพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์สำหรับทำโครมาคีย์ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อทดแทนอุปกรณ์ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

เพื่อให้ได้คุณภาพที่แข่งขันกับอุปกรณ์โครมาคีย์ที่มีจำหน่ายอยู่แล้ว คณะผู้พัฒนามีแนวทางที่จะแก้ปัญหาการแยกวัตถุจากฉากหลังโดยใช้ข้อมูลเสริมที่สามารถระบุความเป็นฉากหลังได้โดยตรง ทั้งนี้เพราะการใช้ข้อมูลสีอย่างเดียวอาจไม่สามารถให้ความแม่นยำสมบูรณ์ เช่นกรณีที่นักแสดงมีเครื่องแต่งกายที่บางส่วนเป็นสีเดียวกับฉากหลัง ซึ่งหากมีการช่วยระบุเพิ่มเติมว่าจุดใดบ้างที่น่าเชื่อว่าไม่ใช่พื้นหลังอย่างแน่นอน ก็จะมีประโยชน์มาก การระบุข้อมูลดังกล่าวอาจทำได้โดยให้ผู้ใช้งานเป็นคนกำหนดจุดในภาพว่าจุดใดที่ไม่ใช่ฉากหลัง และโปรแกรมจะทำการนำเอาข้อมูลสีของจุดที่ไม่ใช่ฉากหลังมาช่วยคิดคำนวณด้วย ข้อเสียของวิธีการดังกล่าวก็คือจำเป็นที่จะต้องอาศัยผู้ใช้งานมาเป็นผู้ให้ข้อมูล โครงการนี้จะนำเสนอแนวทางใหม่ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการตั้งสมมติฐานเพิ่มเติมว่าสิ่งใดที่มีตำแหน่งอยู่บริเวณเดียวกับฉากหลังนั้นคือวัตถุที่เราต้องการ การนำเอาสมมติฐานดังกล่าวมาช่วยในการคำนวณด้วยนั้นจะทำให้ขั้นตอนวิธีการพิจารณาค่าสีมีข้อมูลเพิ่มเติมว่าจุดสีแบบใดที่ไม่ใช่ฉากหลังอย่างแน่นอน และสามารถนำเอาข้อมูลดังกล่าวมาช่วยในการปรับแต่งผลลัพธ์ได้

จากสมมติฐานใหม่นี้ เราจำเป็นที่จะต้องทราบถึงตำแหน่งในสามมิติของสิ่งของต่าง ๆ ที่อยู่ในสถานที่ถ่ายทำรายการ รวมถึงตำแหน่งของฉากหลังสีเขียวด้วย การวัดตำแหน่งของสิ่งของต่าง ๆ นั้นสามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์รับรู้ความลึก (depth sensor) ซึ่งเคยมีราคาแพง อย่างไรก็ตามในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีอุปกรณ์รับรู้ความลึก แบบใหม่เกิดขึ้นมากมาย ตัวอย่างเช่น Kinect ของบริษัท Microsoft หรือ DepthSense ของบริษัท SoftKinetics ซึ่งอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองตัวนี้มีราคาต่ำมากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์รุ่นก่อน ๆ และมีความแม่นยำเพียงพอต่อการใช้งาน โครงการนี้มีแนวคิดหลักเป็นการนำเอาอุปกรณ์รับรู้ความลึกดังกล่าวมาใช้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ได้ตามสมมติฐานที่ได้กำหนดไว้ ประโยชน์ของข้อมูลความลึกนี้นอกจากจะนำไปใช้ในการแยกวัตถุจากฉากหลังเป็นหลัก ผู้พัฒนามีความเชื่อว่าจะสามารถใช้ประโยชน์อื่นได้อีก เช่นการจากข้อมูลความลึกว่าส่วนใดของวัตถุจะได้รับการปนเปื้อนของสีเขียวจากฉากหลังบ้าง มากน้อยเท่าไร เพื่อที่จะได้ทำการแก้ไข (despill) ได้เหมาะสม นอกจากนี้การมีข้อมูลความลึกที่สะท้อนถึงรูปทรงของวัตถุทำให้สามารถจำลองแสงเงาเทียมและระบายลงบนภาพวัตถุได้ ซึ่งประโยชน์เพิ่มเติมที่กล่าวมานี้ไม่สามารถเป็นไปได้ด้วยการทำโครมาคีย์แบบเดิมๆ ที่ไม่มีข้อมูลความลึกเสริม

ปัจจุบัน มีอุปกรณ์ (Appliance) สำหรับการแยกภาพวัตถุออกจากฉากหลังโดยใช้วิธีการพิจารณาค่าสีอยู่ในท้องตลาดมากมาย โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีราคาสูงมาก (กว่าหนึ่งล้านบาท) และไม่ได้มีการใช้สมมติฐานที่ได้กล่าวไว้แล้ว ผู้ใช้งานจำเป็นที่จะต้องมาทำการปรับแต่งค่าต่าง ๆ ก่อนใช้งานอยู่เสมอ ทำให้การใช้นั้นมีความซับซ้อนและเสียเวลา นอกจากนี้ อุปกรณ์เหล่านั้น ถูกพัฒนาขึ้นโดยผู้ผลิตจากต่างประเทศ การที่ผู้ผลิตรายการต่าง ๆ นั้นต้องจัดหาอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้นั้นเป็นการสูญเสียเงินตราออกไปยังต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ทั้งค่าอุปกรณ์และค่าซ่อมบำรุง โครงการนี้ มีเป้าหมายคือการพัฒนาขั้นตอนวิธีการพิจารณาค่าสีและพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ (prototype appliance) สำหรับการการแยกภาพวัตถุออกจากฉากหลังโดยใช้ขั้นตอนวิธีดังกล่าวร่วมกับสมมติฐานใหม่ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น องค์กรความรู้ของการพัฒนาขั้นตอนวิธีแบบใหม่นี้ ร่วมกับการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบซึ่งต้องใช้ทั้งความรู้ทางทฤษฎีและประสบการณ์ภาคสนามนั้นจะสามารถนำไปต่อ



ยอดเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความต้องการในตลาดสูง และสามารถใช้งานได้จริง ซึ่งจะเป็นการเพิ่มศักยภาพของผู้ผลิตรายการในประเทศ และลดการนำเข้าพร้อมทั้งก่อให้เกิดธุรกิจใหม่ ๆ ได้ในอนาคต

### วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับการแยกภาพวัตถุออกจากฉากหลัง (Matting) โดยใช้วิธีการพิจารณาค่าสี (Chroma Keying) ร่วมกับอุปกรณ์รับรู้ความลึก
2. เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการแยกภาพวัตถุออกจากฉากหลังโดยใช้วิธีการพิจารณาค่าสี ซึ่งสามารถทำงานได้อย่างสะดวก

### ขอบเขตของโครงการ

#### ขอบเขตสำหรับขั้นตอนวิธี

1. ขั้นตอนวิธีดังกล่าวจะต้องสามารถทำงานได้ในแบบ real time โดยมีค่าหน่วงของการทำงาน (delay) ไม่มากกว่า 250 ms เมื่อทำงานบนข้อมูลที่ความละเอียดระดับ 1080p ที่ 50Hz
2. ขั้นตอนวิธีดังกล่าวจะต้องถูกการทดสอบขั้นตอนวิธีดังกล่าวภายใต้สภาพแสงที่แตกต่างกัน และ มีการทดสอบโดยใช้ข้อมูลนำเข้าที่เกิดจากกล้องวิดีโอที่มีคุณภาพต่างกัน โดยคุณภาพดูจากวิธีการสุ่มตัวอย่างย่อยของสี (Chroma Subsampling) แบบต่าง ๆ
3. ขั้นตอนวิธีดังกล่าวสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการแยกค่าสีได้อย่างอัตโนมัติ

#### ขอบเขตของอุปกรณ์ต้นแบบ

1. อุปกรณ์ดังกล่าวจะต้องสามารถทำงานได้ตามขั้นตอนวิธีที่เป็นผลลัพธ์จากการวิจัยในวัตถุประสงค์ข้อที่ 1
2. อุปกรณ์จะต้องสามารถรับสัญญาณภาพและส่งออกสัญญาณภาพผ่านทางมาตรฐาน SDI แบบ HD/SD
3. อุปกรณ์จะต้องสามารถทำงานได้ด้วยตัวเองเพียงการเปิดปิดเครื่อง โดยไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมจากภายนอก
4. อุปกรณ์จะต้องสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการใช้งานได้โดยผ่านทางโปรแกรมควบคุม

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

อุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถนำไปพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้งานจริงได้โดยภาคเอกชน เมื่อผลิตภัณฑ์ดังกล่าวออกสู่ตลาด จะทำให้ผู้ผลิตรายการโทรทัศน์, ผู้ผลิตภาพยนตร์ มีทางเลือกมากขึ้นในอุปกรณ์ที่จำเป็น โดยอุปกรณ์นี้จะใช้งานได้สะดวก และได้ผลลัพธ์ที่ดีมากขึ้น ในราคาที่ถูกลง พร้อมทั้งได้รับการบริการที่ขึ้น สำหรับภาคเอกชนเองนั้น การพัฒนาอุปกรณ์ดังกล่าวให้เป็นผลิตภัณฑ์และนำไปขายได้ย่อมสร้างธุรกิจใหม่ให้กับเอกชน ลดการนำเข้า สร้างกำไรและผลประโยชน์ที่ดี

## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการแยกวัตถุออกจากฉากหลังที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปนั้นคือการทำโครมาคีย์ (Chroma Keying) ซึ่งมีหลักการคือการใช้สีพื้น เช่น สีเขียว มาทำเป็นฉากหลังในพื้นที่ถ่ายทำ และกำหนดไว้ว่าบริเวณที่เป็นสีเขียว นั้นคือฉากหลัง คอมพิวเตอร์จะประมวลผลภาพตามข้อกำหนดนี้โดยการแยกส่วนที่เป็นฉากหลัง โดยการพิจารณาจากค่าของสี ถ้ามีค่าเป็นสีเขียวก็จะถือว่าเป็นฉากหลัง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้หลักการของการพิจารณาค่าสีนั้นจะดูเรียบง่าย ในการใช้งานจริงนั้นก็มีปัญหามากมาย ประเด็นสำคัญคือเรื่องของการปนเปื้อนของสีเขียว ในห้องที่มีการถ่ายทำรายการนั้นจะต้องมีแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งแสงเหล่านี้จะตกกระทบฉากหลังสีเขียวและสะท้อนแสงสีเขียวออกมา ทำให้แสงสีเขียวดังกล่าวตกกระทบไปยังวัตถุด้วยเช่นกัน ทำให้วัตถุต่าง ๆ ในฉากนั้น ถึงแม้โดยตัวเองจะไม่มีสีเขียว แต่ก็ยังมีสีเขียวปนเข้ามาอยู่ดี ทำให้ภาพที่ได้มีความไม่สมจริง มีสีที่ผิดเพี้ยน และทำให้การแยกฉากหลังออกมานั้นทำได้ยากขึ้น นอกจากนี้ แหล่งกำเนิดแสงดังกล่าวยังทำให้เกิดเงาต่าง ๆ ในฉากด้วยเช่นกัน ทำให้ค่าของสีเขียวที่เป็นฉากหลังนั้นไม่ใช่สีเขียวเหมือนกันทั้งภาพ มีการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา (สังเกตได้จากบริเวณพื้นของรูปที่ 2 จะเห็นว่าบริเวณที่ถูกเงาบังนั้นจะมีความเขียวแตกต่างจากบริเวณที่ไม่ถูกบัง แต่ก็ยังเป็นสีเขียวอยู่ ซึ่งผลลัพธ์ของการพิจารณาค่าสีจะได้ผลลัพธ์ออกมาว่ามีความไม่แน่นอนว่าเป็นฉากหลังหรือว่าเป็นวัตถุ ซึ่งสังเกตได้จากสีในภาพผลลัพธ์ไม่ใช่สีขาวหรือสีดำ แต่เป็นสีเทา) ขั้นตอนวิธีสำหรับการทำโครมาคีย์จึงต้องคำนึงถึงประเด็นเหล่านี้

งานโครมาคีย์ที่ใช้ในการผลิตรายการโทรทัศน์ส่วนใหญ่นั้นใช้อุปกรณ์ (appliance) สำหรับทำโครมาคีย์โดยเฉพาะ ซึ่งมีราคาตั้งแต่หลักแสนไปจนถึงหลักล้านบาท (เช่น ultimate 11 โดย [www.ultimatte.com](http://www.ultimatte.com)) ถึงแม้จะมีโปรแกรมสำหรับทำโครมาคีย์ที่ใช้คอมพิวเตอร์ทั่วไปในการทำงานซึ่งมีราคาต่ำกว่ามาก แต่ด้วยคุณภาพของผลลัพธ์ที่ต่ำกว่า และข้อจำกัดของการเชื่อมต่อสำหรับงานโทรทัศน์ ทำให้ทางเลือกหลักโดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตเพื่อออกอากาศสด จึงเป็นการใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูงดังกล่าว อุปกรณ์เหล่านี้ใช้กระบวนการโครมาคีย์ที่แต่ละบริษัทพัฒนาขึ้นเอง ซึ่งไม่มีการเปิดเผยในแวดวงวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### ปัญหาการแยกฉากหลัง

การแยกฉากหลังนั้นเป็นส่วนหนึ่งของปัญหา “การคำนวณหาค่าความโปร่งใส” งานวิจัยในหมวดนี้ มักจะถูกเรียกว่า Alpha matting คือการหาค่าความทึบจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่จุดนั้นๆ กับค่าสีที่เป็นพื้นหน้าและค่าสีที่เป็นพื้นหลัง โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้คือ สีที่จุดนั้นๆ เกิดจากผลรวมเชิงเส้นของสีพื้นหน้าและสีพื้นหลัง

$$C_i = \alpha_i F_i + (1 - \alpha_i) B_i$$

เมื่อ  $F_i$  และ  $B_i$  คือค่าสีพื้นหน้าและค่าสีพื้นหลังสำหรับจุดนั้นๆ จากสมการนี้จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่ไม่รู้ค่าคือ  $\alpha_i$ ,  $F_i$  และ  $B_i$  ซึ่งจำนวนสมการน้อยกว่าจำนวนตัวแปรมาก ดังนั้นจึงต้องเพิ่มข้อจำกัดด้วย

ข้อมูลบางส่วนนั้นคือ ส่วนที่เป็นพื้นหน้า ส่วนที่เป็นพื้นหลังคือส่วนที่ระบุ (known) และส่วนที่ไม่ระบุ (unknown) หรือเรียกรวมว่าไตรแมพ (trimap)

ในงานวิจัยชิ้นนี้ การแยกฉากหลังนั้นจะใช้ข้อมูลเริ่มต้นคือการที่เราทราบว่าฉากหลังนั้นเป็นสีเขียว โดยขั้นตอนวิธีในการแยกฉากหลังจะคำนวณค่า  $\alpha_i$  ที่เหมาะสมในแต่ละจุดภาพ เมื่อเราได้ค่า  $\alpha_i$  มาแล้ว เราจะสามารถนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการสร้างภาพผลลัพธ์ที่ต้องการได้ จาก  $F_i$  ซึ่งก็คือภาพข้อมูลนำเข้าจากกล้อง และใช้ภาพฉากหลังที่ต้องการซ้อนเข้าไป เป็นค่า  $B_i$  แทน

### การแยกภาพโดยพิจารณาจากค่าสี (CHROMA KEY MATTING)

การพิจารณาค่าสีคือการแยกภาพของวัตถุเบื้องหน้าที่สนใจออกจากฉากหลัง และนำภาพที่ได้ไปรวมเข้ากับภาพกราฟิกที่เตรียมไว้ ซึ่งปัญหาหลักสองประการที่ต้องให้ความสนใจในการพิจารณาค่าสี คือ การลบรอยหยักบริเวณขอบเพื่อให้กลืนเข้ากับภาพที่นำมารวมเข้าด้วยกันพร้อมทั้งการแก้การเบือนของสี และปัญหาการจัดการกับสีที่มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งมีผู้เสนอวิธีแก้ไขปัญหาไว้หลากหลายวิธี เช่น การใช้สีหลักแบบเชิงเส้น (Linear keying) [Ultimate02] ใช้ในอุปกรณ์ Ultimate Memory Head ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์, การคำนวณจากรูปทรงแปดเหลี่ยมในปริภูมิสีแบบ RGB [Mishima93], การคำนวณโดยอาศัยข้อมูลจากจุดที่อยู่ใกล้เคียง แล้ววิเคราะห์โดยใช้ความน่าจะเป็นแบบของเบย์ (Bayesian matting) [Chuang01] หรือวิธีของ Ashikhmin [Ashikhmin97] ที่ใช้การวิเคราะห์แบบทีละจุดอย่างอิสระต่อกันบนปริภูมิสีแบบ YCbCr

การพิจารณาเลือกรูปวิธีที่จะนำมาใช้กับงานวิจัยนี้ นอกจากจะดูจากคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้ ยังต้องคำนึงถึงความเร็วในการทำงานด้วย [Wang07] ได้แบ่งวิธีการทำการพิจารณาค่าสี ออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ คือ sampling based และ affinity โดย sampling-based จะทำงาน โดยอาศัยข้อมูลที่เรียกว่า tri-map ในการแบ่งพื้นที่ในภาพออกเป็นวัตถุที่แน่นอน, ฉากหลังที่แน่นอน และบริเวณที่ไม่ทราบ หลังจากนั้นจะประมาณส่วนที่ไม่ทราบ จากกลุ่มตัวอย่างที่ได้จากกลุ่มวัตถุ และกลุ่มฉากหลัง การทำ sampling-based จะทำได้ดีเมื่อฉากหลังมีความซับซ้อนน้อย เช่น พื้นหลังเป็นฉากสีเขียว ในขณะที่แบบ affinity จะทำการประมาณส่วนที่ไม่ทราบ โดยการสังเกตและหารูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างจุดภาพใดๆ กับบริเวณรอบเล็กรอบๆ ([Chuang01] และ [Levin08]) แม้วิธีนี้จะสามารถให้ผลลัพธ์ที่ออกมาดูกลมกลืน แต่ก็ไม่สามารถจัดการกับภาพที่มีส่วนประกอบที่มีลักษณะยาวได้

ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่พยายามผนวกรวม matting ทั้งสองกลุ่มเข้าด้วยกัน เช่น [Wang07] และ [Gastel10] หากกลุ่มตัวอย่างจากลากเส้นออกไปในทิศทางต่างๆ และกลุ่มตัวอย่างจะได้จากจุดสีของวัตถุและจุดสีของฉากหลัง ที่ใกล้ที่สุดของทุกเส้น โดย [Shahrian13] ได้ปรับปรุงวิธีการจาก [Gastel10] โดยเพิ่มการถ่วงน้ำหนักจากที่ได้จากการนำลักษณะเด่น (feature) ของสีและพื้นผิว (texture) มาคำนวณ

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

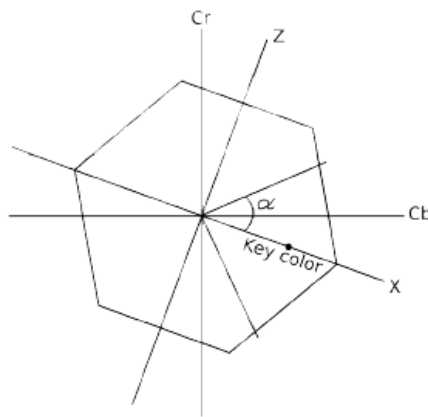
ขั้นตอนทั่วไปของการพิจารณาค่าสี ทำได้โดยการกำหนดสีหลักซึ่งเป็นสีที่ต้องการจะลบทิ้ง และทำการคำนวณค่าความโปร่งใสของผลลัพธ์ให้สัมพันธ์กับความต่างกับสีหลักนี้ ซึ่งการคำนวณค่าความต่างนี้จะแตกต่างกันไปตามแต่ละขั้นตอนวิธี รวมถึงจะเกี่ยวข้องกับปริภูมิสีที่เลือกใช้ด้วย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างการแยกค่าสีแบบต่าง ๆ ที่ได้เคยมีมาแล้วในอดีต

### การแยกค่าสีในปริภูมิ YCbCr ตามแบบของ Ashikhmin

วิธีพิจารณาค่าสีตามแบบของ Ashikhmin เป็นพื้นฐาน เป็นวิธีการที่ให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพดีพอสมควร การทำงานของวิธีพิจารณาค่าสีตามแบบของ Ashikhmin นั้นจะทำงานบนปริภูมิสีแบบ YCbCr [Shapiro01] และการทำงานบนปริภูมิสี YCbCr ยังมีข้อได้เปรียบคือ เป็นปริภูมิสีที่อุปกรณ์ถ่ายภาพใช้ส่งผ่านข้อมูลมายังคอมพิวเตอร์อยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องมีการแปลงค่าให้อยู่ในปริภูมิสีอื่นอีก นอกจากนี้การพิจารณาค่าสีของแต่ละจุดจะทำแยกจากกันแบบอิสระ ทำให้สามารถเพิ่มความเร็วในการทำงานด้วยการประมวลผลแบบขนานได้ง่าย

สำหรับขั้นตอนวิธีนี้ ใช้การกำหนดมุมอัลฟา (alpha) ในปริภูมิสีแบบ YCbCr เป็นตัวประมาณค่าจากสีที่เลือกมาใช้เป็นสีหลัก โดยพิจารณาจากตำแหน่งของสีหลักในแกนพิกัดของ Cb และ Cr หมุนเป็นพิกัดในแนวแกน XZ โดยให้สีหลักตกลงบนแกน X พอดี แล้วพิจารณาจากพื้นที่ที่อยู่ในขอบเขตของมุมที่ใช้ในการประมาณ (ปกติจะใช้ค่ามุมไม่เกิน 90 องศา) เส้นที่ทำให้เกิดมุมอัลฟานี้ จะแบ่งปริภูมิสีออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือส่วนที่ภาพเบื้องหน้า ไม่ถูกแทนที่ด้วยฉากหลังและส่วนที่ภาพเบื้องหน้าถูกแทนที่ด้วยฉากหลังในอัตราส่วนต่างๆ ดังในรูป 3



รูป 3 แสดงปริภูมิสี YCbCr และตำแหน่งของสีหลัก

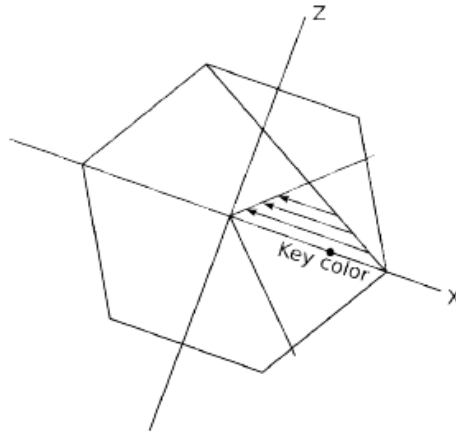
การหาสัดส่วนของการที่ภาพเบื้องหน้าถูกแทนที่ด้วยฉากหลัง ทำได้โดยการใช้การเปรียบเทียบโดยให้สีที่อยู่บนแกน X มีการถูกแทนที่มากที่สุด คือวัตถุด้านหน้าจะถูกแทนที่ด้วยฉากหลังโดยสมบูรณ์ และสัดส่วนการแทนที่จะลดหลั่นลงไป ตามสมการ

$$Kfg = X - \text{abs}(Z) / \tan(\alpha)$$

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

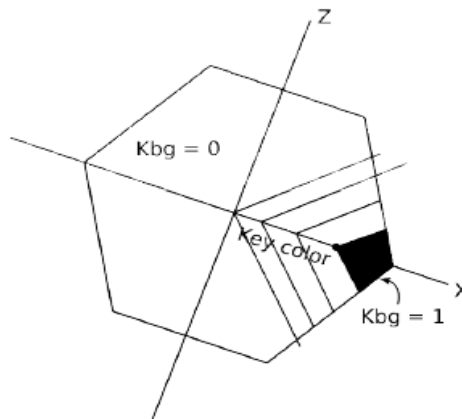
ซึ่งจะได้ว่า สีที่มีค่าใกล้เคียงกับสีหลักจะมีค่า Kfg สูง ทำให้มีสัดส่วนการแทนที่สูงไปด้วย ดังปริภูมิสีใน

รูป 4



รูป 4 แสดงค่า Kfg จะมีค่าน้อยที่สุดคือบริเวณเส้นแบ่งเขตพื้นที่

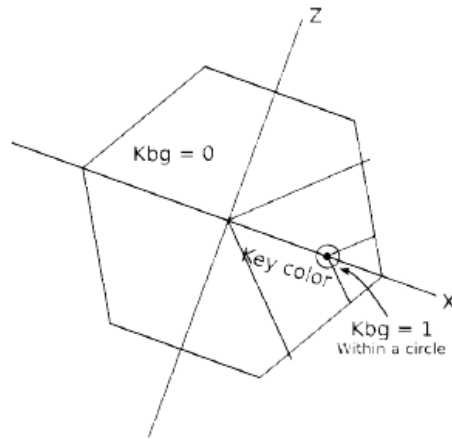
การหาความเข้มของฉากที่นำมาซ้อนในแต่ละจุด หาได้โดยกำหนดให้จุดสีหลักมีค่าความเข้มสูงสุด คือ 1 ( $K_{bg} = 1$ ) และลดลงเรื่อยๆ จนถึงบริเวณขอบของเส้นแบ่งพื้นที่ ให้มีค่าความเข้มเป็น 0 ( $K_{bg} = 0$ ) ถ้าหากสีของฉากที่นำมาซ้อนมีความใกล้เคียงกับสีหลักมาก จะทำให้บริเวณนั้นมีสัดส่วนของภาพฉากที่นำมาซ้อนมากกว่าภาพวัตถุด้านหน้า ดังปริภูมิสีในรูป 5 และ รูป 6



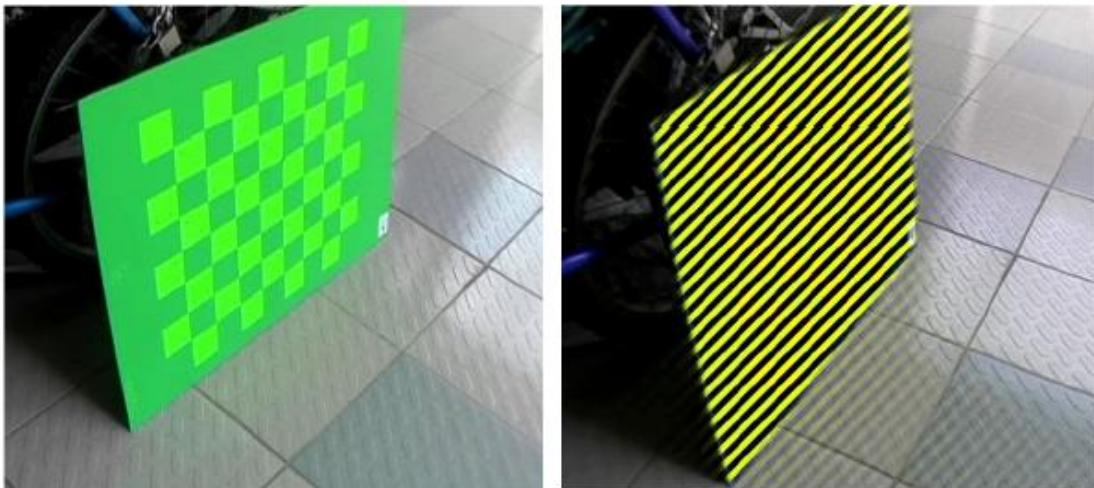
รูป 5 ค่าความเข้มของฉากที่นำมาซ้อน จะมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ที่เส้นแบ่งพื้นที่

ในการใช้งานจริง ภาพที่ได้จากกล้องอาจมีจุดรบกวน (noise) โดยมีสาเหตุจากภาพที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงของสีตลอดเวลา ถึงแม้จะมีความเปลี่ยนแปลงน้อย แต่ก็อาจมีผลกับผลลัพธ์ที่ได้ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้ จะใช้วิธีกำหนดบริเวณรอบสีหลักในปริภูมิสี และให้ภายในบริเวณนั้นมีความเข้มในการนำฉากมาซ้อนเท่ากับสีหลัก ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงของภาพเล็กน้อย ไม่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์มาก ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีนี้ ดูได้จากรูป 7

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก



รูป 6 การกำหนดบริเวณรอบสีหลักเพื่อแก้ปัญหาจุดรบกวน



รูป 7(a) ภาพที่พิจารณาค่าสีตามแนวเส้นแดง (b) ค่าสี rgb ตามแนวเส้นและการแยกส่วนเป็น foreground-background

ในการใช้งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวกับการแยกภาพ (matting) ในปัจจุบันมักจะเน้นที่การแก้ปัญหาในกรณีทั่วไป เช่นการยอมให้พื้นหลังไม่ต้องเป็นสีเดียว ให้เป็นภาพใดๆ ก็ได้ [Wang07] หรือการยอมให้มีการเคลื่อนกล้องจนเกิดความไม่ชัดของภาพ (blurring) เป็นอย่างมาก [Myeong14] หรือแม้แต่การยอมให้มีความไม่ชัดจากการโฟกัสภาพที่ไม่ถูกต้อง [Loktyushin11] กรรมวิธีที่คิดค้นขึ้นภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ ถึงแม้ว่าจะมีความคล่องตัวทำให้ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง แต่ผลลัพธ์ที่ได้มักมีคุณภาพไม่ดีพอสำหรับใช้ในการผลิตรายการหรืออาจไม่สามารถให้ผลลัพธ์แบบทันทีตามต้องการ

### วิธีการค่าความต่างของสี (Color Difference)

เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพยอมรับได้ ในโครงการนี้จึงพิจารณาขั้นตอนวิธีสำหรับการทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ด้วย (ตามสภาพแวดล้อมจริงของห้องอัตรายการ) โดยหลักใหญ่คือการใช้พื้นหลังเป็นระนาบเรียบสีเดียว (อาจยอมให้มีความเข้มอ่อนต่างกันได้) และการจัดแสงที่ทั่วถึง วิธีที่เราจะเลือกพิจารณาคือการแยกภาพจากความต่างสี (color difference matting) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในทางปฏิบัติ (Wright, 2010) ขั้นตอนวิธีที่ได้มีการสรุปไว้ใน [Wright10] ซึ่งได้แก่ขั้นตอนวิธี ChromaKey และ ColorDifference

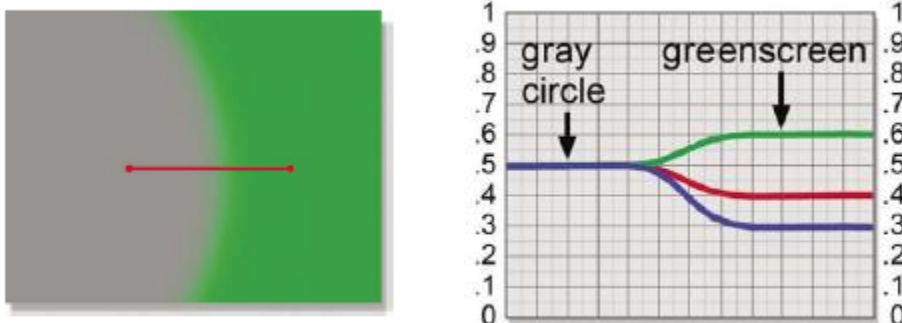
ซึ่งสองวิธีนี้ถือเป็นพื้นฐานของซอฟต์แวร์และระบบตัดฉากเขียวที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น Keylight ในโปรแกรม After Effects ระบบ Primatte หรือ ระบบ Ultimatte เป็นต้น สองวิธีนี้ใช้การคำนวณที่ต่างกันคือ Chromakey ใช้การหีบสีเขียวมาหนึ่งสีเป็นสีอ้างอิง ค่าความทึบ (alpha) ถูกคำนวณจากระยะห่างระหว่างค่าสีที่จุดนั้นๆ กับสีอ้างอิงในปริภูมิสีใดๆ ค่าสีที่ใกล้เคียงสีอ้างอิงมากๆ จะมีค่าความทึบต่ำหรือเป็นสีฉากหลังนั่นเอง สำหรับจุดที่มีค่าสีต่างจากสีอ้างอิงจะมีค่าความทึบสูงหรือเป็นวัตถุด้านหน้า

$$\alpha_i \propto \|C_r - C_i\|$$

เมื่อ  $\alpha_i$  คือค่าความทึบ  $C_r$  คือค่าสีอ้างอิงและ  $C_i$  คือค่าสีที่จุดนั้นๆ

ในขณะที่ Color difference ใช้หลักการของปริภูมิสี RGB โดยมองที่ความต่างระหว่างสีเขียวกับค่าสีที่มากที่สุดระหว่างสีแดงและสีน้ำเงิน ค่าความต่างของช่องสีแปรผกผันกับค่าความทึบ นั่นคือความต่างมากสีเขียวมากกว่ามากควรที่จะถูกจัดเป็นฉากหลัง ความต่างน้อยสีเขียวไม่โดดเด่นควรที่จะถูกจัดเป็นวัตถุด้านหน้า

โดยวิธีนี้จะคำนวณค่าสีใน rgb color space โดยมีหลักการพื้นฐานคือการพิจารณาให้จุดที่มีค่าสีเขียว (ซึ่งเป็นสีฉากหลัง) สูงกว่าค่าสีแดงและค่าสีน้ำเงิน ตามอัตราส่วนที่ตั้งไว้ว่าเป็นจุด background วิธีแยกภาพจากความต่างสีนี้ ถึงแม้จะทำงานได้รวดเร็ว และให้คุณภาพผลลัพธ์ในเกณฑ์ดี แต่หากจะทำให้มีคุณภาพดีเยี่ยมขึ้น ต้องอาศัยการเทคนิคเพิ่มเติมอีกมาก ซึ่งไม่เป็นที่เปิดเผยในวงการวิจัย บางส่วนเป็นความลับทางการค้าของผู้ผลิตอุปกรณ์แยกภาพ บางส่วนเป็นเทคนิคที่รู้จักกันในหมู่นักปฏิบัติ



รูป 8 (a) ภาพที่พิจารณาค่าสีตามแนวเส้นแดง (b) ค่าสี rgb ตามแนวเส้นและการแยกส่วนเป็น foreground-background

จากรูป 8 ขั้นตอนวิธี Color difference ใช้หลักการของปริภูมิสี RGB โดยมองที่ความต่างระหว่างสี เชี่ยวกับค่าสีที่มากที่สุดระหว่างสีแดงและสีน้ำเงิน ค่าความต่างของช่องสีแดงผกผันกับค่าความทึบ นั่นคือ ความต่างมากสีเขียวมากกว่ามากควรที่จะถูกจัดเป็นฉากหลัง ความต่างน้อยสีเขียวไม่โดดเด่นควรที่จะถูกจัดเป็นวัตถุด้านหน้า โดยมีสมการสำหรับคำนวณค่า  $\alpha_i$  ดังต่อไปนี้ เมื่อให้  $C_{i,R}$   $C_{i,G}$  และ  $C_{i,B}$  คือค่าสีแดง, เขียว, น้ำเงินของจุดสี  $i$

$$\alpha_i \propto 1 - (C_{i,G} - \max(C_{i,R}, C_{i,B}))$$

### วิธีการสุ่มตัวอย่างย่อยของสี (CHROMA SUBSAMPLING)

จะเห็นได้ว่าค่าของสีในรูปนั้นมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลลัพธ์ในการพิจารณาค่าสี การที่จะได้ผลลัพธ์ที่ดีนั้น เราจะต้องเข้าใจถึงวิธีการเก็บข้อมูลและการส่งข้อมูลของกล้องวิดีโอด้วย จากความรู้ทางด้านการมองเห็นของคนนั้น เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการมองเห็นของมนุษย์นั้นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความสว่าง สูงกว่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสีเป็นอย่างมาก ข้อเท็จจริงดังกล่าวเป็นสิ่งที่กำหนดแนวทางของการบีบอัดข้อมูลสัญญาณภาพ ข้อมูลสัญญาณภาพที่ใช้กันทั่วไปในการถ่ายทำรายการนั้นจะประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ ส่วนค่าความสว่าง (Luminosity) กับส่วนค่าสี (Chroma) ดังที่เห็นได้จากปริภูมิสีแบบ LUV หรือ YCbCr ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในการถ่ายทำรายการ เมื่อเราแยกสัญญาณภาพออกเป็นสองส่วนแล้ว ข้อมูลส่วนที่เป็นสีนั้นจะถูกลดความละเอียดลง ผ่านวิธีการที่เรียกว่าการสุ่มตัวอย่างย่อยของสี (Chroma Subsampling) ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ที่ได้นั้นใช้ความกว้างของการส่งสัญญาณ (signal bandwidth) ลดลงโดยที่คุณภาพของภาพนั้นยังดีอยู่ หรือทำให้สามารถเพิ่มความละเอียดของสัญญาณส่วนความสว่างได้ โดยที่ยังใช้ความกว้างของการส่งสัญญาณเท่าเดิม



ภาพจริง

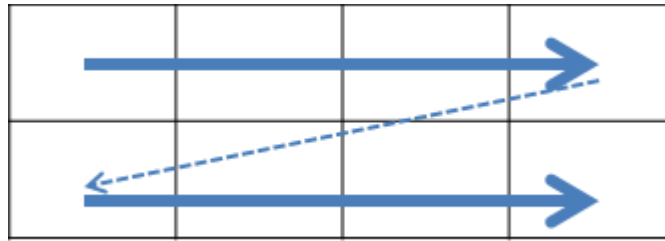
ข้อมูลความสว่าง

ข้อมูลสี

รูป 9 ตัวอย่างการแยกข้อมูลภาพออกเป็นความสว่างและค่าสี

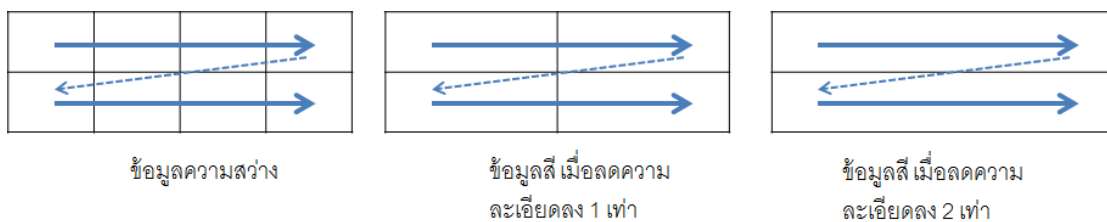
การสุ่มตัวอย่างย่อยของสีนั้นกระทำกันในขั้นของการส่งสัญญาณ โดยสัญญาณภาพที่ส่งมานั้นจะส่งมาแบบ scanline progressive ในแนวนอน กล่าวคือสัญญาณนั้นจะส่งมาเป็นเส้นภาพในแนวนอนทีละเส้น โดยที่แต่ละเส้นจะส่งจากซ้ายไปขวา รูปต่อไปนี้แสดงถึงการส่งสัญญาณภาพขนาด  $4 \times 2$  จุดแบบ scanline





รูป 10 วิธีการส่งข้อมูลแบบ scanline

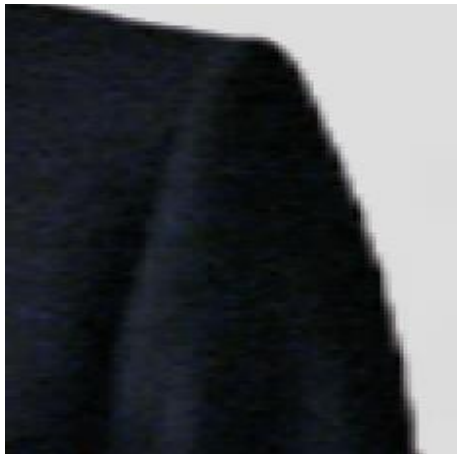
อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างย่อยของสีแล้วนั้น ข้อมูลที่ส่งมาจะถูกแยกเป็นสองส่วน โดยข้อมูลส่วนค่าความสว่างนั้นจะมีการส่งมาตามปรกติตั้งรูปที่แล้ว แต่ข้อมูลสีนั้นจะมีการลดข้อมูลที่ส่งมาลง ทำให้ความละเอียดของสีลดลง ดังรูป 11 โดยรูปด้านซ้ายคือข้อมูลความสว่าง ส่วนรูปตรงกลางคือข้อมูลสี เมื่อลดความละเอียดลงหนึ่งเท่า หรือที่ใช้สัญลักษณ์ว่าเป็นการสุ่มตัวอย่างย่อยของสีแบบ 4:2:2 ส่วนรูปด้านขวาเป็นข้อมูลสีเมื่อลดความละเอียดลงสองเท่า (แบบ 4:1:1) รายละเอียดใน (Poynton, 2012)



รูป 11 ตัวอย่างการส่งข้อมูลแบบใช้การสุ่มตัวอย่างย่อยของสี ช่องหนึ่งช่องต่อ 1 ข้อมูล

กล้องวิดีโอโดยทั่วไปนั้นจะมีการใช้การสุ่มตัวอย่างย่อยของสีในการส่งสัญญาณ ยกเว้นกล้องวิดีโอคุณภาพสูงมากเท่านั้นที่จะไม่มีการลดความละเอียดลงเลย (subsampling 4:4:4) การลดความละเอียดของข้อมูลสีนั้น ถึงแม้จะสังเกตได้ยากด้วยสายตาคนดู แต่จะส่งผลกระทบต่อตรงต่อการพิจารณาค่าสี เนื่องจากข้อมูลสีนั้นลดลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการแยกภาพโดยพิจารณาสีของฉากหลังเป็นหลักจะได้รับข้อมูลที่มีรายละเอียดลดลง อาจทำให้การแยกภาพมีคุณภาพต่ำลงตามไปด้วย

ในปัจจุบันกล้องที่มีคุณภาพเพียงพอสำหรับถ่ายทำรายการส่วนใหญ่มี subsampling 4:2:2 และส่งสัญญาณสดเข้าระบบผ่านการเชื่อมต่อแบบ SDI (serial digital interface) ทำให้ได้สัญญาณแบบ 4:2:2 โดยไม่มีการบีบอัดเพิ่มเติม แต่หากต้องประมวลผลจากการบันทึกไว้ล่วงหน้า ซึ่งโดยทั่วไปจะมีการบีบอัดเพิ่มเติมที่ต้องพิจารณาด้วย เช่นการใช้ข้อมูลการเคลื่อนที่ของภาพจากหลายเฟรมในมาตรฐานพอแมตวิดีโอแบบ mpeg-4 avc (Poynton 2012) ซึ่งการบีบอัดที่เพิ่มขึ้นนี้ก็จะทำให้เกิดความซับซ้อนในการพิจารณาว่าจุดใดเป็นฉากหลัง ทำให้การแยกภาพมีความยุ่งยากมากขึ้นมาก

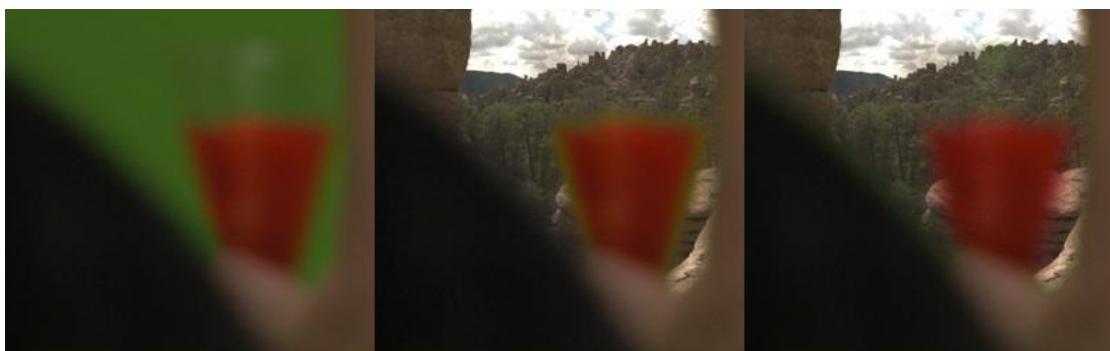


รูป 12 ขอบภาพที่ไม่เรียบซึ่งเกิดจากการบีบอัดเพิ่มเติม

### การกำจัดการเปื้อนของสี (despill)

จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว ภาพที่ได้จากการถ่ายทำในห้องถ่ายทำที่มีฉากสีเขียวอยู่จะมีปัญหาของการเปื้อนสี (color spilling) คือการที่สีของฉากเขียวนั้นสะท้อนไปกระทบบนตัววัตถุที่สนใจ ทำให้บริเวณขอบของวัตถุมีสีเขียวปนเปื้อนมาด้วย การปนเปื้อนนี้จะทำให้วัตถุมีสีที่ไม่สมจริง วิธีการกำจัดการปนเปื้อนนี้นั้นมีหลายวิธี เช่น การจำกัดสีเขียวด้วยสีแดง (green limited by red) หรือ การจำกัดสีเขียวด้วยสีน้ำเงิน (green limited by blue) ซึ่งจะเป็นการจำกัดไม่ให้จุดที่ต้องการแก้การปนเปื้อนของสีนั้นมีค่าสีเขียวไม่เกินค่าสีน้ำเงินหรือสีแดง หรือวิธีการใช้ค่าเฉลี่ยของสีแดงและสีน้ำเงิน ดังสมการต่อไปนี้ เมื่อกำหนดให้ R, G, B แทนค่าของสีต่าง ๆ และ  $G^*$  คือค่าของสีเขียวหลังจากการปรับแก้แล้ว

$$\begin{aligned} G^* &= \text{average}(R,B) && ; G > \text{average}(R,B) \\ &= G && ; G \leq \text{average}(R,B) \end{aligned}$$



รูป 13 ตัวอย่างการแก้การปนเปื้อนของสีเขียว

ในการกำจัดการปนเปื้อนสีเขียว มีข้อควรระวังคือการไม่ทำให้สีของภาพส่วนที่ไม่ปนเปื้อนสีเขียวเปลี่ยนแปลงมากเกินไป เนื่องจากการกำจัดการเปื้อนเป็นการจำกัดปริมาณสีเขียวในภาพ จึงทำให้สีเขียวในส่วนอื่นๆ ที่ไม่มีการปนเปื้อนมีค่าลดลง และอาจเกิดเป็นภาพที่มีสีเพี้ยนไม่สมจริงได้ แต่การแยกภาพโดยทั่วไปนั้นไม่มีข้อมูลว่าภาพส่วนใดจะมีโอกาสได้รับการปนเปื้อนสีเขียวมากหรือน้อย ทำให้การกำจัดการปนเปื้อนเป็นไปได้ไม่ตึง

ในการถ่ายทำที่ต้องการควบคุมคุณภาพเรื่องสี บางครั้งจึงมีการแก้ปัญหาระหว่างการถ่ายทำโดยฉายแสงสีม่วงเพื่อลบสีเขียวที่ปนเปื้อนออกไปตั้งแต่ต้นทาง (S. Wright, 2008)

## ตัวกรอง (Filter)

ผลลัพธ์ของขั้นตอนวิธีต่าง ๆ ที่ใช้ในการแยกฉากหลังนั้นสามารถปรับปรุงคุณภาพให้ดียิ่งขึ้นได้โดยการในตัวกรองต่าง ๆ ในส่วนนี้จะกล่าวถึงประเภทของตัวกรองต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้ได้ โดยมีเป้าหมายคือทำให้ค่าความทึบแสงนั้นมีความราบเรียบมากยิ่งขึ้น

การนำเอาตัวกรองมาช่วยทำให้ค่าความทึบแสงนั้นมีความราบเรียบมากยิ่งขึ้นนั้นมีตัวกรองที่สามารถใช้ได้อยู่หลายตัวกรอง ในส่วนนี้จะเป็นการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนวิธีของตัวกรองต่าง ๆ โดยจะขอแบ่งขั้นตอนวิธีออกเป็น 2 หมวดหลัก คือ ตัวกรองแบบเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก และตัวกรองแบบไม่เฉลี่ย

### ตัวกรองแบบเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก

ตัวกรองที่รู้จักและใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือ ตัวกรองแบบกล่อง (box filter) ที่นำข้อมูลของจุดสีรอบข้างในหน้าต่างมาหาค่าเฉลี่ยโดยให้ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับทุกๆ จุดสีที่นำมาเฉลี่ยเท่ากันหมด ตัวกรองแบบเกาส์เซียน (Gaussian filter) ที่มีการถ่วงน้ำหนักตามระยะห่างระหว่างจุดสีหลักและจุดสีที่นำมาเฉลี่ย ตัวกรองทั้งสองแบบนี้ได้รับความนิยมเนื่องจากมีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดเมื่อต้องการความราบเรียบที่สูงขึ้น จะต้องเพิ่มขนาดของหน้าต่างเพื่อเพิ่มจำนวนจุดสีที่นำมาเฉลี่ย ส่งผลให้โครงสร้างของภาพที่เป็นเส้นขอบถูกทำให้ราบเรียบและเสียสภาพความเป็นเส้นขอบ

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของความราบเรียบที่สูงเกินไปบริเวณเส้นขอบ จึงได้มีการเสนอตัวกรองแบบสองด้าน (bilateral filter) [Tomasi98] ซึ่งใช้ทั้งข้อมูลระยะห่างระหว่างจุดสี และความต่างของสีร่วมกับฟังก์ชันแบบเกาส์เซียนเพื่อคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก ส่งผลให้ภาพผลลัพธ์มีความราบเรียบและรักษาสภาพความเป็นเส้นขอบไว้ได้ อย่างไรก็ตามตัวกรองแบบสองด้านอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ความชันผกผันกลับ (gradient reversal) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นบริเวณเส้นขอบเมื่อจุดสีรอบข้างที่มีความคล้ายคลึงกันต่ำ ทำให้การคำนวณฟังก์ชันแบบเกาส์เซียนไม่มีเสถียรภาพ ส่งผลให้เกิดคุณลักษณะที่เป็นเส้นขอบอันไม่พึงประสงค์ปรากฏขึ้นมา นอกจากปัญหาความชันผกผันกลับแล้ว อีกหนึ่งข้อจำกัดคือความซับซ้อนในการคำนวณ โดยขั้นตอนวิธีแบบตรงไปตรงมาใช้เวลา  $O(Nr^2)$  เมื่อ  $N$  คือจำนวนจุดสีทั้งหมดในภาพและ  $r$  คือขนาดความกว้างยาวของหน้าต่างรอบแต่ละจุดสี

งานวิจัยใน [Paris06] จึงได้เสนอวิธีประมาณตัวกรองแบบสองด้านด้วยตัวกรองในปริภูมิ 3 มิติของตำแหน่งและพิกัด โดยอาศัยการสุ่มในกลุ่มตัวอย่างที่หยาบกว่าเพื่อเพิ่มความเร็วในการคำนวณ โดยสมมติว่าเงื่อนไขการสุ่มของ Nyquist ยังคงเป็นจริง สำหรับในกรณีที่จุดสีที่นำมาเฉลี่ยอยู่ในหน้าต่างสี่เหลี่ยม งานวิจัยใน [Weiss06] ได้เสนอวิธีที่ใช้เวลา  $O(N \log r)$  ในขณะที่งานวิจัยใน [Porikli08] และ [Yang09] ใช้เวลา  $O(N)$  ซึ่งขั้นตอนวิธีดังกล่าวมีความซับซ้อนขึ้นกับจำนวนการสุ่มที่เป็นค่าคงที่ของระดับความสว่างของจุดสี

เพื่อที่จะลดเวลาในการคำนวณจำเป็นจะต้องทำการสุ่มที่หยาบขึ้นส่งผลให้ละเมียดเงื่อนไขการสุ่มของ Nyquist และทำให้ผลที่ได้มีคุณภาพต่ำลง

เนื่องจากข้อจำกัดของตัวกรองแบบสองด้านทำให้มีงานวิจัยอื่นๆ ที่ถูกนำเสนอขึ้นมาเพื่อพัฒนาตัวกรองที่รักษาสภาพความเป็นเส้นขอบ เช่น งานวิจัยใน [Gastal11] ได้เสนอวิธีแปลงมิติของจุดสีและทำการกรองบนมิตินั้น โดยอาศัยการกรองใน 1 มิติหลายๆ รอบเป็นจำนวนคงที่ จึงยังคงรักษาเวลา  $O(N)$  ในการคำนวณ แต่ก็ยังเกิดปัญหาความชันผันกลับในบริเวณที่เป็นเส้นขอบ

### ตัวกรองแบบไม่เฉลี่ย

ตัวกรองแบบไม่เฉลี่ยที่นิยมใช้กันในการกรองเพื่อรักษาสภาพความเป็นเส้นขอบคือตัวกรองมัธยฐาน (median filter) ที่ไม่ทำการเฉลี่ยแต่จะนำค่ามัธยฐานในหน้าต่างมาแทนค่าที่จุดสีที่ต้องการทำการกรองโดยขั้นตอนวิธีแบบตรงไปตรงมาใช้เวลา  $O(Nr^2 \log r)$  หรือประมาณด้วยการเรียงแบบถึงจะใช้เวลา  $O(Nr^2)$  งานวิจัยใน [Huang75] ได้เสนอการลดเวลาด้วยการพิจารณาการซ้อนเหลื่อมระหว่างหน้าต่างของจุดสีที่ต้องการกรองที่อยู่ใกล้กัน โดยใช้การคำนวณฮิสโตแกรมแบบเพิ่มทำให้ลดเวลาลงเหลือ  $O(Nr)$  และมีการพัฒนาต่อเนื่องโดยในงานวิจัย [Weiss06] ลดเวลาเหลือ  $O(N \log r)$  และใช้เวลา  $O(N)$  ในงานวิจัย [Perreault07] ซึ่งในภายหลังจากงานวิจัยใน [Kass10] ได้เสนอกรณีทั่วไปของตัวกรองมัธยฐานด้วยการใช้ฮิสโตแกรมแบบเฉพาะที่และใช้เวลา  $O(N)$  อย่างไรก็ตามก็ตัวกรองมัธยฐานมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถปรับความราบรื่นได้ดีเท่าตัวกรองแบบเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก จึงนำมาสู่การพัฒนาตัวกรองแบบนำทาง (guided filter) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในหมวดถัดไป

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีวิจัย และภาพรวมของการทำงาน

แนวทางการดำเนินงานของโครงการวิจัยนี้ จะเลือกขั้นตอนวิธีที่มีอยู่แล้วมาปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นไป และนำวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นมาสร้างอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการแยกฉากหลัง โดยเราได้เลือกขั้นตอนวิธีใน [Wright10] มาสองวิธีได้แก่ ได้แก่ขั้นตอนวิธี ChromaKey และ ColorDifference ซึ่งได้กล่าวถึงไปแล้วโดยคร่าว ๆ ในบทก่อนหน้า แผนการดำเนินการในภาพรวมจะเป็นดังต่อไปนี้

1. ทำการทดลองเพื่อหาเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีทั้งสอง (ได้แก่ขั้นตอนวิธี Chroma Key และ Color Difference) เพื่อหาวิธีการที่ดีที่สุด ในสภาพแวดล้อมที่ตรงกับการใช้งานจริง
2. พัฒนาขั้นตอนวิธีใหม่ โดยปรับปรุงมาจากขั้นตอนวิธีที่ได้เลือกไว้โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ รวมถึงทำการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่ได้พัฒนาขึ้น
3. พัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ โดยการศึกษาอุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีอยู่ในตลาดและพัฒนาส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ที่เหมาะสม

ในขั้นตอนที่ 1 นั้นมีรายละเอียดอยู่ใน บทที่ 4 การทดลองเปรียบเทียบวิธี Color Difference และ Chroma Key ซึ่งมีผลลัพธ์ที่สำคัญคือขั้นตอนวิธี Color Difference นั้นเป็นขั้นตอนที่มีประสิทธิภาพที่ดี และเราได้เลือกนำขั้นตอนวิธีดังกล่าวมาใช้เป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนา

ในขั้นตอนที่ 2 โดยสาระสำคัญนั้นมีส่วนย่อยสามส่วนคือ 1) การนำเอาการประมาณความหนาแน่นเคอร์เนลมาใช้ใน 2) การนำเอาอุปกรณ์รับรู้ความลึกมาใช้ และ 3) การนำเอาตัวกรองแบบนำทางมาใช้ โดยส่วนย่อยทั้งสามส่วนมีเป้าหมายคือทำให้การทำงานของ Color Difference นั้นดียิ่งขึ้น

แนวคิดของการนำเอาวิธีการทั้งสามมาเป็นดังนี้ ปัญหาที่สำคัญของการใช้ขั้นตอนวิธี Color Difference ซึ่งคือการที่ค่าความทึบแสงนั้นแปรผันตามค่าความต่างของสี โดยผู้ใช้จำเป็นต้องกำหนดค่าขอบเขตบนล่างสูงสุดของค่าความต่างดังกล่าว ในทางปฏิบัตินั้น ผู้ใช้จะกำหนดค่าดังกล่าวมาให้และใช้ค่าดังกล่าวกับทั้งภาพ อย่างไรก็ตาม จากการพิจารณาปัญหา จะเห็นว่าค่าดังกล่าวควรจะมีค่าแตกต่างกันไปตามแต่ละบริเวณของภาพ (เช่น บริเวณที่แสงมาก หรือแสงน้อย ควรจะแตกต่างกัน) คณะผู้วิจัยจึงเสนอขั้นตอนวิธีการประมาณความหนาแน่นเคอร์เนลมาใช้ในการปรับค่าดังกล่าวให้เปลี่ยนไปตามค่าสีในส่วนต่าง ๆ ของภาพ

การนำเอาอุปกรณ์วัดความลึกมาใช้นั้นเกิดมาจากการที่การกำหนดค่าขอบเขตเบื้องต้นนั้น จำเป็นจะต้องมีผู้ใช้มากำหนด แต่ถ้าหากเรามีการนำเอาอุปกรณ์รับรู้ความลึกมาใช้นั้นก็จะช่วยให้สามารถกำหนดค่าขอบเขตเริ่มต้นโดยอัตโนมัติได้

เนื้อหาในสองย่อหน้าก่อนหน้านี้นี้จะถูกอธิบายในบทที่ 5 การปรับปรุงขั้นตอนวิธี

และส่วนสุดท้ายคือการนำเอาตัวกรองแบบนำทางมาช่วยปรับปรุงค่าความทึบแสงให้มีความราบเรียบที่เหมาะสมตามค่าสีอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะถูกกล่าวไว้ในบทที่ 6 สำหรับผลการทดลองเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ของขั้นตอนวิธีใหม่นี้จะอยู่ในบทที่ 7

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

ในขั้นตอนที่ 3 นั้นเป็นการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ ซึ่งได้กล่าวในรายละเอียดไว้ในบทที่ 8 การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ มีผลผลิตหลักคือตัวอุปกรณ์ต้นแบบพร้อมด้วยการออกแบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้

## บทที่ 4

### การทดลองเปรียบเทียบวิธี Color Difference และ Chroma Key

การทดลองในบทนี้จะทำการเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีจากหมวดที่ใช้พื้นหลังเป็นสีเขียว ได้จำนวน 4 วิธี ได้แก่ วิธีที่ใช้เทคนิค Color difference ที่ใช้สีเขียวเป็นสีหลัก วิธี Chroma key ในปริภูมิสี RGB วิธี Chroma key ในปริภูมิสี HSV และ วิธี Chroma key ในปริภูมิสี YUV รูปอ้างอิงที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูป 14

จากการทดลองนั้น ผลที่ได้คือขั้นตอนวิธี Color Difference ให้ผลที่ดีที่สุด



รูป 14 รูปข้อมูลนำเข้าอ้างอิงในการทดลอง

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรที่สำคัญในการทำการแยกฉากหลังเพื่อใช้ในการวางแผนในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างสำหรับการทดลองในลำดับถัดไป
2. เพื่อคัดเลือกระเบียบวิธีแยกฉากหลังที่จะนำไปต่อยอด การทดลองในรายงานฉบับนี้จะใช้ 4 วิธีโดยเป็นวิธีจากหมวดที่ใช้พื้นหลังเป็นสีเขียว โดยเป็นวิธีที่ใช้เทคนิค Color difference ที่ใช้สีเขียวเป็นสีหลัก Chromakey ในปริภูมิสี RGB Chromakey ในปริภูมิสี HSV และ Chromakey ในปริภูมิสี YUV

### สมมติฐาน

1. ระยะห่างจากฉากหลังเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการแยกฉากหลัง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนระยะห่างผลของการแยกฉากหลังจะได้ผลที่ต่างกัน โดยระยะห่างมากจะได้ผลที่ดีกว่า

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

2. ระดับความสว่างความสว่างเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการแยกฉากหลัง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสว่างผลของการแยกฉากหลังจะได้ผลที่ต่างกัน โดยความสว่างที่มากเกินไปและต่ำเกินไปจะได้ผลที่แย่กว่าความสว่างที่ถูกจัดโดยผู้เชี่ยวชาญ
3. สีเสื้อเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการแยกฉากหลัง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสีเสื้อผลของการแยกฉากหลังจะได้ผลที่ต่างกัน โดยสีเสื้อที่มีความเข้มจะได้ผลที่ดีกว่า
4. ความเคลื่อนไหวส่งผลต่อการแยกฉากหลัง โดยส่วนที่มีความเคลื่อนไหวจะถูกมองเป็นส่วนที่โปร่งแสง
5. วิธี Color difference วิธี Chromakey ในปริภูมิสี HSV และวิธี Chromakey ในปริภูมิสี YUV ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธี Chromakey ในปริภูมิสี RGB อย่างเห็นได้ชัดจากการสังเกตด้วยตา

### ตัวแปรต้น

1. ระยะห่างจากฉากหลัง
2. ระดับความสว่าง
3. สีเสื้อ
4. การเคลื่อนไหว
5. ระเบียบวิธี

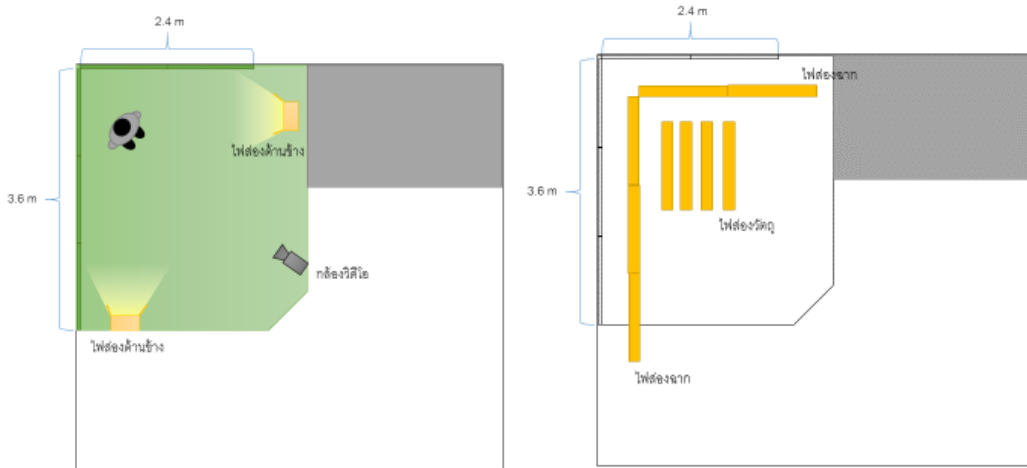
### ตัวแปรควบคุม

1. ตำแหน่งอุปกรณ์ทั้งหมด คือ ฉากหลัง กล้องวิดีโอ ไฟส่องสว่าง ถูกกำหนดไว้ที่ตำแหน่งเดิมตลอดการทดลอง
2. ขนาดของลำดับภาพจากกล้องคือ 1920 x 1080 ที่ความถี่ 50i ค่าไวท์บาลานซ์ (white balance) ที่ 5000k และความเร็วของชัตเตอร์อยู่ที่ 100
3. ตัวแปรทางการคำนวณสำหรับแต่ละระเบียบวิธีถูกจัดให้ดีที่สุดที่สุดโดยผู้เชี่ยวชาญสำหรับระยะห่างจากฉากหลัง 90 เซนติเมตร ระดับความสว่างที่ถูกจัดโดยผู้เชี่ยวชาญ สีเสื้อสีเทา ไม่มีความเคลื่อนไหว

### อุปกรณ์

1. ห้องถ่ายทำชั่วคราว ดังแสดงโครงสร้างในรูป 15
2. ฉากสีเขียวที่มีความต่างของระดับสีเขียว
3. หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์สีขาว 30 ดวง เป็นไฟส่องสว่างด้านข้าง 14 ดวง และไฟบนเพดาน 16 ดวง
4. กล้องวิดีโอ Sony NEX-VG30





รูป 15 แผนภาพแสดงห้องที่ใช้ในการถ่ายทำ

### วิธีการทดลอง

1. เก็บลำดับของภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งฉากหลังคือ 30, 90 และ 150 เซนติเมตร ที่ระดับความสว่างที่ถูกจัดโดยผู้เชี่ยวชาญ
2. เก็บลำดับของภาพที่ลดระดับความสว่างด้วยการปิดหลอดไฟลูออเรสเซนต์จากแผงไฟส่องสว่างด้านข้าง 6 ดวงและ 14 ดวง โดยเก็บลำดับภาพเฉพาะที่ตำแหน่ง 90 เซนติเมตร
3. เก็บลำดับของภาพที่มีความเคลื่อนไหวที่ระดับความสว่างที่ถูกจัดโดยผู้เชี่ยวชาญ ณ ตำแหน่ง 90 เซนติเมตรฉากหลัง
4. เก็บลำดับของภาพตามหัวข้อ 1 – 3 โดยเปลี่ยนสีเสื้อ 3 สี คือ ดำ เทา และขาว

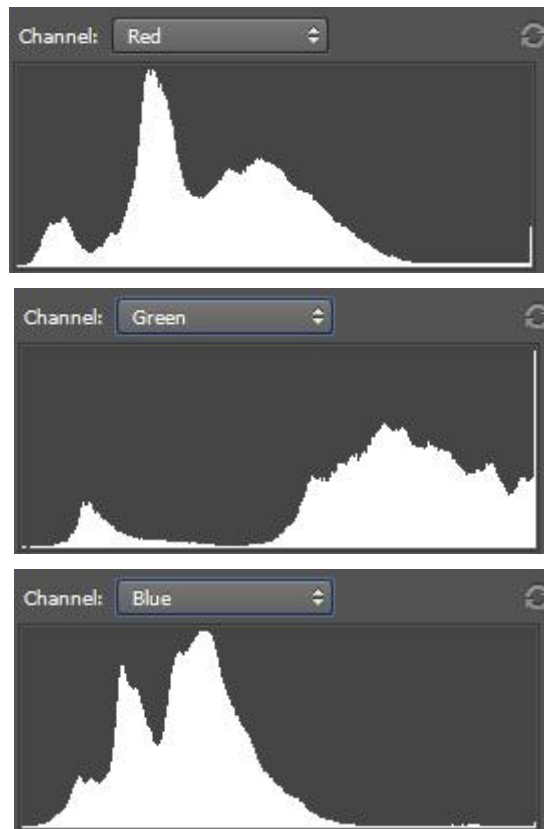
### ผลการทดลอง

การทดลองทำบนลำดับภาพชุดเดียวกันทั้งหมดสำหรับทุกระเบียบวิธี โดยผลลัพธ์ที่นำมาแสดงเป็นเฟรมที่ถูกตัดจากลำดับภาพที่ลำดับเฟรมเดียวกันดังแสดงในภาคผนวก ก เรียงตามลำดับวิธีการเก็บภาพดังที่กล่าวไว้ข้างต้นโดยภาพที่มีความเคลื่อนไหวใช้จำนวน 3 ภาพ ภาษาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการทดลองคือ C++ ไบเบรารีหลักที่ใช้คือ DirectCompute เครื่องที่ใช้ประกอบด้วยหน่วยประมวลผลกลางความเร็ว 3.4 GHz หน่วยความจำ 8 GB หน่วยประมวลผลกราฟิก NVIDIA GeForce GTX 780 ผลการทดลองจากทุกระเบียบวิธีแสดงในภาคผนวกรูป 61 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Color difference เมื่อใส่เสื้อสีดำ - รูป 72 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี YUV เมื่อใส่เสื้อสีขาว โดยการวัดผลการทดลองควรจะวัดจากการเปรียบเทียบกับผลการตัดฉากหลังด้วยมืออย่างละเอียด อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ปรากฏสามารถวัดได้จากสายตาจึงขอละเลยการวัดผลอย่างละเอียดในรายงานฉบับนี้ เวลาในการประมวลผลเฉลี่ย 100 เฟรมแสดงในตาราง 1 ซึ่งไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละระเบียบวิธี

ระเบียบวิธี	Color Difference	Chromakey in RGB	Chromakey in HSV	Chromakey in YUV
เวลา (ms)	0.12	0.13	0.15	0.14

ตาราง 1 ผลการวัดเวลาการคำนวณ

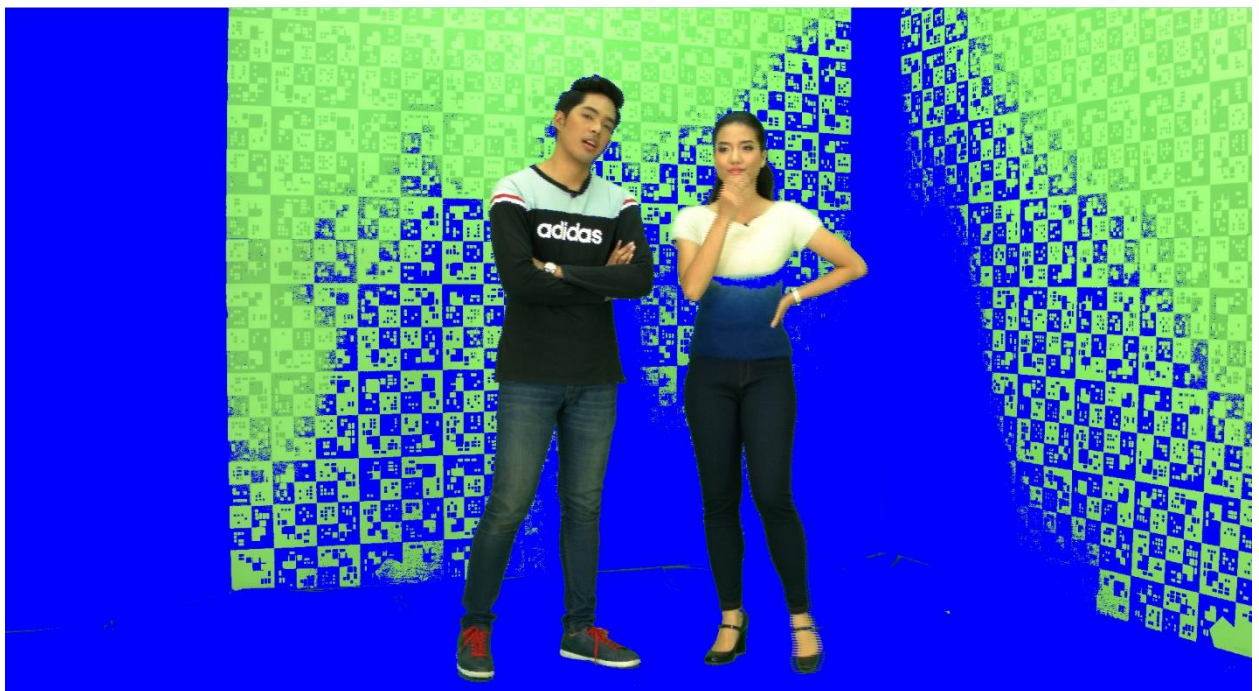
จากผลการทดลองพบว่าวิธี Chromakey ในปริภูมิสี RGB ให้ผลลัพธ์ที่ด้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาที่ฮิสโตแกรมของรูปร่างในรูป 16 พบว่าจุดที่เป็นฉากเขียวในช่องสีเขียวมีการรวมกลุ่มเป็นก้อนเดียว ในขณะที่ช่องสีแดงและน้ำเงินมีการกระจายตัวออกเป็นกลุ่มหลัก 2 กลุ่ม แต่การใช้วิธี Chromakey มีการจัดช่วงของกลุ่มสีที่เป็นฉากเขียวได้เพียงกลุ่มเดียว ดังนั้นจึงมีสีเขียวบางส่วนที่อยู่คนละกลุ่มหลงเหลืออยู่ในกรณีที่ใช้วิธี Color difference และ Chromakey ในปริภูมิสี HSV ให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพใกล้เคียงกัน แต่วิธี Color difference มีความทนทานต่อสภาพแสงที่ไม่คงที่ได้ดีกว่า ดังจะเห็นได้จากรูปร่างว่าในส่วนบนของรูปมีความสว่างสูงกว่าส่วนอื่นๆ ในรูป 16 ฮิสโตแกรมของรูปร่าง วิธี Color difference สามารถตัดออกได้แต่วิธี Chromakey ในปริภูมิสี HSV ไม่สามารถตัดออกได้



รูป 16 ฮิสโตแกรมของรูปร่าง



รูป 17 ตัวอย่างผลการทดลองจากวิธี Color difference



รูป 18 ผลการทดลองจากวิธี Chromakey ในปริภูมิสี RGB



รูป 19 ผลการทดลองจากวิธี Chromakey ในปริภูมิสี HSV

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองพบว่าระยะห่างจากฉากหลังส่งผลต่อการตัดฉากหลัง โดยระยะห่างที่ 30 เซนติเมตรผลที่เกิดขึ้นคือเงาของคนไปตกกระทบที่ฉากหลังทำให้ตัดฉากหลังบางส่วนไม่ได้ และบังแสงสะท้อนจากฉากหลังทำให้การเปื้อนของสีเขียวเห็นไม่ชัดเจนนัก หากเทียบระหว่างระยะห่างที่ 90 และ 150 เซนติเมตร จะพบว่าระยะห่างที่ 90 เซนติเมตรทำให้เกิดการเปื้อนของสีเขียวชัดเจนกว่า แต่ด้วยข้อจำกัดทางพื้นที่ถ่ายทำและอุปกรณ์ส่องสว่างทำให้บางส่วนของร่างกาย (แขนเสื้อด้านขวา) โดนแสงน้อยเมื่ออยู่ที่ตำแหน่ง 150 เซนติเมตรทำให้สีเขียวที่เปื้อนปรากฏชัดเจนส่งผลต่อคุณภาพของผลลัพธ์ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถแก้ไขได้โดยการใช้พื้นที่ถ่ายทำที่กว้างขึ้น เพิ่มไฟส่องสว่าง หรือเปลี่ยนเป็นแสงฟุ้ง

ตัวแปรด้านความสว่างมีผลชัดเจนต่อการเปรียบเทียบ (contrast) ของภาพซึ่งระเบียบวิธี Color difference มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของความสว่างมากกว่าวิธีอื่นๆ อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ส่องสว่างที่ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์จึงไม่สามารถจัดสภาพแสงที่มีความสว่างมากๆ หรือปรับสภาพแสงโดยละเอียดได้

ตัวแปรสีเสื้อสามารถสรุปจากผลการทดลองได้ว่าสีดำหรือสีเข้มจะโดนการเปื้อนของสีเขียวน้อยและได้ผลที่ดีกว่าเสื้อที่มีสีอ่อน อย่างไรก็ตามการทดลองควรที่จะเพิ่มเสื้อสีต่างๆ ในความเข้มที่ต่างกัน ซึ่งมีโอกาสที่

จะเกิดขอบในการตัดฉากหลังเนื่องจากกล้องวิดีโอบางรุ่นจะมีกระบวนการเน้นขอบภาพ โดยจะสามารถตั้งสมมติฐานและทำการทดลองได้เมื่อได้อุปกรณ์เพิ่มเติม

ความเคลื่อนไหวเป็นตัวแปรที่ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการตัดฉากหลัง โดยผลลัพธ์เป็นไปตามสมมติฐานคือส่วนที่มีความเคลื่อนไหวจะถูกมองเป็นส่วนที่มีความโปร่งแสงซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการมองเห็นตามธรรมชาติ

เมื่อวิเคราะห์แยกตามระเบียบวิธีพบว่า ระเบียบวิธี Color difference ทำการตัดสีขาวดำดี ทนต่อความเปลี่ยนแปลงของความสว่าง แต่โดยทางทฤษฎีแล้วจะมีข้อดีน้อยกว่าระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี HSV และ Chroma key ในปริภูมิสี YUV ในแง่การแยกโทนสี ซึ่งจะตั้งสมมติฐานและทำการทดลองได้เมื่อมีอุปกรณ์ส่องสว่างสีอื่นๆ ที่นิยมใช้ในการถ่ายทำ เช่น สีส้ม หรือ สีฟ้า ระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี HSV และ Chroma key ในปริภูมิสี YUV สามารถแยกความเป็นสีเขียวได้ดี แต่ด้อยในการแยกแยะสีขาวดำ และไม่ทนทานต่อความเปลี่ยนแปลงของความสว่าง โดย Chroma key ในปริภูมิสี YUV จะโดนผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงมากกว่า และระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี RGB ให้ผลลัพธ์ที่แย่ที่สุดในทุกกรณี

## บทที่ 5

### การปรับปรุงขั้นตอนวิธี

#### ขั้นตอนวิธีพื้นฐาน

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในบทก่อนหน้า โครงการนี้จะใช้ขั้นตอนวิธีพื้นฐานเป็น Color Difference ซึ่งมีการทำงานตามสมการต่อไปนี้

ในรายละเอียดนั้น ค่าความทึบสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_i = C_{i,G} - \max(C_{i,R}, C_{i,B})$$

$$\alpha_i = 1 - \text{saturate}((D_i - t_{min}) / (t_{max} - t_{min}))$$

เมื่อ  $\alpha_i$  คือค่าความทึบที่ถูกจำกัดอยู่ในช่วง  $[0, 1]$  ด้วยฟังก์ชัน *saturate*,  $C_i$  คือค่าสีที่จุดนั้นๆ  $t_{min}$  และ  $t_{max}$  เป็นค่ากำหนดช่วงของ  $\alpha_i$  ดังนั้น

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ } D_i < t_{min} \\ 0 & \text{เมื่อ } D_i > t_{max} \\ 1 - (D_i - t_{min}) / (t_{max} - t_{min}), & \text{อื่น ๆ} \end{cases}$$

โดยในการใช้งานจริงนั้น ค่า  $t_{min}$  และ  $t_{max}$  เป็นค่าที่ถูกกำหนดโดยผู้ใช้เพื่อปรับค่าที่ระบุว่า จุดที่มีความต่างในค่าใดจะถือว่าเป็นฉากหลัง หรือ วัตถุเบื้องหน้าอย่างแน่นอน

จากการคำนวณข้างต้นจะเห็นได้ว่าผู้ใช้จะต้องมีการปรับค่า  $t_{min}$  เพื่อกำหนดว่าค่า  $D_i$  น้อยกว่าเท่าไรถึงจะถูกกำหนดเป็นพื้นหน้า ( $\alpha_i = 1$ ) และปรับค่า  $t_{max}$  เพื่อกำหนดว่าค่า  $D_i$  มากกว่าเท่าไรถึงจะถูกกำหนดเป็นพื้นหลัง ( $\alpha_i = 0$ ) ส่งผลให้ค่า  $\alpha_i$  ที่เกิดจากค่า  $D_i$  ที่อยู่ระหว่าง  $t_{min}$  และ  $t_{max}$  เกิดความโปร่งใสเป็นค่าไล่เลี่ยกันไป

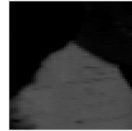
เมื่อผู้ใช้กำหนดค่า  $t_{min}$  และ  $t_{max}$  แล้ว ค่าทั้งสองจะถูกนำไปใช้กับทุกจุดสีในภาพทำให้เกิดข้อจำกัดเมื่อฉากหลังเกิดความแตกต่างของการส่องสว่างสูง เช่น มีแสงส่องสว่างมากเกินไปจนทำให้ฉากหลังสีเขียวเกือบจะเป็นสีขาว ส่งผลให้ค่า  $D_i$  มีค่าลดลงจนเข้าใกล้  $t_{min}$  และถูกจัดเป็นพื้นหน้า เช่นเดียวกับในกรณีที่คนอยู่ใกล้ฉากหลังจนเกิดเงาทึบ ค่า  $D_i$  จะมีค่าลดลง และอาจจะถูกจัดเป็นพื้นหน้าได้ หรือในกรณีที่แสงส่องสว่างที่ตัวคนมีไม่เพียงพอที่จะแก้ไขการเบี่ยงของสีเขียวบนเสื้อสีอ่อน ส่งผลให้ค่า  $D_i$  มีค่าเพิ่มขึ้นจนอาจจะถูกจัดเป็นพื้นหลัง ซึ่งเป็นปัญหาที่พบเจออยู่เป็นประจำในห้องถ่ายทำขนาดเล็กและมิงงบประมาณจำกัด ในการจัดซื้ออุปกรณ์ส่องสว่าง ด้วยข้อกำหนดนี้จึงนำมาสู่การศึกษาวิจัยขั้นตอนวิธีที่ใช้ข้อมูลของจุดสีเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากการใช้ค่ากำหนดหนดช่วงเพียงค่าเดียวกับทุกสภาพแสงที่อาจจะมีแตกต่างกันในภาพ

จากการสังเกตเบื้องต้นพบว่าเมื่อรวบรวมข้อมูลจุดสีรอบข้างในกรอบหน้าต่างแล้วนำข้อมูลของจุดสีนั้นๆ มาคำนวณหาค่า  $D_i$  เพื่อนำมาจัดกลุ่มเป็นจำนวนสองกลุ่มสำหรับพื้นหน้าและพื้นหลังผลลัพธ์ที่ได้คือการแยกกลุ่มที่ค่อนข้างชัดเจนดังแสดงในรูป 20 แต่ค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มนั้นมีความแตกต่างสำหรับกรอบ

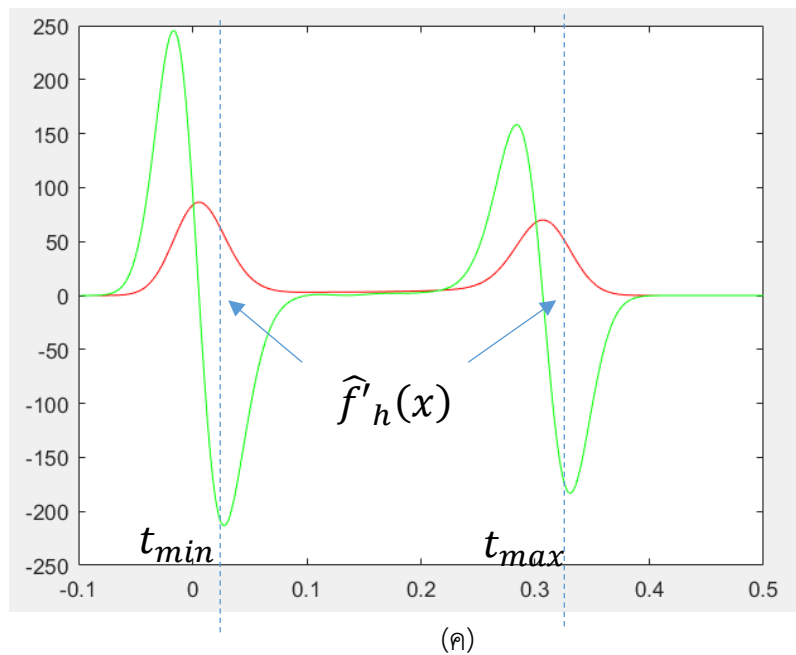
หน้าต่างที่อยู่ต่างบริเวณขึ้นอยู่กับสภาพแสงที่ฉายลงฉากเขียวและส่วนของสีพื้นหน้าที่อยู่ใกรอบหน้าต่างต่าง จึงนำมาสู่การริเริ่มนำการจัดกลุ่มค่า  $D_i$  เพื่อนำมาปรับค่า  $t_{min}$  และ  $t_{max}$  เฉพาะที่ โดยวิธีที่มีประสิทธิภาพในการจัดกลุ่มสำหรับข้อมูล 1 มิติคือการประมาณความหนาแน่นเคอร์เนลดังจะกล่าวเป็นรายละเอียดหลักในบทนี้ นอกจากนี้ในรายงานฉบับนี้ยังจะนำเสนอการขั้นตอนวิธีการใช้ข้อมูลความลึกเพื่อลดภาระผู้ใช้ในการปรับค่าเริ่มต้นสำหรับ  $t_{min}$  และ  $t_{max}$  อีกด้วย



(ก)



(ข)



รูป 20 การประมาณความหนาแน่นเคอร์เนล

### การประมาณความหนาแน่นเคอร์เนล

การประมาณความหนาแน่นเคอร์เนลเป็นขั้นตอนวิธีเชิงไม่พารามิเตอร์ (non - parametric) ที่ใช้ประมาณฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของตัวแปรเชิงสุ่ม นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการสร้างแบบจำลองที่ราบเรียบจากข้อมูลขาเข้าที่มีจำนวนจำกัด

นิยาม 1 ให้  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  คือตัวอย่างที่ได้จากการกระจายที่ไม่รู้ความหนาแน่น  $f$  การประมาณความหนาแน่นเคอร์เนลคือ

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{j=1}^n K\left(\frac{x_j - x}{h}\right)$$

เมื่อ  $n$  คือจำนวนข้อมูล  $K$  คือฟังก์ชันเคอร์เนล (ฟังก์ชันที่ไม่มีค่าเป็นลบ มีปริพันธ์เป็น 1 และมีค่ากลางเป็น 0)  $h > 0$  คือค่ากำหนดความราบเรียบหรือแบนด์วิดท์ (bandwidth) เมื่อเปรียบเทียบกับฮิตโต

แกรมก็คือค่าความกว้างของถังนั่นเอง งานวิจัยนี้ทำการกำหนดค่า  $h = 0.025$  ฟังก์ชันเคอร์เนลที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือฟังก์ชันเกาส์เซียน

$$K(x_j - x) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} e^{\left(-\frac{(x_j-x)^2}{2}\right)}$$

ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอนี้ใช้การประมาณความหนาแน่นเคอร์เนลเพื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่า  $D_{W_i}$  ของจุดสีที่อยู่ในหน้าต่าง  $W_i$  ซึ่งมีขนาด  $\sqrt{n} \times \sqrt{n}$  ล้อมรอบจุดสี  $C_i$  โดยอาศัยข้อสมมติที่ว่า การกระจายตัวของสีพื้นหลังสีเขียวและสีพื้นหน้าในหน้าต่างมีความหนาแน่นกระจุกอยู่ไม่เกิน 2 จุด กล่าวคือ 2 จุดนั้นคือค่ามากที่สุดเฉพาะที่หรือฐานนิยมของการกระจายตัวของ  $D_{W_i}$  การค้นหาค่ามากที่สุดเฉพาะที่สามารถหาได้จากการไล่ค่า  $D$  ตั้งแต่  $t_{min}$  ถึง  $t_{max}$  โดยแต่ละค่าจะถูกแทนใน  $\hat{f}_h(D)$  เพื่อหา  $D$  ที่ทำให้เกิดค่า  $\hat{f}_h(D)$  ที่เป็นค่ามากที่สุดเฉพาะที่ หรือใช้ฟังก์ชันอนุพันธ์ลำดับที่ 1

$$\hat{f}'_h(x) = \frac{1}{nh^2} \sum_{j=1}^n K' \left( \frac{x_j - x}{h} \right)$$

$$K'(x_j - x) = \frac{(x_j - x)}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(x_j-x)^2}{2}\right)}$$

ซึ่งจะมีค่าเป็น 0 เมื่อ  $D$  ทำให้เกิดค่า  $\hat{f}_h(D)$  ที่เป็นค่ามากที่สุดเฉพาะที่ โดยจะใช้ขั้นตอนวิธีเดียวกันคือการไล่ค่า  $D$  ตั้งแต่  $t_{min}$  ถึง  $t_{max}$  จนค่า  $\hat{f}'_h(D)$  มีการเปลี่ยนเครื่องหมายจาก + เป็น - สมมติให้เป็น  $\hat{f}'_h(D_{s-1})$  และ  $\hat{f}'_h(D_s)$  ตามลำดับ โดยที่  $s$  คือลำดับการไล่ค่า  $D$  ค่า  $\hat{D}$  ที่ทำให้เกิดค่า  $\hat{f}_h(\hat{D})$  ที่เป็นค่ามากที่สุดเฉพาะที่สามารถประมาณได้จาก

$$\hat{D} = D_{s-1} + \frac{\hat{f}'_h(D_{s-1})}{\hat{f}'_h(D_{s-1}) - \hat{f}'_h(D_s)} (D_s - D_{s-1})$$

สำหรับทุก  $\hat{D}$  ค่า  $\hat{f}_h(\hat{D})$  จะถูกเก็บไว้เป็นคู่ลำดับ  $(\hat{D}_m, \hat{f}_h(\hat{D}_m))$  โดยที่  $m$  คือดัชนี เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่

#### การปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่

จากการสังเกตเบื้องต้นพบว่าจำนวนค่า  $\hat{D}$  ที่ทำให้เกิดค่ามากที่สุดของทุกจุดสีในภาพที่มีจำนวนไม่เกิน 2 มีจำนวนมากกว่าจุดสีที่มีจำนวนค่า  $\hat{D}$  ที่ทำให้เกิดค่ามากที่สุดจำนวนเกิน 2 ในกรณีที่มีจำนวน 1 คือบริเวณที่เป็นพื้นหน้าหรือพื้นหลังเพียงอย่างเดียว และจำนวน 2 คือบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างพื้นหน้าและพื้นหลังดังแสดงในรูป 22 (ก) แสดงภาพสี (ข) ภาพค่า  $D$  และ (ค) การประมาณความหนาแน่นเคอร์เนล โดยเส้นสีแดง



แสดงการประมาณความหนาแน่นคอร์เนลและเส้นสีเขียวแสดงอนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของการประมาณความหนาแน่นคอร์เนล ซึ่งสมเหตุสมผลกับการสมมติจำนวนค่ามากที่สุดเพื่อลดความซับซ้อนของขั้นตอนวิธี

การปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่จะแบ่งเป็น 3 กรณีตามจำนวนค่า  $\hat{D}$

1. หากมีจำนวน 1 ค่า กำหนดให้เป็น  $\hat{D}_1$  จะถูกนำไปแทนที่  $t_{min}$  เมื่อ  $|\hat{D}_1 - t_{min}| < |\hat{D}_1 - t_{max}|$  หรือแทนที่  $t_{max}$  สำหรับเงื่อนไขที่เหลือ

2. หากมีจำนวน 2 ค่า กำหนดให้เป็น  $\hat{D}_1$  และ  $\hat{D}_2$  โดย  $\hat{D}_1$  จะถูกนำไปแทนที่  $t_{min}$  และ  $\hat{D}_2$  จะถูกนำไปแทนที่  $t_{max}$

3. หากมีจำนวนมากกว่า 2 ค่า คู่ลำดับที่  $\hat{f}_h(\hat{D}_m)$  มีค่ามากที่สุด 2 ลำดับแรกจะถูกเลือกขึ้นมาสมมติว่าเป็น  $\hat{D}_1$  และ  $\hat{D}_2$  โดยที่  $\hat{D}_1 < \hat{D}_2$  การแทนที่จะเป็นในรูปแบบเดียวกับกรณีที่มีจำนวน 2 ค่า

นอกจากนี้ในขณะที่ทำการกำหนดค่า  $t_{min}$  และ  $t_{max}$  จะทำการเก็บค่าถ่วงน้ำหนัก  $w_{min}$  และ  $w_{max}$  โดยกำหนดให้เท่ากับค่า  $\hat{f}_h(\hat{D}_m)$  ที่สัมพันธ์กับค่าฐานนิยม  $\hat{D}_m$  ที่ถูกนำไปแทนที่  $t_{min}$  หรือ  $t_{max}$  แต่ในกรณีที่ค่ากำหนดช่วงไม่ถูกแทนที่ ค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้นจะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่  $\epsilon$  ที่น้อยมากๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้คือคู่ลำดับ  $(t_{min}, w_{min})$  และ  $(t_{max}, w_{max})$

การคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่

เมื่อได้คู่ลำดับ  $(t_{i,min}, w_{i,min})$  และ  $(t_{i,max}, w_{i,max})$  ของแต่ละจุดสี  $C_i$  แล้ว คู่ลำดับค่ากำหนดช่วงของทุกจุดสีรอบข้างในหน้าต่าง  $SW_i$  จะถูกนำมาคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ค่ากำหนดช่วงมีความราบเรียบดังสมการ

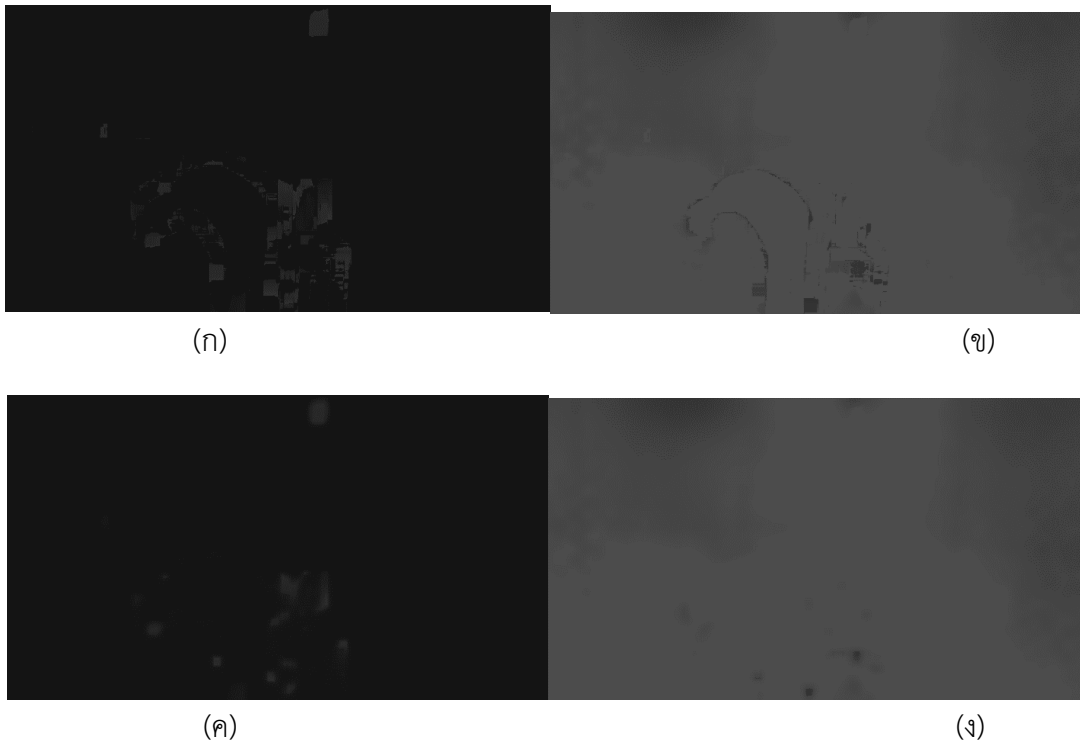
$$t_{i,\{min,max\}} = \frac{\sum_{j \in SW_i} w_{j,\{min,max\}} t_{j,\{min,max\}}}{\sum_{j \in SW_i} w_{j,\{min,max\}}}$$

กระบวนการทั้ง 3 ขั้นตอนนี้จะถูกนำไปใช้กับทุกจุดสีในภาพเพื่อหาค่า  $t_{min}$  และ  $t_{max}$  ที่เหมาะสมเฉพาะที่ แล้วจึงนำค่า  $t_{min}$  และ  $t_{max}$  ที่ได้ไปคำนวณหาค่าความทึบเพื่อทำการแยกฉากหลังต่อไป

ตัวอย่างผลลัพธ์การปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่สำหรับข้อมูลขาเข้ารูป 21 แสดงในรูป 22 โดย (ก) แสดงค่า  $t_{min}$  และ (ข) แสดงค่า  $t_{max}$  จะเห็นได้ว่าเกิดความไม่ต่อเนื่องในการปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในผลลัพธ์การแยกฉากหลัง จึงอาศัยการทำให้ราบเรียบด้วยวิธีการหาผลรวมถ่วงน้ำหนักกับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่ของจุดสีรอบข้างในหน้าต่าง  $SW_i$  ได้ผลลัพธ์ดังรูป 22 (ค) และ (ง) ตามลำดับ



รูป 21 ภาพข้อมูลขาเข้าตัวอย่างสำหรับขั้นตอนวิธี KDE



รูป 22 ผลลัพธ์การปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่

### กระบวนการทำงานของขั้นตอนวิธี

กระบวนการทำงานสามารถอธิบายได้ด้วยรหัสเทียมดังนี้

รหัสเทียม LocalThresholdComputation( $C, t_{min}, t_{max}$ )

```

1  for each  $C_i$  in  $C$ 
2    compute  $D_i$ 
3    for  $D_s$  in  $[-0.1, 0.5]$ 
4      compute  $K(D_i - D_s)$ 
5      compute  $K'(D_i - D_s)$ 
6    end for
7  end for each
8  for each  $C_i$  in  $C$ 
9    set of modes =  $\emptyset$ 
10   for  $D_s$  in  $[-0.1, 0.5]$ 
11      $\hat{f}_h(D_s) = 0$ 
12      $\hat{f}'_h(D_s) = 0$ 
13     for each  $C_j$  in  $W_i$ 
14        $\hat{f}_h(D_s) = \hat{f}_h(D_s) + K(D_j - D_s)$ 
15        $\hat{f}'_h(D_s) = \hat{f}'_h(D_s) + K'(D_j - D_s)$ 
16     end for each
17     if  $\hat{f}'_h(D_{s-1}) > 0$  and  $\hat{f}'_h(D_s) \leq 0$ 
18       compute  $\hat{D}$ 
19       compute  $\hat{f}_h(\hat{D})$ 
20       if  $\hat{D} > t_{min}$  and  $\hat{D} < t_{max}$ 
21         insert  $(\hat{D}, \hat{f}_h(\hat{D}))$  into set of modes
22       end if
23     end if
24   end for
25   set of modes = SortDecending(set of modes)
26    $(\hat{D}_1, \hat{f}_h(\hat{D}_1)) = \text{set of modes}[0]$ 
27    $(\hat{D}_2, \hat{f}_h(\hat{D}_2)) = \text{set of modes}[1]$ 
28    $(t_{i,min}, w_{i,min}) = (t_{min}, \varepsilon)$ 
29    $(t_{i,max}, w_{i,max}) = (t_{max}, \varepsilon)$ 
30   if length(set of modes) == 1
31     if  $\hat{D}_1 - t_{min} < t_{max} - \hat{D}_1$ 
32        $(t_{i,min}, w_{i,min}) = (\hat{D}_1, \hat{f}_h(\hat{D}_1))$ 
33     else
34        $(t_{i,max}, w_{i,max}) = (\hat{D}_1, \hat{f}_h(\hat{D}_1))$ 
35     end if

```

```

36   else if length(set of modes) > 1
37       ( $t_{i,min}, w_{i,min}$ ) = ( $\hat{D}_1, \hat{f}_h(\hat{D}_1)$ )
38       ( $t_{i,max}, w_{i,max}$ ) = ( $\hat{D}_2, \hat{f}_h(\hat{D}_2)$ )
39   end if
40 end for each
41 for each  $C_i$  in  $C$ 
42      $sum_{wt,\{min,max\}} = \{0,0\}$ 
43      $sum_{w,\{min,max\}} = \{0,0\}$ 
44     for each  $C_j$  in  $SW_i$ 
45          $sum_{wt,\{min,max\}} = sum_{wt,\{min,max\}} + w_{j,\{min,max\}}t_{j,\{min,max\}}$ 
46          $sum_{w,\{min,max\}} = sum_{w,\{min,max\}} + w_{j,\{min,max\}}$ 
47     end for each
48      $t_{i,\{min,max\}} = sum_{wt,\{min,max\}}/sum_{w,\{min,max\}}$ 
49 end for each

```

การประมาณความหนาแน่นคอร์เนลของค่าสีเขียว  $D_{W_i}$  ของจุดสีที่อยู่ในหน้าต่าง  $W_i$  ล้อมรอบจุดสี  $C_i$  และการปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่  $t_{i,min}$  และ  $t_{i,max}$  จะถูกคำนวณที่ทุกๆ จุดสี  $C_i$  ในภาพ ซึ่งจะเห็นได้ว่าทุกจุดสีนั้นจะต้องมีการคำนวณค่าสีเขียว  $D_j$ ,  $K(D_j - D_s)$  และ  $K'(D_j - D_s)$   $|j \in W_i$  เพื่อนำมาทำการประมาณความหนาแน่นคอร์เนล โดยค่า  $D_s$  ถูกแบ่งเป็นช่วงเต็มหน่วยจำนวน 32 ช่วงระหว่าง  $[-0.1, 0.5]$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าการคำนวณที่ซ้ำซ้อนเนื่องจากหน้าต่างของจุดสีที่อยู่ติดกันมีการทับซ้อน ดังนั้นค่า  $D_i$ ,  $K(D_i - D_s)$  และ  $K'(D_i - D_s)$  จะถูกคำนวณเก็บไว้ก่อนสำหรับทุกจุดสี  $C_i$  เพื่อลดการคำนวณที่ซ้ำซ้อนดังแสดงในรหัสเทียมบรรทัดที่ 1 - 7

เมื่อได้ค่า  $K(D_i - D_s)$  และ  $K'(D_i - D_s)$  สำหรับทุกจุดสี  $C_i$  แล้วจึงทำการหาผลรวมเพื่อหาการประมาณความหนาแน่นคอร์เนล  $\hat{f}_h(D_s)$  และอนุพันธ์ลำดับที่ 1  $\hat{f}'_h(D_s)$  ตามลำดับ โดยจะใช้ขั้นตอนวิธีการไล่ค่า  $D_s$  ตั้งแต่  $t_{min}$  ถึง  $t_{max}$  ที่ลงรอยกับค่าในช่วงเต็มหน่วยจำนวน 32 ช่วงระหว่าง  $[-0.1, 0.5]$  จนได้คู่ลำดับ  $(\hat{D}_m, \hat{f}_h(\hat{D}_m))$  ของทุกฐานนิยมดังแสดงในรหัสเทียมบรรทัดที่ 8 - 24 และอธิบายในหัวข้อ การประมาณความหนาแน่นคอร์เนล หลังจากนั้นจึงนำทุกคู่ลำดับ  $(\hat{D}_m, \hat{f}_h(\hat{D}_m))$  ไปทำการปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่ดังแสดงในรหัสเทียมบรรทัดที่ 25 - 40 และอธิบายในหัวข้อ การปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่

ตัวอย่างผลลัพธ์การปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่สำหรับข้อมูลขาเข้ารูป 21 แสดงในรูป 22 โดย (ก) แสดงค่า  $t_{min}$  และ (ข) แสดงค่า  $t_{max}$  จะเห็นได้ว่าการเกิดความไม่ต่อเนื่องในการปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในผลลัพธ์การแยกฉากหลัง จึงอาศัยการทำให้ราบรื่นด้วยวิธีการหาผลรวมถ่วงน้ำหนักกับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่ของจุดสีรอบข้างในหน้าต่าง  $SW_i$  ดังแสดงในรหัสเทียมบรรทัดที่ 41 -

49 และอธิบายในหัวข้อ การคำนวณค่าถัวเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักสำหรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่ได้ผลลัพธ์ดังรูป 22 (ค) และ (ง) ตามลำดับ

### ขั้นตอนวิธีการใช้ข้อมูลความลึก

ข้อมูลความลึกนั้นถูกนำมาใช้เพื่อแยกความแตกต่างของตำแหน่งใน 3 มิติระหว่างฉากหลังที่เป็น (หรือถูกประมาณเป็น) ระนาบและจุดสีพื้นหน้าที่มีความห่างจากระนาบด้วยระยะที่ถูกกำหนดด้วยค่าคงที่ โดยมีสมมติฐานที่ว่าฐานนิยมของกลุ่มสีพื้นหน้าที่อยู่ห่างจากระนาบของฉากหลังเมื่อถูกกำหนดค่าให้กับ  $t_{min}$  และฐานนิยมของกลุ่มสีฉากหลังที่อยู่บนระนาบของฉากหลังเมื่อถูกกำหนดค่าให้กับ  $t_{max}$  แล้วจะสามารถนำมาใช้ร่วมกับการปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยการปรับค่าเริ่มต้นจากผู้ใช้

การใช้ข้อมูลความลึกนั้นจำเป็นต้องแยกตามข้อจำกัดความสามารถของระบบที่จะนำไปใช้งาน โดยจำแนกเป็น 2 ประเภทคือ ระบบที่ไม่มีการติดตามตำแหน่งกล้องและระบบที่มีการติดตามตำแหน่งกล้อง ความแตกต่างหลักของการใช้งานข้อมูลความลึกกับทั้งสองระบบนี้คือ การเทียบมาตรฐาน (calibration) ระหว่างจุดความลึกของกล้องวัดความลึกและจุดสีของกล้องสี โดยสำหรับระบบที่ไม่มีการติดตามตำแหน่งกล้อง การเทียบมาตรฐานจะทำเพียงครั้งเดียว ในขณะที่ระบบที่มีการติดตามตำแหน่งกล้องสีจะต้องทำการเทียบมาตรฐานทุกเฟรมภาพ เพื่อนำไปใช้คำนวณตำแหน่งในสามมิติของแต่ละจุดสีในกล้องสี

### การเทียบมาตรฐานกรอบของกล้องวัดความลึกและกล้องสี

อุปกรณ์กล้องวัดความลึกโดยส่วนใหญ่ภายในจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นกล้องสี และส่วนที่เป็นกล้องวัดความลึก ทั้ง 2 ส่วนนี้จะถูกเทียบมาตรฐานมาเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นถ้าทำการเทียบมาตรฐานระหว่างกล้องสีและกล้องสีภายในกล้องวัดความลึก จะทำให้ได้การทำที่ได้เมทริกซ์การแปลง (Transformation matrix) ระหว่างกล้องสีและกล้องวัดความลึก

ขั้นตอนการเทียบมาตรฐานของกล้องสีด้วยวิธีมาตรฐานจะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การหาค่าพารามิเตอร์ภายใน (Intrinsic parameters) และ การหาค่าพารามิเตอร์ภายนอก (Extrinsic parameters)

ค่าพารามิเตอร์ภายในของกล้องสีและกล้องสีภายในกล้องวัดความลึกจะประกอบไปด้วย ความยาวโฟกัส (Focal length) จุดกึ่งกลางภาพ (Principal point) และ ความบิดงอของภาพ (Distortion) สำหรับวิธีการจะใช้ตารางหมากรูกที่รู้ขนาดระยะห่างของแต่ละช่องแล้วมาหาพารามิเตอร์ภายในโดยใช้ OpenCV

ค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องสีและกล้องสีภายในกล้องวัดความลึกจะเป็นเมทริกซ์การแปลงระหว่างแต่ละกล้องเทียบกับตารางหมากรูก สำหรับวิธีการจะใช้ตารางหมากรูกมาวางไว้ทั้งด้านหน้ากล้องสีและกล้องสีภายในกล้องวัดความลึก ให้กล้องทั้งสองมองเห็นตารางหมากรูกร่วมกันได้เต็มแผ่น

กำหนดให้

$\{F_P\}$  แทนกรอบอ้างอิงของกระดานหมากรูก

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

$\{F_D\}$  แทนกรอบอ้างอิงของกล้องวัดความลึก (ใช้กล้องสีภายในกล้องวัดความลึกเป็นตัวแทน)

$\{F_C\}$  แทนกรอบอ้างอิงของกล้องสี

จากนั้นจึงหาเมทริกซ์การแปลงของ  $\{F_D\}$  เทียบกับ  $\{F_P\}$  คือ  ${}^P_D T$  และเมทริกซ์การแปลงของ  $\{F_C\}$  เทียบกับ  $\{F_P\}$  คือ  ${}^P_C T$  ด้วยวิธีมาตรฐานจากลวดลายของตารางหมากรุกโดยใช้ OpenCV แต่เป้าหมายคือต้องการหาพารามิเตอร์ภายนอกระหว่างกล้องสีเทียบกับกล้องวัดความลึก นั่นคือการหาเมทริกซ์การแปลงของ  $\{F_C\}$  เทียบกับ  $\{F_D\}$  คือ  ${}^D_C T$  ซึ่งสามารถหาได้จาก  ${}^D_C T = ({}^P_D T)^{-1} {}^P_C T$  นั่นเอง โดยในกรณีที่ใช้งานกับระบบที่ไม่ติดตามตำแหน่งกล้อง  ${}^P_C T$  จะคงที่ ในขณะที่ระบบที่มีการติดตามตำแหน่งกล้อง  ${}^P_C T$  จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าซึ่งเป็นตัวแปรขาเข้าที่ได้รับจากระบบติดตามตำแหน่งกล้อง หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณหาตำแหน่งสามมิติ  $(x_i, y_i, z_i)$  ของแต่ละจุดสี  $C_i$

### การประมาณระนาบฉากหลังด้วยข้อมูลความลึก

เมื่อได้คู่ของสีและตำแหน่งในสามมิติของแต่ละจุดสีแล้ว ขั้นตอนวิธีถัดไปจะนำตำแหน่งใน 3 มิติไปประมาณระนาบของฉากหลัง โดยระนาบของฉากหลังนี้อ้างอิงกับกรอบของฉากหลังเองซึ่งตั้งอยู่กับที่เสมอและทำเพียงครั้งเดียว อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของฉากหลังที่ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นมีความแตกต่างกันตามจำนวนระนาบตั้งแต่หนึ่งระนาบ สองระนาบ จนถึงผิวโค้ง ซึ่งผิวโค้งสามารถถูกประมาณได้ด้วยระนาบจำนวนหนึ่ง ซึ่งการประมาณระนาบนั้นสามารถทำได้โดยใช้วิธี RANSAC ด้วย OpenCV

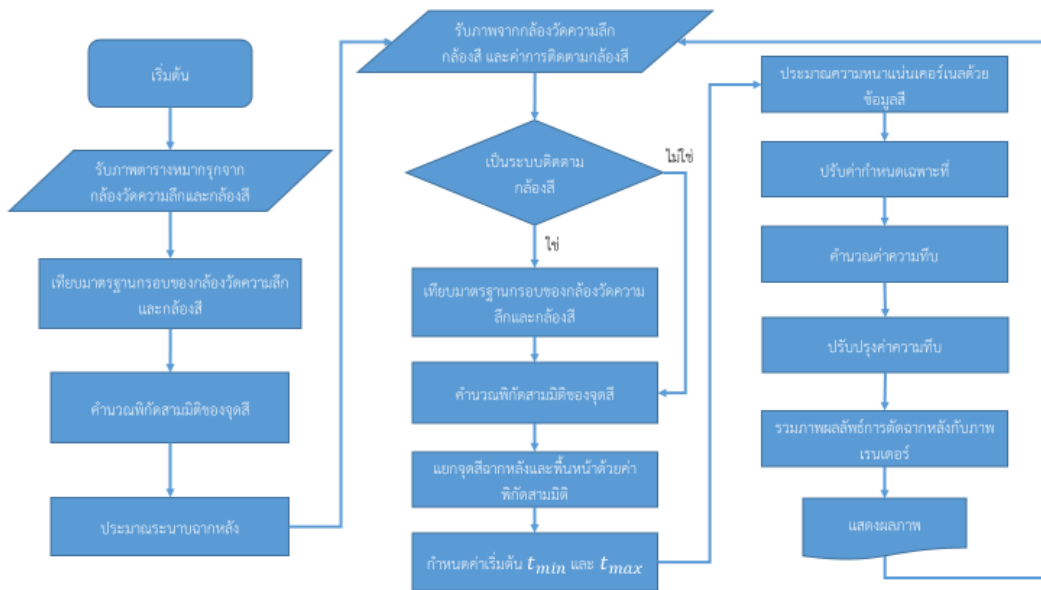
### การกำหนดค่าเริ่มต้นของค่า $t_{min}$ และ $t_{max}$

เมื่อได้ระนาบของฉากหลังแล้วขั้นตอนวิธีจะทำการจำแนกฉากหลังและพื้นหน้าด้วยวิธีกำหนดช่วงระยะห่างระหว่างจุดสีและระนาบของฉากหลัง โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มสีฉากหลังและกลุ่มสีพื้นหน้า แต่ละกลุ่มจะถูกนำมาคำนวณการประมาณความหนาแน่นเคอร์เนลของค่า  $D_i$  จากทุกจุดสีในกลุ่มเพื่อหาฐานนิยมด้วยขั้นตอนวิธีเดียวกับที่นำเสนอในหัวข้อการประมาณความหนาแน่นเคอร์เนล โดยฐานนิยมของกลุ่มสีพื้นหน้าจะถูกกำหนดค่าให้กับ  $t_{min}$  และฐานนิยมของกลุ่มสีฉากหลัง  $t_{max}$  ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะถูกนำไปเป็นค่าเริ่มต้นเพื่อใช้กับการปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่สำหรับภาพทุกเฟรมดังอธิบายในหัวข้อ การปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่

### ผังงาน

ขั้นตอนวิธีในบทนี้ได้นำเสนอไปแล้วนั้น ในภาพรวมได้ถูกสรุปไว้ผังงานในรูป 23 โดยขั้นตอนโดยรวมจะเริ่มที่การเทียบมาตรฐานระหว่างกล้องวัดความลึกและกล้องสีก่อน (หัวข้อ การเทียบมาตรฐานกรอบของกล้องวัดความลึกและกล้องสี) แล้วจึงนำมาประมาณหาระนาบของฉากหลัง (หัวข้อ การประมาณระนาบฉากหลังด้วยข้อมูลความลึก) โดยทำเพียงครั้งเดียวและจะทำใหม่เมื่อมีการเปลี่ยนกล้องหรือมีการเปลี่ยนตำแหน่งของกล้องวัดความลึกเท่านั้น หลังจากนั้นจึงเข้าวงวนของการใช้งานจริงโดยเริ่มที่การรับภาพ

ความลึกและภาพสี แยกกรณีการคำนวณพิกัดในสามมิติของจุดสีตามความสามารถของระบบติดตามกล้องสี เมื่อได้ตำแหน่งในสามมิติของจุดสีมาแล้วจึงทำการแยกจุดสีพื้นหน้าและจุดสีพื้นหลังด้วยระยะห่างจากระนาบฉากหลังเพื่อคำนวณค่าเริ่มต้นของ  $t_{min}$  และ  $t_{max}$  (หัวข้อ การกำหนดค่าเริ่มต้นของค่า  $t_{min}$  และ  $t_{max}$ ) หลังจากนั้นจะทำการพิจารณาเฉพาะข้อมูลสีเพื่อทำการปรับค่ากำหนดเฉพาะที่  $t_{i,min}$  และ  $t_{i,max}$  สำหรับแต่ละจุดสี  $C_i$  (หัวข้อ การปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่) แล้วจึงนำค่า  $t_{i,min}$  และ  $t_{i,max}$  ไปคำนวณหาค่าความทึบเพื่อนำไปปรับปรุงค่าความทึบแล้วจึงทำการรวมผลภาพ แสดงผล แล้วกลับเข้าสู่วงวนการรับภาพความลึกและภาพสีต่อไป

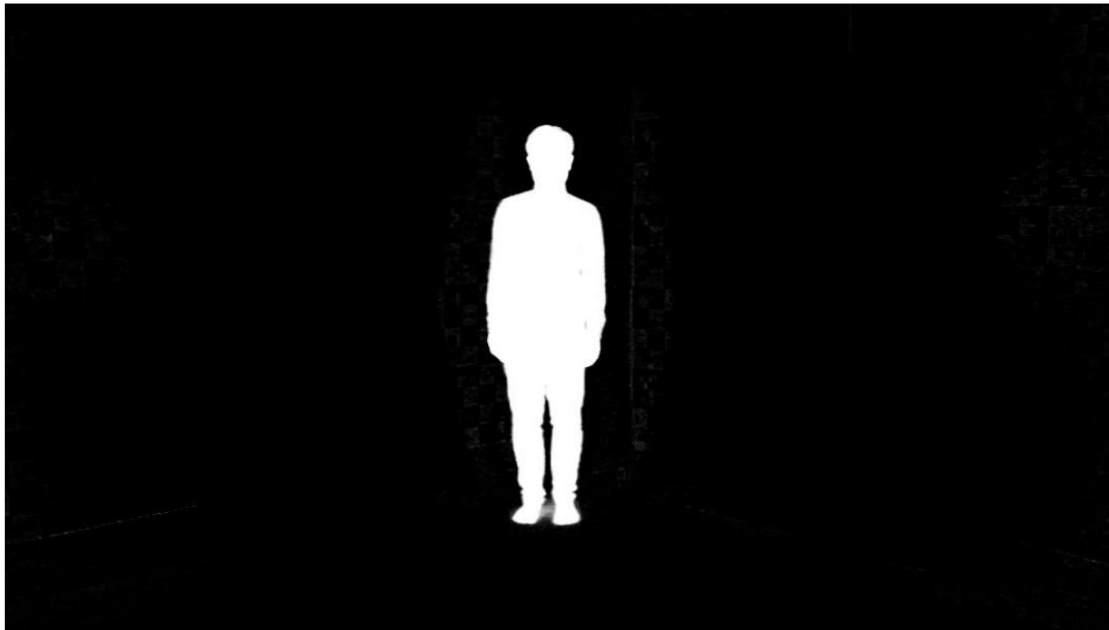


รูป 23 ผังงานการแยกฉากหลัง

## บทที่ 6

### การปรับปรุงค่าความทึบด้วยตัวกรองแบบนำทาง

จากการทดลองเบื้องต้นนั้น การนำเอาหลักการ Kernel Density Estimation (KDE) มาช่วยในการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของวิธีการ Color Different นั้น ถึงแม้จะให้ผลลัพธ์ที่มีค่า RMS Error ที่ขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ Color Different เพียงอย่างเดียว แต่ก็ยังมีจุดที่สามารถมองออกได้ด้วยตาเปล่าว่าผลลัพธ์ที่ได้ยังมีความผิดพลาดอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่เงาของนักแสดงตกกระทบกับพื้นหรือผนังส่วนที่เป็นฉากหลัง การปรับค่าพารามิเตอร์ ไม่ว่าจะด้วยมือหรือว่าผ่านการปรับปรุงด้วย KDE นั้นก็ยังไม่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ดังตัวอย่างในรูป 24



รูป 24 ผลลัพธ์ค่าทึบแสงจากการใช้วิธี Color Different ที่ปรับปรุงด้วยวิธี Kernel Density Estimation ให้สังเกตจุดที่มีความผิดพลาดบริเวณเท้าของนักแสดง

ปัญหาดังกล่าวคือความไม่ราบเรียบ (non-smoothness) ของค่าทึบแสง ทางคณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาเพิ่มเติมและได้แนวคิดการนำเอาตัวกรองมาปรับค่าทึบแสงให้มีความราบเรียบมากยิ่งขึ้น แต่ยังคงรักษาแนวโน้มของค่าที่ถูกต้องไว้ด้วย ตัวกรองที่ได้ศึกษาเพิ่มเติมนั้นมีหลายแบบ โดยแบบที่นำมาพัฒนาต่อคือตัวกรองแบบนำทาง ซึ่งเป็นตัวกรองที่สามารถรักษาเส้นขอบของต้นแบบไว้ได้ โดยใช้ข้อมูลเส้นขอบตั้งต้นเป็นตัวนำทาง และยังคงรักษาความราบเรียบของข้อมูลในลักษณะเดิมไว้ได้ การนำเอาตัวกรองแบบนำทางมาใช้ในโครงการนี้จะมีข้อมูลเข้าคือข้อมูลค่าทึบแสงที่ต้องการจะปรับปรุง และใช้ข้อมูลภาพสี (ซึ่งเป็นข้อมูลนำเข้าของขั้นตอนวิธี Color Different ที่ปรับปรุงขึ้นอยู่แล้ว) มาเป็นข้อมูลในการนำทาง สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ต้องใช้นั้นได้แก่ ค่าความกว้างยาวของหน้าต่าง และค่าที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นมีความสม่ำเสมอ โดยตัวกรองนี้จะให้ข้อมูลขาออกคือภาพความทึบที่มีความราบรื่นและรักษาสภาพความเป็นเส้นขอบไว้ได้ รายละเอียดของวิธีการดังกล่าวนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



## การใช้ตัวกรองแบบนำทาง (Guided Filter) เพื่อทำให้ค่าความทึบมีความราบรื่น

งานวิจัยในรายงานฉบับนี้ได้้นำตัวกรองแบบนำทางมาใช้เพื่อทำให้ค่าความทึบมีความราบรื่น โดยภาพสีจะถูกนำมาเป็นข้อมูลเพื่อใช้ในการปรับค่าความทึบ เหตุผลหลักของการนำเอาตัวกรองดังกล่าวมาใช้งานนั้นเนื่องมาจากปัญหาที่พบของวิธีการแยกฉากหลังที่ได้พัฒนามาก่อนหน้านั้น รวมถึงแนวทางในการนำเสนอที่ต้องการปรับพารามิเตอร์ให้ดียิ่งขึ้นด้วย KDE คือการที่การแยกฉากหลังนั้นมีความ “รุนแรง” ของการแยกไม่เหมาะสม กล่าวคือ ถ้าเราตั้งความ “รุนแรง” ในการปรับแยกให้สูงเกินไป จุดที่เป็นวัตถุด้านหน้าที่มี “ค่าความต่าง” ต่อฉากหลัง (ซึ่งในงานวิจัยปัจจุบันใช้หลักการ Color Different มาเป็นตัวระบุความต่าง) ต่ำกว่าความรุนแรงก็จะโดนแยกออกมาเป็นฉากหลัง แต่ถ้าตั้งความรุนแรงสูงเกินไป ส่วนฉากหลังที่มีสีแตกต่างจากค่าที่ตั้งไว้ก็จะไม่โดนกรอง ซึ่งความต่างดังกล่าวนี้เป็นเรื่องปรกติอยู่แล้วของการใช้งานจริง เนื่องจากสภาพแสงต่าง ๆ (เช่น แสงไฟฉากหลังที่ไม่สม่ำเสมอ) ทำให้ฉากหลังบางตำแหน่งมีค่าสีแตกต่างกันเป็นอย่างมาก หรือเงาของนักแสดงที่ตกกระทบไปบนฉาก ทำให้ฉากมีสีที่เปลี่ยนไป หรือเช่นตัวของนักแสดงที่โดนสีจากฉากมาตกกระทบ ทำให้ตัวนักแสดงมีสีของฉากหลังปนเปื้อนเข้ามา) ซึ่งจุดที่มีความผิดพลาดเหล่านี้มักเกิดขึ้นบริเวณที่เป็นขอบของนักแสดง

แนวทางที่พัฒนาเพิ่มเติมขึ้นนั้นคือการนำเอาวิธีการอื่นเพิ่มเข้ามาเพื่อรักษาความเป็นขอบดังกล่าวไว้ได้ ซึ่งผู้วิจัยได้พบว่า ตัวกรองที่มีเป้าหมายดังกล่าวและมัลักษณะตรงกับความต้องการของระบบคือตัวกรองแบบนำทาง (Guided Filter) ถึงแม้ว่าจะมีตัวกรองอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบหรือระบุขอบของวัตถุจะมีอีกหลายตัวกรอง (เช่น Canny Edge Detector, Sobel, etc.) แต่ Guided Filter นั้นเป็นการผสมผสานของข้อมูลสองกลุ่มคือ Bias ที่ต้องการรักษาไว้ กับ Trend ที่เราต้องการ ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงเลือกตัวกรองดังกล่าวมา นอกจากนี้การเลือกใช้ Guided Filter ดังกล่าวยังมีพื้นฐานมาจากการที่คณะผู้วิจัยได้ทดลองใช้ตัวกรองต่าง ๆ มาช่วยในการปรับแต่งแล้ว พบว่า Guided Filter นั้นให้ผลดีที่สุด

## นิยามปัญหา

การใช้ตัวกรองแบบนำทางเพื่อทำให้ค่าความทึบมีความราบเรียบ โดยมีข้อมูลขาเข้าคือภาพสี  $C$  ภาพความทึบที่ได้จากการปรับค่ากำหนดช่วงเฉพาะที่  $\alpha_{in}$  ความกว้างยาวของหน้าต่าง  $r$  และค่าที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นมีความสม่ำเสมอ  $\epsilon$  ข้อมูลขาออกคือภาพความทึบที่มีความราบเรียบและรักษาสภาพความเป็นเส้นขอบ  $\alpha_{out}$

## การใช้ตัวกรองแบบนำทางเพื่อทำให้ค่าความทึบมีความราบเรียบ

งานวิจัยในรายงานฉบับนี้ได้ นำตัวกรองแบบนำทางมาใช้เพื่อทำให้ค่าความทึบมีความราบเรียบ โดยภาพสีจะถูกนำมาเป็นข้อมูลเพื่อใช้ในการปรับค่าความทึบ

ตัวกรองแบบนำทางได้ถูกนำเสนอไว้ใน [He13] โดยอาศัยหลักการของตัวแบบเชิงเส้นเฉพาะที่ (local linear model) ระหว่างภาพนำทาง  $C$  และภาพผลลัพธ์  $\alpha_{out}$  โดยยึดกับข้อสมมติที่ว่า  $\alpha_{out}$  ได้จากการแปลงเชิงเส้นของ  $C$  ในหน้าต่าง  $\omega_k$  ที่มีจุดสี  $C_k$  เป็นจุดกึ่งกลาง ดังสมการ

$$\alpha_{out,i} = a_k C_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (1)$$

เมื่อ  $a_k, b_k$  แทนค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นที่จะคงที่สำหรับแต่ละหน้าต่าง  $\omega_k$  ซึ่งการแปลงเชิงเส้นนี้จะรักษาสภาพความเป็นเส้นขอบของ  $\alpha_{out}$  สอดคล้องตามสภาพความเป็นเส้นขอบของ  $C$  เนื่องจาก

$$\nabla \alpha_{out} = a \nabla C \quad (2)$$

เพื่อที่จะหาค่า  $a_k, b_k$  จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขจากภาพความทึบขาเข้า  $\alpha_{in}$  และความสัมพันธ์ร่วมกับภาพความทึบขาออก  $\alpha_{out}$  โดยใช้รูปแบบที่ว่ามีสัญญาณรบกวน  $n$  เกิดขึ้นและต้องการลบออกจาก  $\alpha_{in}$  ดังสมการ

$$\alpha_{out,i} = \alpha_{in,i} - n_i \quad (3)$$

ซึ่งเป็นสมการที่จะนำมาใช้เพื่อหาค่าน้อยที่สุดของ  $n_i$  โดยที่ยังอยู่ในเงื่อนไขการแปลงเชิงเส้นในสมการ (1) ด้วยเงื่อนไขเหล่านี้ปัญหาการหาค่า  $a_k, b_k$  ที่ทำให้ได้ค่าน้อยที่สุดของ  $n_i$  สามารถแปลงให้อยู่ในรูปฟังก์ชันต้นทุน

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k C_i + b_k - \alpha_{in,i})^2 + \epsilon a_k^2) \quad (4)$$

ซึ่งมี  $\epsilon$  เป็นค่าที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น  $a_k$  มีค่าไม่มากจนเกินไป โดยฟังก์ชันนี้อยู่ในรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นแบบสัน (linear ridge regression) ที่สามารถหาคำตอบได้จาก

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} C_i \alpha_{in,i} - \mu_k \bar{\alpha}_{in,k}}{\sigma_k^2 + \epsilon} \quad (5)$$

$$b_k = \bar{\alpha}_{in,k} - a_k \mu_k \quad (6)$$

เมื่อ  $\mu_k$  และ  $\sigma_k^2$  คือค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของค่าจุดสีบน  $C$  ใน  $\omega_k$  และ  $\bar{\alpha}_{in,k} = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} \alpha_{in,i}$  คือค่าเฉลี่ยของค่าจุดสีบน  $\alpha_{in}$  ใน  $\omega_k$  เมื่อได้ค่า  $a_k$  และ  $b_k$  ก็จะสามารถหาค่า  $\alpha_{out,i}$  ได้จากสมการ (1)

อย่างไรก็ดีจากการคำนวณจะเห็นว่าการคำนวณแต่ละ  $\alpha_{out,i}$  จะมีหน้าต่าง  $\omega_k$  หลายหน้าต่างที่มีดัชนี  $i$  เป็นสมาชิกซึ่งแต่ละหน้าต่างจะทำให้เกิดค่า  $\alpha_{out,i}$  ที่แตกต่างกัน จึงต้องอาศัยการหาค่าเฉลี่ยของค่า  $\alpha_{out,i}$  สำหรับทุกหน้าต่าง  $\omega_k$  ที่มีดัชนี  $i$  เป็นสมาชิก ดังสมการ

$$\alpha_{out,i} = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k | i \in \omega_k} (a_k C_i + b_k) \quad (7)$$

ซึ่งจะเห็นได้จากความสมมาตรของหน้าต่างว่า  $\sum_{k | i \in \omega_k} a_k = \sum_{k \in \omega_i} a_k$  สมการ (7) จึงสามารถถูกเขียนใหม่ได้เป็น

$$\alpha_{out,i} = \bar{a}_i C_i + \bar{b}_i \quad (8)$$

เมื่อ  $\bar{a}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} a_k$  และ  $\bar{b}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} b_k$  คือค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์เชิงเส้นของหน้าต่าง  $\omega_k$  ที่มีดัชนี  $i$  เป็นสมาชิก

อย่างไรก็ดีการปรับค่า  $\alpha_{out,i}$  ตามสมการ (7) และ (8) ทำให้คุณสมบัติในสมการ (2) เสียไป แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่าเกรเดียนต์บริเวณที่เป็นเส้นขอบก็ยังสามารถคงอยู่ได้และมีค่ามากกว่าบริเวณที่ไม่ใช่เส้นขอบ จึงสามารถกล่าวโดยประมาณได้ว่า  $\nabla \alpha_{out} \approx a \nabla C$

ทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นนั้นอธิบายในกรณีที่  $C$  และ  $\alpha_{in}$  มีเพียง 1 ช่องสี แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้  $C$  ที่มี 3 ช่องสีและสมมติว่าแต่ละช่องสีไม่ขึ้นต่อกันดังนั้นการคำนวณหาค่า  $a_k$  ในสมการ (5) สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงโดยแยกคำนวณแต่ละช่องสีและนำมารวมกันเป็นเวกเตอร์

$$\mathbf{a}_k = (a_{k,r}, a_{k,g}, a_{k,b})^T \quad (9)$$

ค่า  $b_k$  คำนวณได้ดังนี้

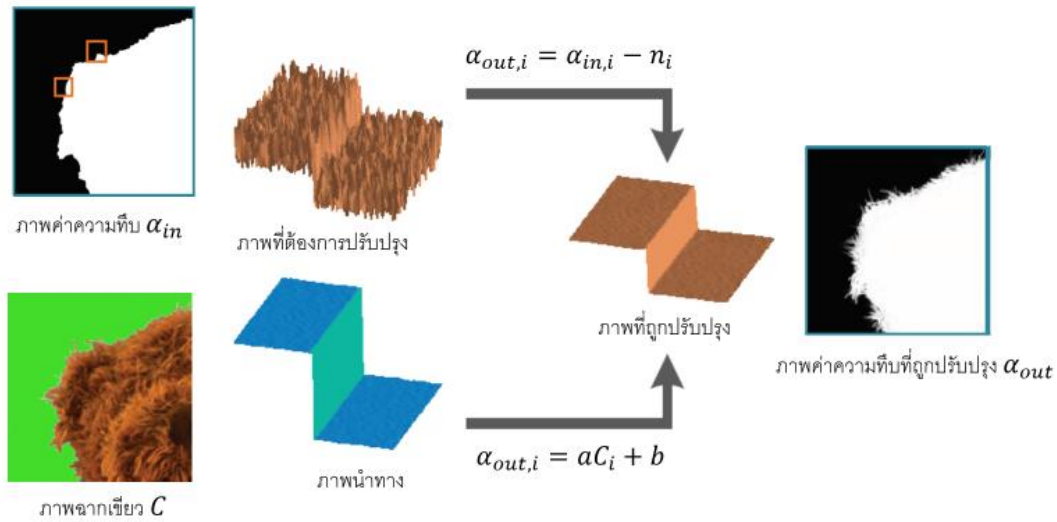
$$b_k = \bar{\alpha}_{in,k} - \mathbf{a}_k^T \mu_k \quad (10)$$

และ  $\alpha_{out,i}$  คำนวณได้จาก

$$\alpha_{out,i} = \bar{\mathbf{a}}_k^T C_i + \bar{b}_i \quad (11)$$

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

การแก้ปัญหาความราบเรียบด้วยตัวกรองแบบนำทางสรุปได้ดังรูป 25 โดยมีข้อมูลภาพขาเข้าคือภาพค่าความทึบ  $\alpha_{in}$  ที่ต้องการปรับปรุงให้ราบเรียบ และภาพสีที่ถ่ายจากฉากเขียว  $C$  เพื่อนำมาเป็นภาพนำทาง แล้วจึงผ่านกระบวนการเพื่อให้ได้ภาพค่าความทึบ  $\alpha_{out}$  ที่ถูกปรับปรุงให้ราบเรียบขึ้น



รูป 25 ตัวกรองแบบนำทาง

### กระบวนการทำงานของตัวกรองแบบนำทาง

กระบวนการทำงานของตัวกรองแบบนำทางใช้สมการ (5) (6) และ (8) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยรหัสเทียมดังนี้

#### รหัสเทียม *GuidedFilter*

ข้อมูลขาเข้า  $C, \alpha_{in}, r, \epsilon$

ข้อมูลขาออก  $\alpha_{out}$

- 50  $\text{mean}_C = f_{\text{mean}}(C)$
- 51  $\text{mean}_\alpha = f_{\text{mean}}(\alpha_{in})$
- 52  $\text{corr}_C = f_{\text{mean}}(C .* C)$
- 53  $\text{corr}_{C\alpha} = f_{\text{mean}}(C .* \alpha_{in})$
- 54  $\text{var}_C = \text{corr}_C - \text{mean}_C .* \text{mean}_C$
- 55  $\text{cov}_{C\alpha} = \text{corr}_{C\alpha} - \text{mean}_C .* \text{mean}_\alpha$
- 56  $a = \text{cov}_{C\alpha} ./ (\text{var}_C + \epsilon)$
- 57  $b = \text{mean}_\alpha - a .* \text{mean}_C$
- 58  $\text{mean}_a = f_{\text{mean}}(a)$
- 59  $\text{mean}_b = f_{\text{mean}}(b)$
- 60  $\alpha_{out} = \text{mean}_a .* C + \text{mean}_b$

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

รหัสเทียมนี้จะทำการคำนวณ  $\alpha_{out}$  สำหรับ  $C$  ที่มี 1 ช่องสี ซึ่งสามารถแยกทำเป็นช่องสีเขียว แดง และน้ำเงินเพื่อนำมาคำนวณหาค่าตามสมการ (9) (10) และ (11) ได้ โดยตัวดำเนินการ  $\cdot$  คือตัวดำเนินการเชิงสมาชิก (element – wise operation) ฟังก์ชัน  $f_{mean}$  ใช้เพื่อหาค่าเฉลี่ยของทั้งภาพซึ่งมีความซับซ้อนมากที่สุดในขั้นตอนวิธีและสามารถทำได้ใน  $O(N)$  จึงทำให้ความซับซ้อนในการคำนวณโดยรวมของตัวกรองแบบนำทางอยู่ที่  $O(N)$

## บทที่ 7

### การทดลองวัดประสิทธิภาพ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอใหม่ที่ได้กล่าวถึงในบทก่อนหน้า โดยจะแบ่งการทดลองเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการทดลองเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี Color Difference กับการใช้การประมาณความหนาแน่นเคอร์เนล และส่วนที่สองคือการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการประมาณความหนาแน่นเคอร์เนลกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยตัวกรองนำทาง

#### ข้อมูลตัวอย่างภาพวิดีโอที่ใช้เป็นข้อมูลทดสอบของระบบ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น เราทราบว่า การสุ่มตัวอย่างย่อยของสีเป็นปัจจัยสำคัญ ดังนั้นเราจะทำการเลือกภาพวิดีโอโดยมีตัวแปรต้นคือการสุ่มตัวอย่างย่อยของสี, ประเภทของกล้องวิดีโอ และ ประเภทของการส่งสัญญาณ โดยกำหนดประเภทของวิดีโอเป็นดังตารางต่อไปนี้

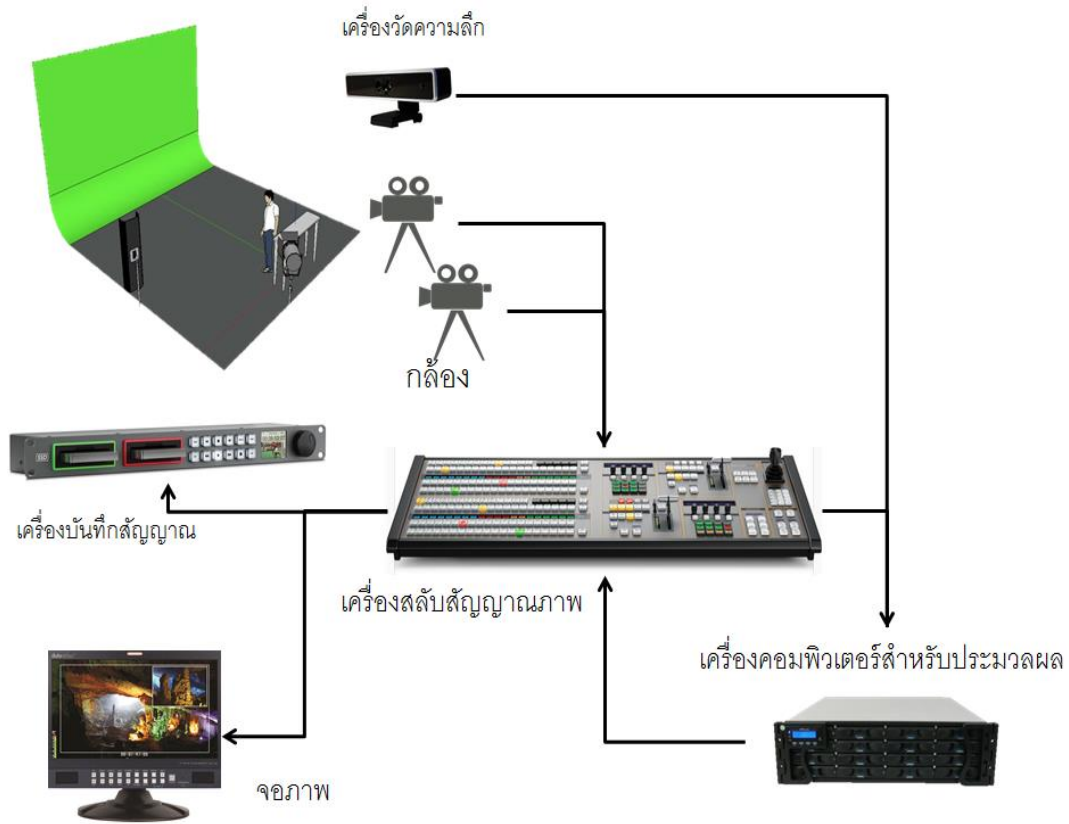
ประเภทของกล้องวิดีโอที่ใช้เก็บภาพวิดีโอ	ความละเอียดของภาพ	ประเภทการส่งสัญญาณ	การสุ่มตัวอย่างย่อยของสี	เซนเซอร์รับภาพ
กล้องวิดีโอคุณภาพสูง URSA Mini 4.6K	Full HD	SDI-12G	4:2:2	Super-35 (25.34mm x 14.25mm)
กล้อง DLSR หรือ Nikon D750	Full HD	HDMI	4:2:2	Full Frame 35mm (35.9mm x 24.0mm)
กล้องวิดีโอคุณภาพทั่วไป Sony VG-NEX30	Full HD	HDMI	4:2:0	Exmor APS HD CMOS sensor (23.5mm x 15.6mm)

#### การดำเนินการเก็บข้อมูล

การดำเนินการนั้นประกอบด้วยสองขั้นตอนหลักก็คือ การจัดเตรียมสถานที่ และ การเก็บข้อมูล โดยทั้งสองขั้นตอนนั้นจะดำเนินการโดยการจ้างเหมา การจัดเตรียมสถานที่นั้นผู้ที่รับจ้างเหมาจะต้องจัดเตรียมสถานที่ให้มีลักษณะดังที่แสดงในรูป 26 ถึง รูป 28 และจะต้องจัดเตรียมอุปกรณ์ประกอบฉากพร้อมด้วยนักแสดงและสภาพแวดล้อมตามปัจจัยที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น พร้อมด้วยค่าความลึกจากอุปกรณ์วัดความลึก ซึ่ง

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

ต้องมีการเปรียบเทียบค่า (Calibration) ไว้เป็นที่เรียบร้อย ซึ่งสิ่งที่ผู้รับจ้างเหมาจะต้องส่งมอบกลับมาคือภาพวิดีโอ พร้อมด้วยค่าความลึก ในปัจจัยต่าง ๆ ตามที่ได้กำหนดไว้

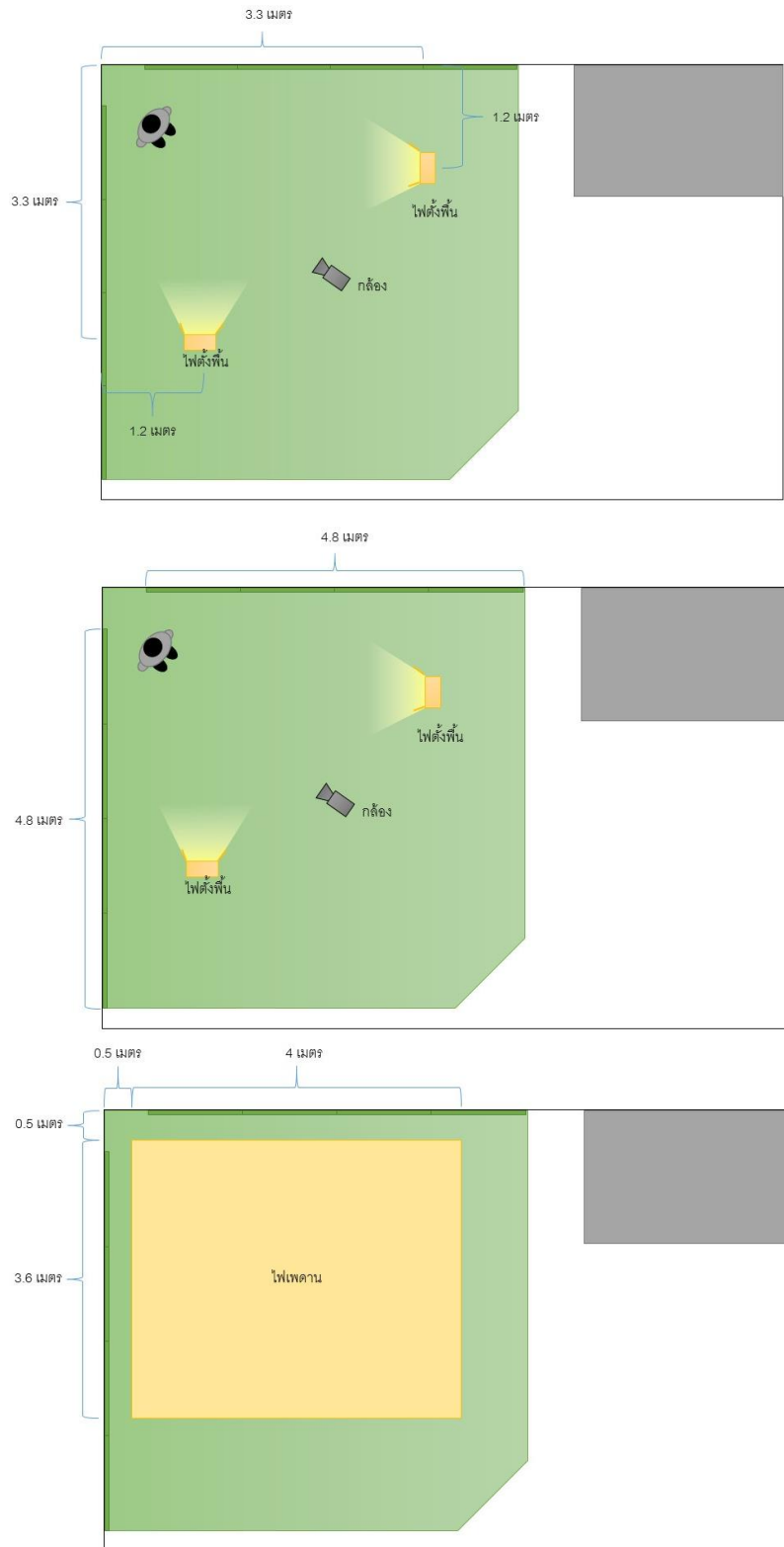


รูป 26 แผนผังอุปกรณ์สำหรับการทดลอง



รูป 27 หลอดไฟติดเพดานแบบ LED และแผงไฟส่องสว่างด้านข้างแบบตั้งพื้น

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก



รูป 28 โครงสร้างห้องถ่ายทำชั่วคราว และตำแหน่งการวางอุปกรณ์



## ปัจจัยในการจัดเก็บข้อมูล

ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของการทำงานของฉากหลัง นอกเหนือไปจากกล้องวิดีโอที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้วนั้นยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีก ได้แก่ สภาพแวดล้อมของฉาก, สภาพของไฟส่องสว่าง และ ขนาดภาพที่ใช้ถ่ายทำ โดยการเก็บข้อมูลนั้นจะต้องเก็บให้ครบในทุกปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ปัจจัยสภาพแวดล้อมของฉากคือลักษณะของฉากที่มีการถ่ายทำ โดยจะใช้ระยะห่างระหว่างฉากหลังมายังนักแสดง ในกรณีที่นักแสดงมาก นักแสดงจะต้องยืนเข้าไปใกล้ฉากหลังมากขึ้น ในกรณีที่นักแสดงเพียงคนเดียว นักแสดงสามารถยืนให้ห่างจากฉากหลังได้มากยิ่งขึ้น ปัจจัยนี้จะส่งผลกระทบต่อสีเขียวที่สะท้อนจากฉากหลังมายังผิวหนังแสดง

ปัจจัยของไฟส่องสว่างนั้นมีความจำเป็นคือการปรับแสงทำให้การแยกสีของฉากหลังนั้นทำได้ลำบาก เราจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบสภาพแสงที่มากเกินไป และ น้อยเกินไปที่ทำให้ประสิทธิภาพของการแยกฉากหลังนั้นไม่สามารถทำได้ดี โดยการทดสอบจะทำกับสภาพแสงสม่ำเสมอ และไม่สม่ำเสมอ

ปัจจัยตัวนักแสดงเอง ซึ่งมีการใส่เสื้อผ้าต่าง ๆ เราจะทำการทดลองด้วยเสื้อผ้าที่แตกต่างกันไป

## การวัดผล

การวัดผลนั้นจะทำโดยนำเอาภาพข้อมูลนำเข้ามาทำการคำนวณค่าความทึบแสงด้วยโปรแกรมคำนวณค่าทึบแสงแบบ Offline ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณมาก แต่ให้ผลที่ดี และปรับแต่งด้วยมือในจุดต่าง ๆ ที่เห็นได้ว่าไม่ถูกต้อง แล้วนำเอาค่าความทึบแสงดังกล่าวมาใช้เป็นคำตอบอ้างอิง (Ground Truth) ผลการทดลองจะทำการเปรียบเทียบค่า RME Error ระหว่างค่าทึบแสงที่คำนวณได้กับคำตอบอ้างอิง

การทดลองทั้งหมดจะกระทำกับภาพนิ่งจำนวนหลาย ๆ ภาพ เนื่องมาจากขั้นตอนการหาคำตอบอ้างอิง (Ground Truth) นั้นต้องใช้แรงงานและเวลาเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยได้จัดทำภาพวีดิทัศน์เปรียบเทียบผลเพื่อทำการตรวจสอบด้วยสายตาเพิ่มเติม โดยมีรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค พร้อมกับได้แนบไฟล์ดังกล่าวมาใน DVD ประกอบรายงานฉบับนี้ด้วย

## การทดลองเปรียบเทียบการใช้การประมาณความหนาแน่นเคอร์เนล

ในส่วนนี้นำเสนอผลการทดลองเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี Color Difference ซึ่งเป็นวิธีที่เลือกมาใช้เป็นขั้นตอนวิธีตั้งต้น เทียบกับขั้นตอนวิธีที่นำเสนอในบทที่ 5 การปรับปรุงขั้นตอนวิธี ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นโดยเพิ่มเติมเทคนิคการประมาณความหนาแน่นเคอร์เนล (KDE) เข้าไป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบว่าขั้นตอนที่พัฒนาขึ้นใหม่นั้นมีผลการทำงานที่ดีกว่าขั้นตอนวิธี Color Difference บนสภาพแวดล้อมต่าง ๆ กัน

### สมมติฐาน

1. ผลลัพธ์ที่ได้จากการขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ (KDE) จะทนต่อสภาพแสงที่ไม่สม่ำเสมอได้ดีกว่าขั้นตอนวิธี Color difference

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

2. เวลาในการทำงานของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ จะใช้เวลาทำงานมากกว่าขั้นตอนวิธี Color difference แต่จะไม่มากไปกว่า 20 มิลลิวินาที (50 ภาพต่อวินาที)

### ตัวแปรต้น

1. กล้อง 2 ตัว ได้แก่ Sony NEX-VG30 และ Blackmagic Design URSA Mini 4.6K Digital Cinema Camera (EF-Mount)
2. สีเสื้อ 2 สี
  - สีดำ แทนกลุ่มของเสื้อที่มีสีเข้ม ที่ไม่ถูกสีเขียวจากฉากหลังสะท้อนใส่
  - สีขาว แทนกลุ่มของเสื้อที่มีสีอ่อน ที่มักถูกสีเขียวจากฉากหลังสะท้อนใส่
3. ระยะฉากหลัง 2 ระยะ (วัดจากมุมสุดของฉากหลัง มาถึงจุดกึ่งกลางนักแสดง)
  - 80 เซนติเมตร แทนระยะใกล้เป็นพิเศษ กรณีที่ต้องการเพิ่มจำนวนนักแสดงในกล้อง หรือพื้นที่ห้องจำกัด
  - 160 เซนติเมตร แทนระยะมาตรฐานที่ใช้ในการถ่ายทำปกติ
4. สภาพแสง 2 แบบ
  - แสงสม่ำเสมอ แทนแสงไฟที่ถูกจัดอย่างเหมาะสมสำหรับการถ่ายทำ
  - แสงไม่สม่ำเสมอ แทนกรณีที่มีเฉพาะแสงไฟตั้งพื้นสำหรับส่องนักแสดงเท่านั้น
5. ขั้นตอนวิธี วิธี 2
  - Color difference
  - Our method

### ตัวแปรตาม

1. RMS Error ของ Alpha ของแต่ละขั้นตอนวิธีโดยมีเปรียบเทียบกับ Ground truth จากการสร้างด้วยคน ซึ่งบอกกว่าส่วนนั้นควรมีค่า Alpha ที่ถูกต้องเป็นเท่าไร
2. เวลาที่ใช้ในการประมวลผล

### ตัวแปรควบคุม

1. ตำแหน่งอุปกรณ์ทั้งหมด คือ ฉากหลัง กล้องวิดีโอ ไฟส่องสว่าง ถูกกำหนดไว้ที่ตำแหน่งเดิมตลอดการทดลองตามรูป 28
2. การตั้งค่าของกล้องถูกกำหนดไว้เท่าเดิมตลอดการทดลอง ดังนี้
  - a. กล้อง Sony NEX-VG30
    - i. สมดุลแสงขาวที่ (White balance): 5600 เคลวิน

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

- ii. อัตราการขยายสัญญาณ (Gain): 3 เดซิเบล
- iii. ความเร็วชัตเตอร์ (Shutter speed): 150 ภาพต่อวินาที
- b. กล้อง Blackmagic Design URSA Mini 4.6K
  - i. สมดุลแสงขาวที่ (White balance): 5600 เคลวิน
  - ii. ความไวในการรับแสง (ISO): 400
  - iii. ขนาดรูรับแสง (Aperture): f/6.7
  - iv. มุมชัตเตอร์ (Shutter angle): 90°
3. ขนาดของภาพจากกล้องคือ 1920 x 1080 ที่ความถี่ 50i
4. ปรับระยะโฟกัสอัตโนมัติบริเวณหน้าคนเท่านั้น
5. คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผล

### อุปกรณ์

1. ห้องถ่ายทำชั่วคราว ตามตามรูป 28
2. ฉากสีเขียวที่มีความต่างของระดับสีเขียว
3. หลอดไฟติดเพดานแบบ LED และแผงไฟส่องสว่างด้านข้างแบบตั้งพื้น 2 ชุด (1 แผงมีไฟฟลูออเรสเซนต์ 55 วัตต์ 6 หลอด 2 แผง) ดังรูป 27 และ รูป 28 ตามลำดับ
4. กล้อง Sony NEX-VG30 และกล้อง Blackmagic Design URSA Mini 4.6K Digital Cinema Camera พร้อมเลนส์ Canon EF 24-70mm f/2.8L II USM
5. คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผล
  - a. หน่วยประมวลผลกลางความเร็ว 3.4GHz
  - b. หน่วยความจำ 8GB
  - c. หน่วยประมวลผลกราฟิก NVIDIA GeForce GTX 1080
  - d. ภาษาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการทดลอง C++
  - e. ไบรารีหลักที่ใช้ DirectCompute

### วิธีการทดลอง

สลับเก็บข้อมูลตามตัวแปรต้นข้อ 1-4 จนได้ภาพครบทั้งหมด 16 ภาพ โดยตั้งค่ากล้อง และตำแหน่งการวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามตัวแปรควบคุม และมีความแตกต่างระหว่างแสงแบบสม่ำเสมอไม่สม่ำเสมอคือการเปิดและปิดหลอดไฟติดเพดานแบบ LED ตามลำดับ

ผลการทดลอง

กล้อง	สีเสื้อ	ระยะฉากหลัง (เซนติเมตร)	สภาพแสง	Color Difference RMS Error (Subject, Background, All)	Our Method RMS Error (Subject, Background, All)
VG-NEX30	ดำ	80	สม่ำเสมอ	3.47, 0.26, 0.78	2.53, 0.26, 0.59
VG-NEX30	ดำ	80	ไม่สม่ำเสมอ	13.84, 8.75, 9.08	7.80, 3.53, 3.86
VG-NEX30	ดำ	160	สม่ำเสมอ	2.77, 0.61, 0.95	2.07, 0.44, 0.70
VG-NEX30	ดำ	160	ไม่สม่ำเสมอ	6.33, 7.25, 7.19	4.46, 2.96, 3.09
VG-NEX30	ขาว	80	สม่ำเสมอ	3.46, 0.32, 0.81	2.37, 0.05, 0.51
VG-NEX30	ขาว	80	ไม่สม่ำเสมอ	17.80, 6.73, 7.64	16.11, 2.66, 4.38
VG-NEX30	ขาว	160	สม่ำเสมอ	3.37, 0.57, 1.06	1.61, 0.16, 0.46
VG-NEX30	ขาว	160	ไม่สม่ำเสมอ	18.76, 7.89, 8.69	16.38, 4.12, 5.33
URSA Mini 4.6K	ดำ	80	สม่ำเสมอ	7.29, 3.20, 3.59	6.36, 1.77, 2.33
URSA Mini 4.6K	ดำ	80	ไม่สม่ำเสมอ	19.83, 40.16, 39.26	17.48, 23.31, 23.00
URSA Mini 4.6K	ดำ	160	สม่ำเสมอ	15.68, 3.39, 5.61	15.40, 1.65, 4.76
URSA Mini 4.6K	ดำ	160	ไม่สม่ำเสมอ	15.04, 41.74, 40.26	13.72, 25.55, 24.82
URSA Mini 4.6K	ขาว	80	สม่ำเสมอ	18.35, 3.43, 5.34	16.06, 1.72, 4.02
URSA Mini 4.6K	ขาว	80	ไม่สม่ำเสมอ	19.07, 39.33, 38.49	18.54, 23.34, 23.08
URSA Mini 4.6K	ขาว	160	สม่ำเสมอ	10.65, 3.87, 4.71	10.42, 2.24, 3.55
URSA Mini 4.6K	ขาว	160	ไม่สม่ำเสมอ	21.60, 40.91, 39.50	20.50, 24.88, 24.51

ตาราง 2 การเปรียบเทียบผลระหว่างขั้นตอนวิธี Color difference และขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

การทดลองแต่ละขั้นตอนวิธีทำบนภาพชุดเดียวกันทั้งหมด ค่าความผิดพลาดที่นำมาแสดงเป็นผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบระหว่าง Ground truth และคำนวณเป็นค่า RMS Error ดังสมการนี้

$$RMS\ Error = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i=n}(\alpha_i - \beta_i)^2}{n}}$$

โดย  $n$  แทนจำนวนพิกเซลทั้งหมด

$\alpha_i$  แทนค่า Alpha ในตำแหน่งพิกเซลที่  $i$  ของ Ground truth(255 – มีค่าระหว่าง 0)

$\beta_i$  แทนค่า Alpha ในตำแหน่งพิกเซลที่  $i$  ของขั้นตอนวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ – มีค่าระหว่าง 0)

(255

สำหรับผลการทดลองที่แสดงในตาราง 2 จะแสดงผลการทดลอง 3 ส่วน ในแต่ละขั้นตอนวิธี ดังนี้

1. นำแสดง (Subject) จะคำนวณค่า RMS Error เฉพาะส่วนนักแสดงเท่านั้น คือส่วนที่มีค่า Alpha ในภาพ Ground truth มากกว่า 0
2. ฉากหลัง (Background) จะคำนวณค่า RMS Error เฉพาะส่วนฉากหลังเท่านั้น คือส่วนที่มีค่า Alpha ในภาพ Ground truth เท่ากับ 0
3. ทั้งภาพ (All) จะคำนวณค่า RMS Error จากข้อมูลทั้งภาพ

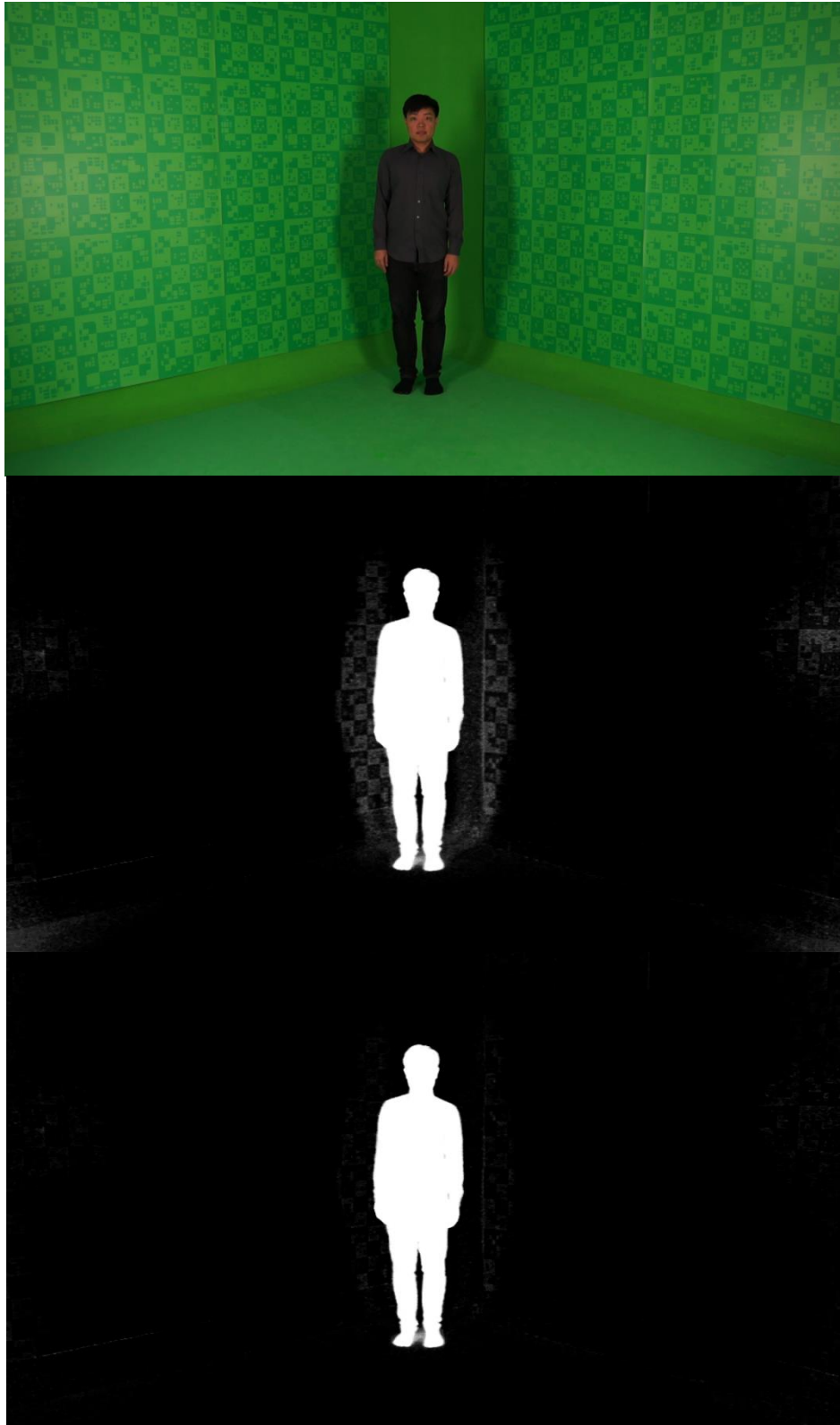
ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการคำนวณใช้เวลาในการประมวลผลเฉลี่ย 100 ภาพ ได้ผลการทดลองตามที่แสดงในตาราง 3

	Color Difference	Our Method
เวลา (มิลลิวินาที)	0.12	10.31

ตาราง 3 ผลการวัดเวลาการคำนวณ

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอให้ค่า RMS Error ที่น้อยกว่าขั้นตอนวิธี Color difference ในทุกกรณี ทั้งเทียบเฉพาะตัวนักแสดง, เฉพาะฉากหลัง หรือ ทั้งภาพ และจะส่งผลอย่างมากในสภาพแสงที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจะนำค่าความต่างสีของพิกเซลรอบข้างมาช่วยในการคำนวณค่า Alpha ของพิกเซลตัวเองด้วย จึงทำให้ในสภาพแสงที่ไม่สม่ำเสมอมีเงาเกิดขึ้นเยอะที่ขั้นตอนวิธี Color difference ไม่สามารถจัดการได้ ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอจะสามารถจัดการได้ดีกว่า ดังเช่นตัวอย่างการทดลองตามรูป 29



รูป 29 รูปการทดลองจากกล้อง VG-NEX30 ในกรณีใส่เสื้อสีดำ, ระยะห่างจากฉากหลัง 80 เซนติเมตร และสภาพแสงไม่สม่ำเสมอ (บน) ภาพจากกล้อง, (กลาง) ขั้นตอนวิธี Color difference, (ล่าง) ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

สำหรับกรณีการใส่เสื้อสีขาวที่เป็นตัวแทนของกลุ่มเสื้อที่มีสีอ่อน ที่มักถูกสีเขียวจากฉากหลังสะท้อนใส่ ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอสามารถช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้บ้าง แต่ไม่สามารถแก้ได้ทั้งหมดดังรูป 30



รูป 30 รูปเฉพาะส่วนจากทดลองจากกล้อง URSA Mini 4.6K ในกรณีใส่เสื้อสีขาว,

ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เนื่องจากขั้นตอนวิธีที่นำเสนอมีการเพิ่มขั้นตอนการคำนวณที่มากขึ้นจากขั้นตอนวิธี Color difference แต่เวลาที่ใช้ก็ยังอยู่ในขอบเขตที่สามารถประมวลผลอย่างทันทีได้ (real time) คือ ไม่มากเกิน 20 มิลลิวินาที สำหรับภาพที่ความถี่ 50 ภาพต่อวินาที

## การทดลองเปรียบเทียบการใช้ตัวกรองนำทางมาปรับปรุงข้อมูล

### จุดประสงค์

เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบความถูกต้องระหว่างภาพขั้นตอนวิธีที่ไม่ผ่านตัวกรอง และขั้นตอนวิธีที่ผ่านตัวกรองที่นำเสนอในบทที่ 6 การปรับปรุงค่าความทึบด้วยตัวกรองแบบนำทาง โดยขั้นตอนวิธีที่ไม่ผ่านตัวกรองนั้นคือวิธีการใช้ Kernel Density Estimation มาช่วยปรับปรุงข้อมูล ตามที่ได้กล่าวไปแล้วใน บทที่ 5 การปรับปรุงขั้นตอนวิธี

### สมมติฐาน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการขั้นตอนวิธีที่ผ่านตัวกรองที่นำเสนอ จะมีความถูกต้องเพิ่มมากขึ้นจากผลลัพธ์ที่ไม่ผ่านตัวกรอง

### ตัวแปรต้น

1. กล้อง 3 รุ่น
  - a. กล้อง Nikon D750 แทนกลุ่มของกล้อง Digital single-lens reflex หรือ กล้อง DSLR
  - b. กล้อง Sony NEX-VG30 แทนกลุ่มของกล้องวิดีโอคุณภาพทั่วไป
  - c. กล้อง Blackmagic Design URSA Mini 4.6K Digital Cinema Camera (EF-Mount) แทนกลุ่มกล้องวิดีโอคุณภาพสูง
2. สีเสื้อ 2 สี
  - a. สีดำ แทนกลุ่มของเสื้อที่มีสีเข้ม ที่ไม่ถูกสีเขียวจากฉากหลังสะท้อนใส่
  - b. สีขาว แทนกลุ่มของเสื้อที่มีสีอ่อน ที่มีถูกสีเขียวจากฉากหลังสะท้อนใส่
3. ระยะฉากหลัง 2 ระยะ (วัดจากมุมสุดของฉากหลัง มาถึงจุดกึ่งกลางนักแสดง)
  - a. 80 เซนติเมตร แทนระยะใกล้เป็นพิเศษ กรณีที่ต้องการเพิ่มจำนวนนักแสดงในกล้อง หรือพื้นที่ห้องจำกัด
  - b. 160 เซนติเมตร แทนระยะมาตรฐานที่ใช้ในการถ่ายทำปกติ
4. สภาพแสง 2 แบบ
  - a. แสงสม่ำเสมอ แทนแสงไฟที่ถูกจัดอย่างเหมาะสมสำหรับการถ่ายทำ
  - b. แสงไม่สม่ำเสมอ แทนกรณีที่มีเฉพาะแสงไฟตั้งพื้นสำหรับส่องนักแสดงเท่านั้น
5. ขั้นตอนวิธี วิธี 2
  - a. Color difference ที่รวมการใช้งานการประมาณความหนาแน่นเคอร์เนล (Kernel Density Estimation) แล้ว



อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

- b. Color difference ที่รวมการใช้งานการประมาณความหนาแน่นเคอร์เนล (Kernel Density Estimation) แล้ว และได้ปรับปรุงค่าความทึบที่ได้ด้วยตัวกรองแบบนำทาง

### ตัวแปรตาม

RMS Error ของ Alpha ของแต่ละขั้นตอนวิธี โดยเปรียบเทียบกับ Ground truth จากการสร้างด้วยคนซึ่งบอกว่าส่วนนั้นควรมีค่าทึบแสงที่ถูกต้องเป็นเท่าไร

### ตัวแปรควบคุม

1. ตำแหน่งอุปกรณ์ทั้งหมด คือ ฉากหลัง กล้องวิดีโอ ไฟส่องสว่าง ถูกกำหนดไว้ที่ตำแหน่งเดิมตลอดการทดลองตามรูป 28
2. การตั้งค่าของกล้องถูกกำหนดไว้เท่าเดิมตลอดการทดลอง ดังนี้
  - a. กล้อง Nikon D750
    - i. สมดุลแสงขาว (White balance): 5600 เคลวิน
    - ii. ความไวในการรับแสง (ISO): 400
    - iii. ความเร็วชัตเตอร์ (Shutter speed): 100 ภาพต่อวินาที
    - iv. ขนาดรูรับแสง (Aperture): f/9
  - b. กล้อง Sony NEX-VG30
    - i. สมดุลแสงขาว (White balance): 5600 เคลวิน
    - ii. อัตราการขยายสัญญาณ (Gain): 3 เดซิเบล
    - iii. ความเร็วชัตเตอร์ (Shutter speed): 150 ภาพต่อวินาที
  - c. กล้อง Blackmagic Design URSA Mini 4.6K
    - i. สมดุลแสงขาว (White balance): 5600 เคลวิน
    - ii. ความไวในการรับแสง (ISO): 400
    - iii. ขนาดรูรับแสง (Aperture): f/6.7
    - iv. มุมชัตเตอร์ (Shutter angle): 90°
3. ขนาดของภาพจากกล้องคือ 1920 x 1080 ที่ความถี่ 50i
4. ปรับระยะโฟกัสอัตโนมัติบริเวณหน้าคนเท่านั้น
5. คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผล

### อุปกรณ์

1. ห้องถ่ายทำชั่วคราว ตามรูป 28
2. ฉากสีเขียวที่มีความต่างของระดับสีเขียว

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

3. หลอดไฟติดเพดานแบบ LED และแผงไฟส่องสว่างด้านข้างแบบตั้งพื้น 2 ชุด (1 แผงมีไฟฟลูออเรสเซนต์ 55 วัตต์ 6 หลอด 2 แถว) ดังรูป 27 และ รูป 28 ตามลำดับ
4. กล้อง Nikon D750, กล้อง Sony NEX-VG30 และกล้อง Blackmagic Design URSA Mini 4.6K Digital Cinema Camera พร้อมเลนส์ Canon EF 24-70mm f/2.8L II USM
5. คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผล
  - a. หน่วยประมวลผลกลางความเร็ว 3.4GHz
  - b. หน่วยความจำ 8GB
  - c. หน่วยประมวลผลกราฟิก NVIDIA GeForce GTX 1080
  - d. ภาษาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการทดลอง C++
  - e. ไบรารีหลักที่ใช้ DirectCompute

### วิธีการทดลอง

สลับเก็บข้อมูลตามตัวแปรต้นข้อ 1-4 จนได้ภาพครบทั้งหมด 24 ภาพ โดยตั้งค่ากล้อง และตำแหน่งการวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามตัวแปรควบคุม และมีความแตกต่างระหว่างแสงแบบสม่ำเสมอกับไม่สม่ำเสมอคือการเปิดและปิดหลอดไฟติดเพดานแบบ LED ตามลำดับ

### ผลการทดลอง

การทดลองแต่ละขั้นตอนวิธีทำบนภาพชุดเดียวกันทั้งหมด ค่าความผิดพลาดที่นำมาแสดงเป็นผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบระหว่าง Ground truth และคำนวณเป็นค่า RMS Error ดังสมการนี้

$$RMS\ Error = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{i=n} (\alpha_i - \beta_i)^2}{n}}$$

โดย  $n$  แทนจำนวนพิกเซลทั้งหมด

$\alpha_i$  แทนค่า Alpha ในตำแหน่งพิกเซลที่  $i$  ของ Ground truth (มีค่าระหว่าง 0 – 255)

$\beta_i$  แทนค่า Alpha ในตำแหน่งพิกเซลที่  $i$  ของขั้นตอนวิธีที่นำมาเปรียบเทียบ (มีค่าระหว่าง 0 –

255)

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

กล้อง	สีเสื้อ	ระยะฉากหลัง (เซนติเมตร)	สภาพแสง	Our Method without Filter RMS Error (Subject, Background, All)	Our Method with Filter RMS Error (Subject, Background, All)
D750	ดำ	80	สม่ำเสมอ	4.32, 1.59, 3.22	2.12, 0.99, 2.15
D750	ดำ	80	ไม่สม่ำเสมอ	15.61, 21.11, 21.06	13.39, 15.10, 16.06
D750	ดำ	160	สม่ำเสมอ	14.42, 1.68, 4.55	10.42, 0.88, 2.96
D750	ดำ	160	ไม่สม่ำเสมอ	12.42, 23.22, 22.66	6.38, 13.89, 12.76
D750	ขาว	80	สม่ำเสมอ	13.06, 1.22, 3.56	8.32, 0.82, 2.16
D750	ขาว	80	ไม่สม่ำเสมอ	16.24, 21.36, 20.95	10.23, 16.84, 15.93
D750	ขาว	160	สม่ำเสมอ	6.42, 2.34, 3.65	4.22, 1.33, 2.45
D750	ขาว	160	ไม่สม่ำเสมอ	15.47, 4.38, 4.51	13.2, 3.23, 3.84
VG-NEX30	ดำ	80	สม่ำเสมอ	2.53, 0.26, 0.59	2.23, 0.23, 0.54
VG-NEX30	ดำ	80	ไม่สม่ำเสมอ	7.80, 3.53, 3.86	7.49, 3.23, 3.54
VG-NEX30	ดำ	160	สม่ำเสมอ	2.07, 0.44, 0.70	1.87, 0.43, 0.66
VG-NEX30	ดำ	160	ไม่สม่ำเสมอ	4.46, 2.96, 3.09	4.26, 2.56, 2.89
VG-NEX30	ขาว	80	สม่ำเสมอ	2.37, 0.05, 0.51	2.17, 0.05, 0.50
VG-NEX30	ขาว	80	ไม่สม่ำเสมอ	16.11, 2.66, 4.38	15.11, 2.26, 4.08
VG-NEX30	ขาว	160	สม่ำเสมอ	1.61, 0.16, 0.46	1.41, 0.13, 0.40
VG-NEX30	ขาว	160	ไม่สม่ำเสมอ	16.38, 4.12, 5.33	14.20, 4.02, 5.27
URSA Mini 4.6K	ดำ	80	สม่ำเสมอ	6.36, 1.77, 2.33	4.25, 1.72, 2.10
URSA Mini 4.6K	ดำ	80	ไม่สม่ำเสมอ	17.48, 23.31, 23.00	15.48, 21.21, 20.92
URSA Mini 4.6K	ดำ	160	สม่ำเสมอ	15.40, 1.65, 4.76	13.24, 1.21, 3.26
URSA Mini 4.6K	ดำ	160	ไม่สม่ำเสมอ	13.72, 25.55, 24.82	11.72, 21.52, 23.14

URSA Mini 4.6K	ขาว	80	สม่ำเสมอ	16.06, 1.72, 4.02	14.10, 1.52, 3.62
URSA Mini 4.6K	ขาว	80	ไม่สม่ำเสมอ	18.54, 23.34, 23.08	15.54, 21.21, 20.81
URSA Mini 4.6K	ขาว	160	สม่ำเสมอ	10.42, 2.24, 3.55	8.16, 2.29, 3.38
URSA Mini 4.6K	ขาว	160	ไม่สม่ำเสมอ	20.50, 24.88, 24.51	17.25, 22.67, 21.93

ตาราง 4 ผลการเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีที่ไม่ผ่านตัวกรอง และขั้นตอนวิธีที่ผ่านตัวกรองที่นำเสนอ

สำหรับผลการทดลองที่แสดงในตาราง 4 จะแสดงผลการทดลอง 3 ส่วน ในแต่ละขั้นตอนวิธี ดังนี้

1. นำแสดง (Subject) จะคำนวณค่า RMS Error เฉพาะส่วนนักแสดงเท่านั้น คือส่วนที่มีค่า Alpha ในภาพ Ground truth มากกว่า 0
2. ฉากหลัง (Background) จะคำนวณค่า RMS Error เฉพาะส่วนฉากหลังเท่านั้น คือส่วนที่มีค่า Alpha ในภาพ Ground truth เท่ากับ 0
3. ทั้งภาพ (All) จะคำนวณค่า RMS Error จากข้อมูลทั้งภาพ

นอกจากนี้ข้อมูลในส่วนกล้อง VG-NEX30 และกล้อง URSA Mini 4.6K นั้นเป็นข้อมูลเดียวกับผลการทดลองในรายงานฉบับก่อนหน้า ทำให้ข้อมูลในคอลัมน์ “Our Method without Filter” ในส่วนที่มีการแรงเงาไว้นั้นจะมีค่าตรงกับคอลัมน์ “Our Method” ในรายงานฉบับก่อนหน้า

สำหรับเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นไปตามตาราง 5 โดยแบ่งวัดผลเฉพาะส่วนที่เป็นตัวกรองจะได้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.51 มิลลิวินาที ต่อภาพที่ความละเอียด 1920 x 1080 พิกเซล และเมื่อนำตัวกรองมาทำงานร่วมกับวิธีที่เคยนำเสนอไปในรายงานฉบับก่อนหน้า จะใช้เวลาเฉลี่ยอยู่ที่ 11.89 มิลลิวินาที ซึ่งเวลายังอยู่ในขอบเขตที่สามารถประมวลผลอย่างทันที (real time) ที่ความถี่ 50 ภาพต่อวินาที

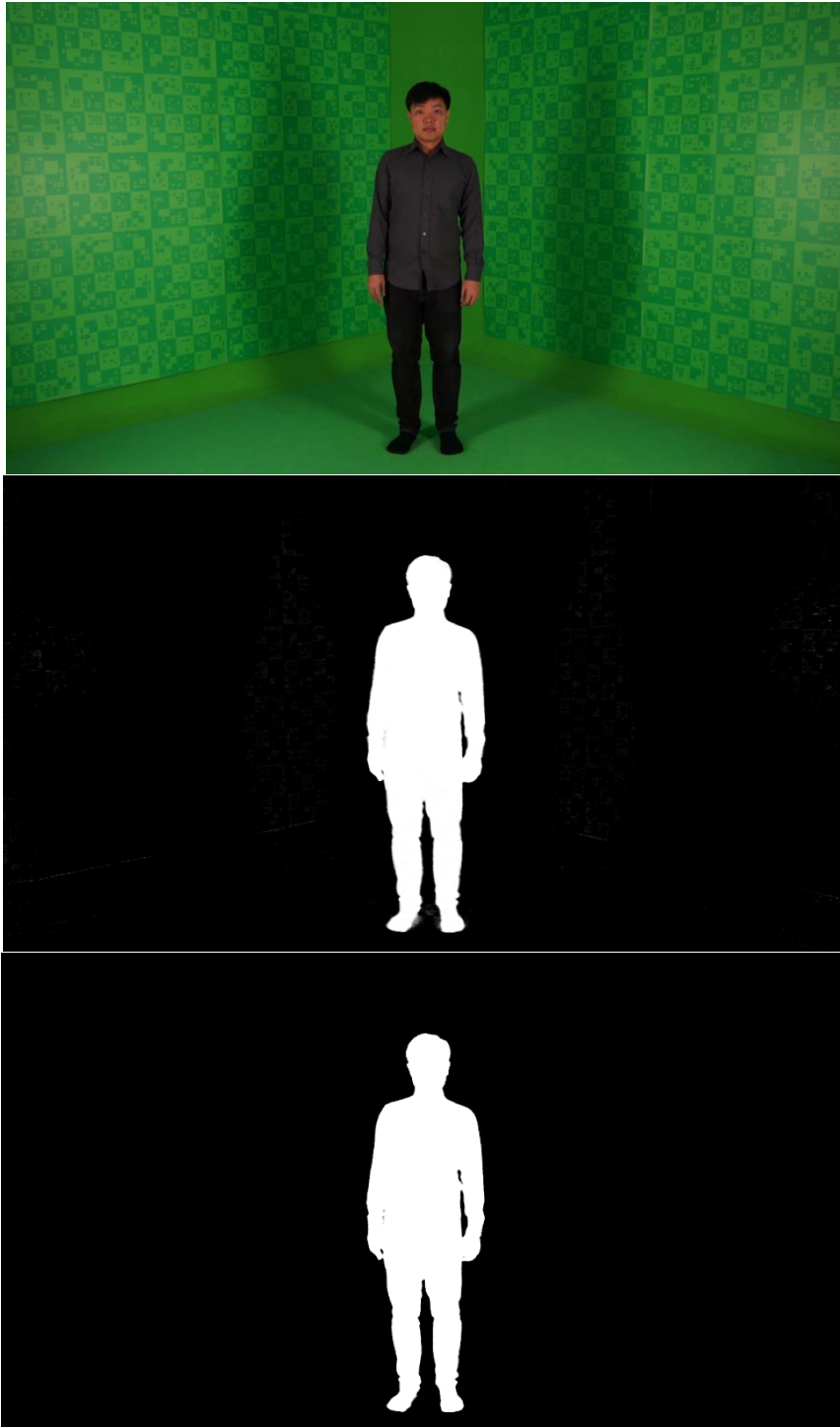
	Only Guided Filter	Our Method without Filter	Our Method with Filter
เวลา (มิลลิวินาที)	1.51	10.31	11.89

ตาราง 5 ผลการวัดเวลาการคำนวณ

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าขั้นตอนวิธีที่ผ่านตัวกรองที่นำเสนอให้ค่า RMS Error ที่ดีขึ้น (มีค่า RMS Error น้อยลง) กว่าขั้นตอนวิธีที่ไม่ผ่านตัวกรองอย่างเห็นได้ชัดในทุกตัวอย่างการทดลอง ทำให้ได้ภาพ Alpha

ที่มีความใกล้เคียงกับ Ground truth อย่างมาก ดังตัวอย่างการทดลองตามรูป 31 จะเห็นได้ว่าตัวกรองทำหน้าทีกรองข้อมูลค่า Alpha ที่ไม่ถูกต้องออกไป ในส่วนของ Alpha ที่อาจเกิดจากแสงไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดเงาทอดลงบนพื้น แต่เมื่อผ่านตัวกรองที่มีภาพสีเป็นภาพนำทางนี้แล้วสามารถจัดการปัญหาบริเวณนั้นได้อย่างดี สำหรับความเร็วในการคำนวณนั้น เวลาที่ใช้เพิ่มขึ้นจากการนำเอาตัวกรอง Guided Filter เข้ามาใช้ นั้นจะทำให้เวลาที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นมาอีก 1.51 มิลลิวินาที เมื่อรวมกับขั้นตอน KDE แล้วจะทำให้เวลารวมเป็น 11.89 มิลลิวินาทีซึ่งอยู่ในขอบเขตที่สามารถทำงานอย่างทันทีที่ความถี่ 50 ภาพต่อวินาทีได้



รูป 31 รูปการทดลองจากกล้อง VG-NEX30 ในกรณีใส่เสื้อสีดำ, ระยะห่างจากฉากหลัง 160 เซนติเมตร และสภาพแสงไม่สม่ำเสมอ (บน) ภาพจากกล้อง, (กลาง) ขั้นตอนวิธีที่ไม่ผ่านตัวกรอง, (ล่าง) ขั้นตอนวิธีที่ผ่านตัวกรองที่นำเสนอ

## บทที่ 8

### การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ

การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบแบ่งเป็นสองส่วนหลักคือการกำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ สำหรับตัวเครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะใช้รันโปรแกรมที่ประกอบด้วยขั้นตอนวิธีที่ได้พัฒนาขึ้น และการออกแบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ที่เหมาะสม

#### เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับขั้นตอนวิธี

เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้นั้นเป็นคอมพิวเตอร์ซึ่งอยู่ในเคส (Case) แบบ 4U เพื่อให้สามารถติดตั้งใน Rack มาตรฐานขนาด 19 นิ้วที่นิยมใช้ในห้องถ่ายทำทั่วไปได้ โดยมีหน่วยประมวลผลกลางเป็น Intel Core i5-7400 และใช้ mainboard ซึ่งมี Chipset เป็น Z270 และติดตั้งการ์ดสำหรับรับภาพวีดิทัศน์ Blackmagic Decklink 4G ซึ่งทำให้รับสัญญาณภาพแบบ SDI ได้ ตัวเครื่องได้ติดตั้งหน่วยความจำขนาด 16GB พร้อมด้วย SSD ขนาด 256GB รูปแสดงตัวอย่างของเครื่องดังกล่าวดูได้ที่รูปที่ 49

#### ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้

งานที่ต้องการแยกฉากหลังออกแล้วใส่ฉากหลังใหม่ที่ต้องการเข้าไป จำเป็นต้องมีส่วนต่อประสานกับผู้ใช้เพื่อให้ผู้ใช้สามารถปรับแต่งค่าต่าง ๆ ให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความสวยงามถูกต้องมากที่สุด โดยรายงานนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ศึกษาโปรแกรมอื่น ๆ ที่ทำงานในลักษณะเดียวกันในปัจจุบัน และ การออกแบบโปรแกรมใหม่

#### หน้าต่างของโปรแกรมที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

โปรแกรมหรืออุปกรณ์สำหรับแยกฉากหลังที่นิยมใช้ในปัจจุบันสำหรับการงานแบบ Realtime broadcasting สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ตามลักษณะและวัตถุประสงค์ของตัวโปรแกรม ดังนี้

##### ซอฟต์แวร์ที่ทำงานอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์

ตัวอย่างเช่น Open Broadcaster Software, vMix, Telestream Wirecast เป็นต้น ซอฟต์แวร์เหล่านี้มักจะมุ่งเน้นสำหรับการถ่ายทอดสดผ่านอินเทอร์เน็ต เช่น Facebook หรือ Youtube เป็นต้น

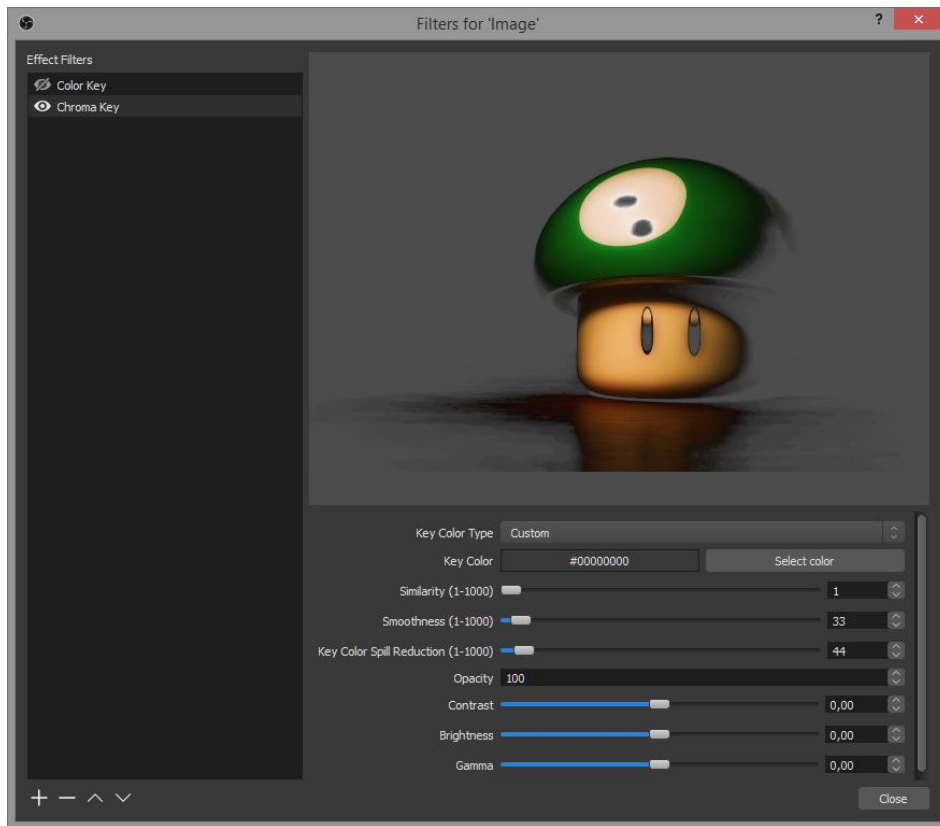
##### ข้อดี

- ราคาของโปรแกรมเหล่านี้จะถูกที่สุดใน 3 กลุ่ม เพราะเป็นราคาเฉพาะตัวซอฟต์แวร์
- ผู้ใช้งานใหม่สามารถใช้งานได้ง่าย เนื่องจากปรับเปลี่ยนการตั้งค่าด้วยคีย์บอร์ด และเมาส์

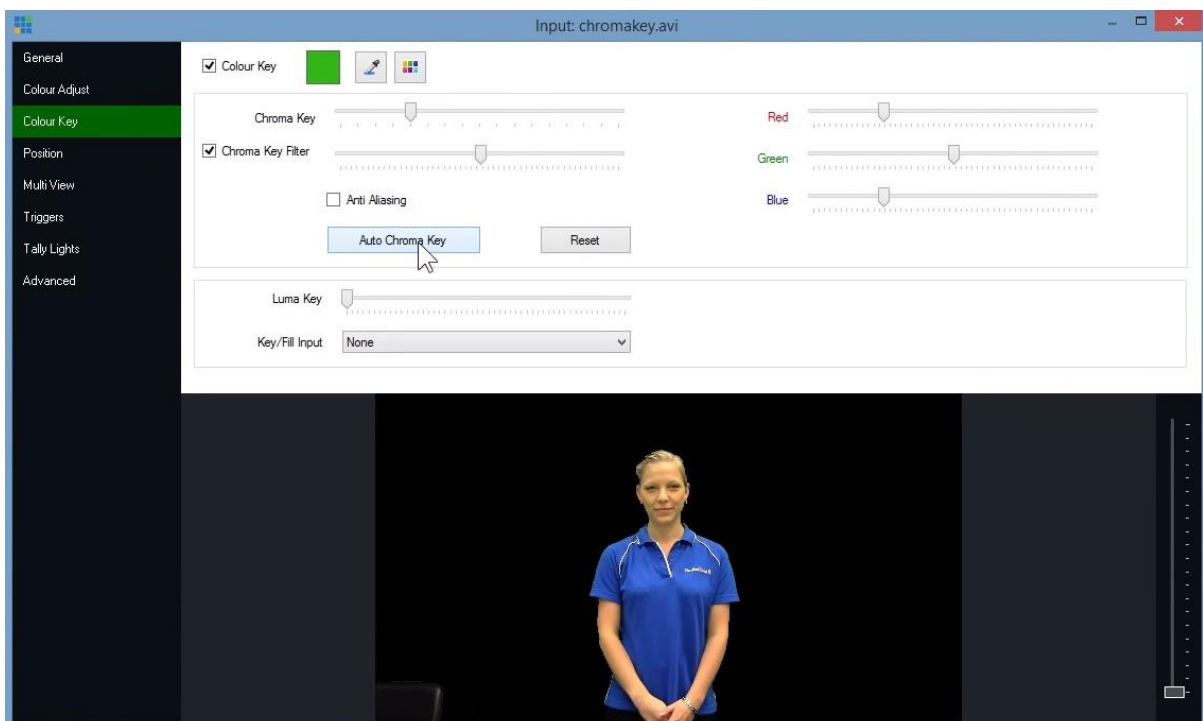
##### ข้อด้อย

- โปรแกรมในส่วนแยกฉากหลังจะมีส่วนให้ปรับแต่งค่าไม่มาก ทำให้อาจมีปัญหากับการแยกฉากหลังในบางกรณี เช่น แสงที่ตกบนฉากหลังเป็นแสงแบบไม่สม่ำเสมอ หรือมีเงาไปพาด เป็นต้น

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก



รูปที่ 32 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ Chroma key ของโปรแกรม OBS



รูปที่ 33 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ Chroma key ของโปรแกรม vMix





รูปที่ 34 หน้าต่างแสดงส่วนการทำงาน Chroma key ของโปรแกรม Wirecast

### เครื่อง Production Switcher

ตัวอย่างเช่น Datavideo TVS-1200A, Blackmagic Design ATEM 2 M/E Production Studio 4K, Panasonic AV-HS6000, Newtek TriCaster 8000 เป็นต้น เครื่องในประเภทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทย่อยได้อีก คือ เครื่องที่เน้นในการใช้งานเพื่อทำเป็นระบบสตูดิโอเสมือนจริง เช่น Datavideo TVS-1200A และ Newtek TriCaster 8000 เป็นต้น กับ เครื่องที่เน้นใช้งานแบบ Production Switcher แต่มีความสามารถในการตัดฉากหลังด้วย เช่น Blackmagic Design ATEM 2 M/E Production และ Panasonic AV-HS6000 เป็นต้น

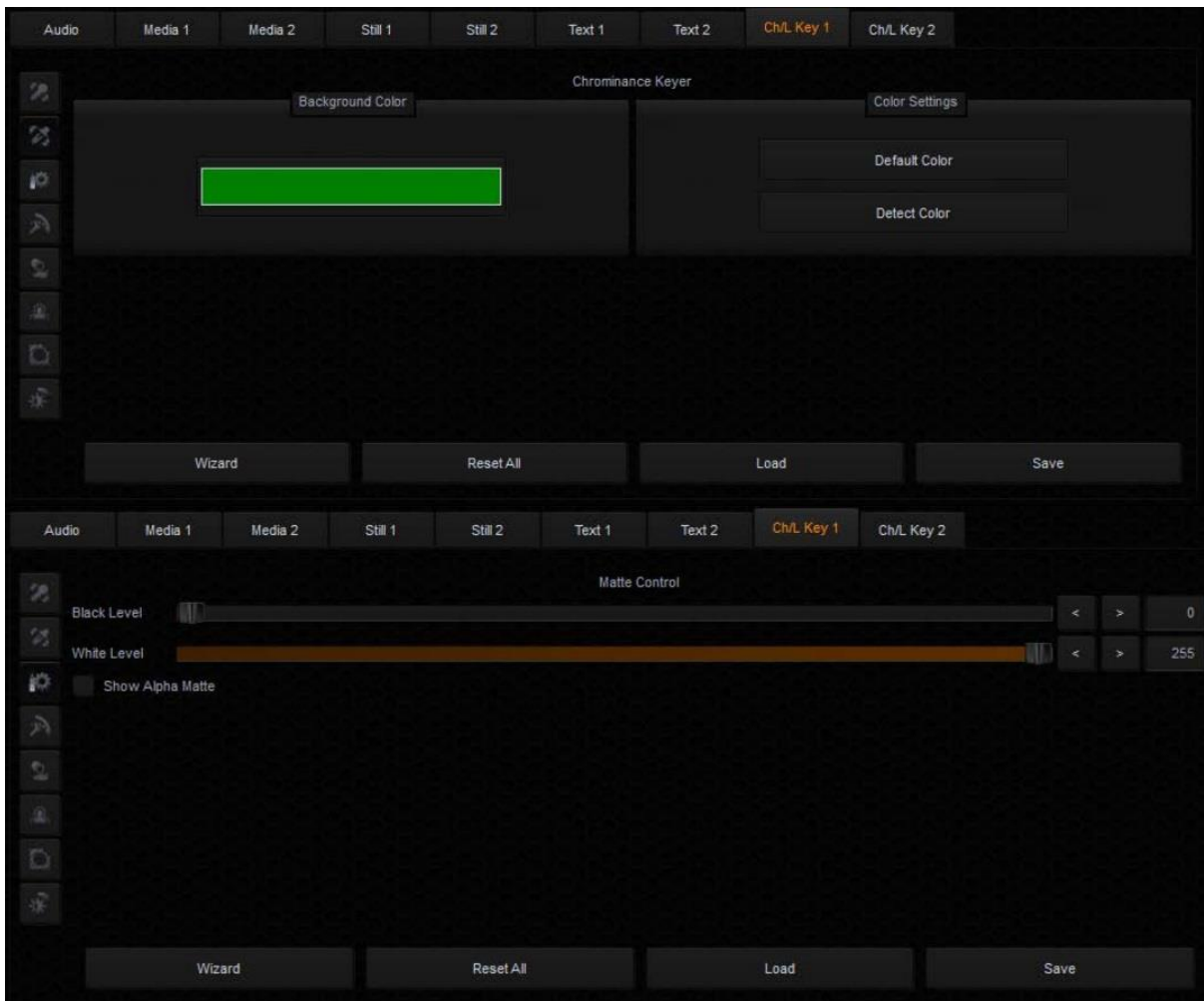
#### ข้อดี

- ได้เครื่องที่สามารถทำงานได้ทั้งระบบ ตั้งแต่รับภาพจากกล้องจนได้ผลลัพธ์สุดท้าย

#### ข้อด้อย

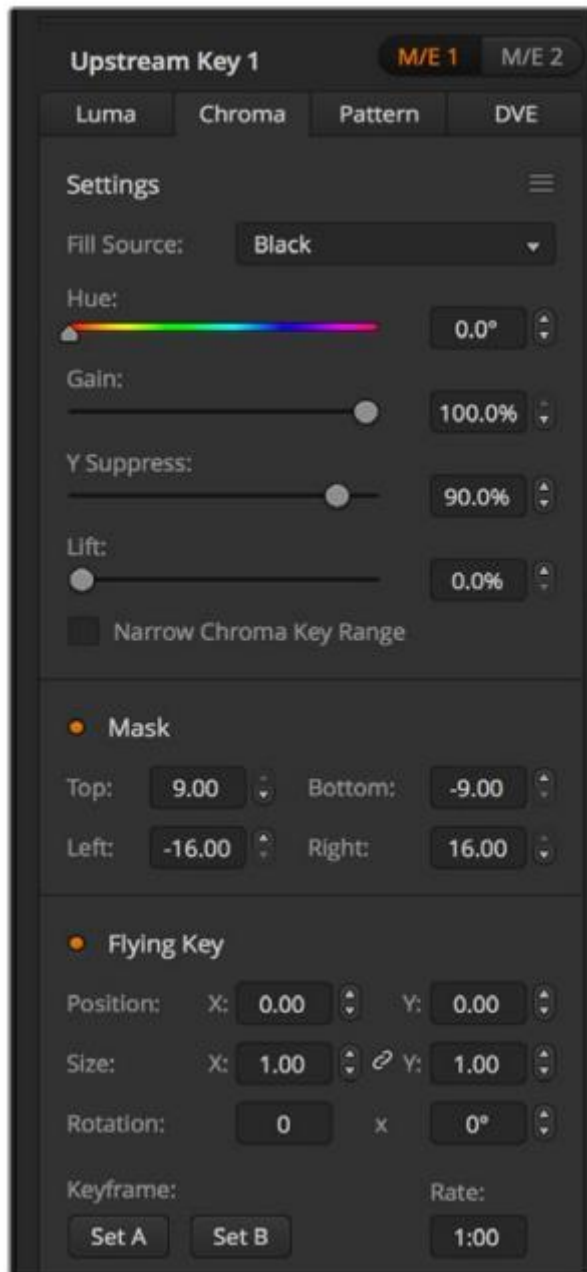
- เนื่องจากตัวอุปกรณ์มีความสามารถที่หลากหลาย จึงไม่ได้เน้นไปในเรื่องการแยกฉากหลัง โดยเฉพาะ ทำให้อาจมีปัญหาเกี่ยวกับการแยกฉากหลังในบางกรณี เช่น แสงที่ตกบนฉากหลังเป็นแสงแบบไม่สม่ำเสมอ หรือมีเงาไปพาด เป็นต้น
- อุปกรณ์บางตัวจะต้องควบคุมด้วยสวิชเซอร์ คอนโทรลเลอร์ ซึ่งต้องใช้เวลาในการศึกษาใช้งาน

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก



รูปที่ 35 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ Chroma key ของโปรแกรมควบคุม Datavideo TVS-1200A

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

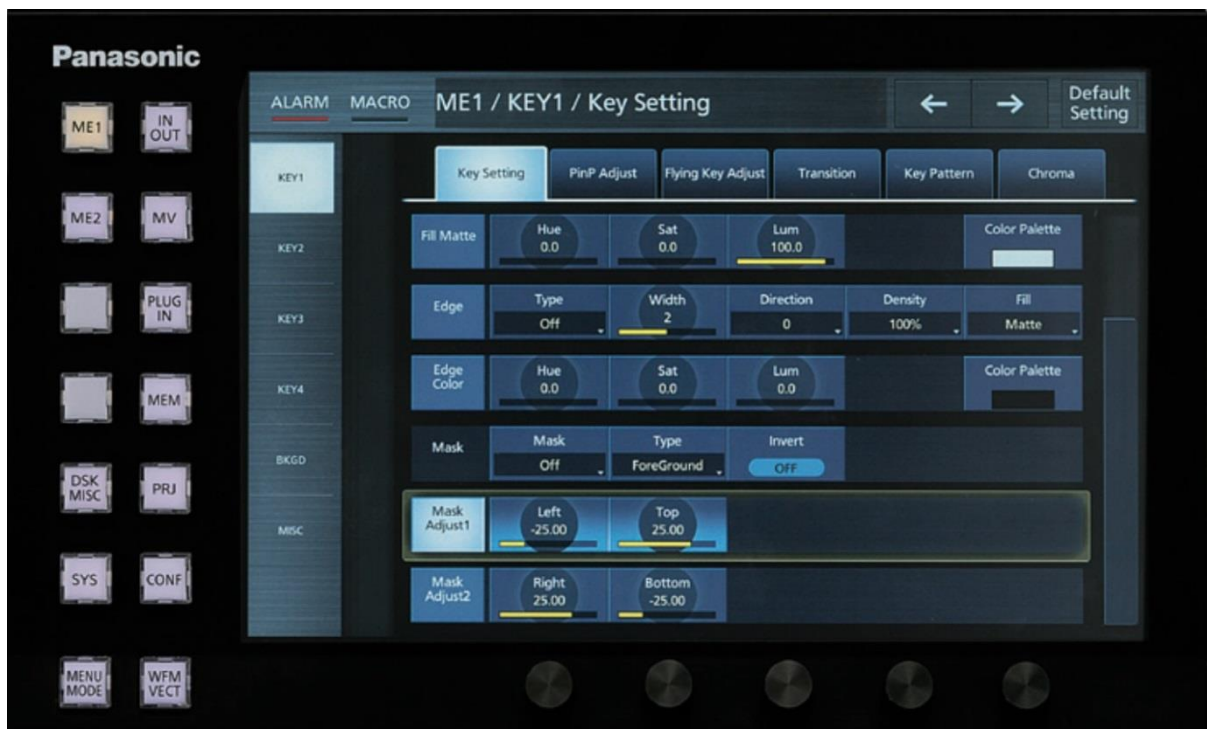


รูปที่ 36 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ Chroma key ของโปรแกรมควบคุม Blackmagic Design ATEM 2 M/E Production Studio 4K

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

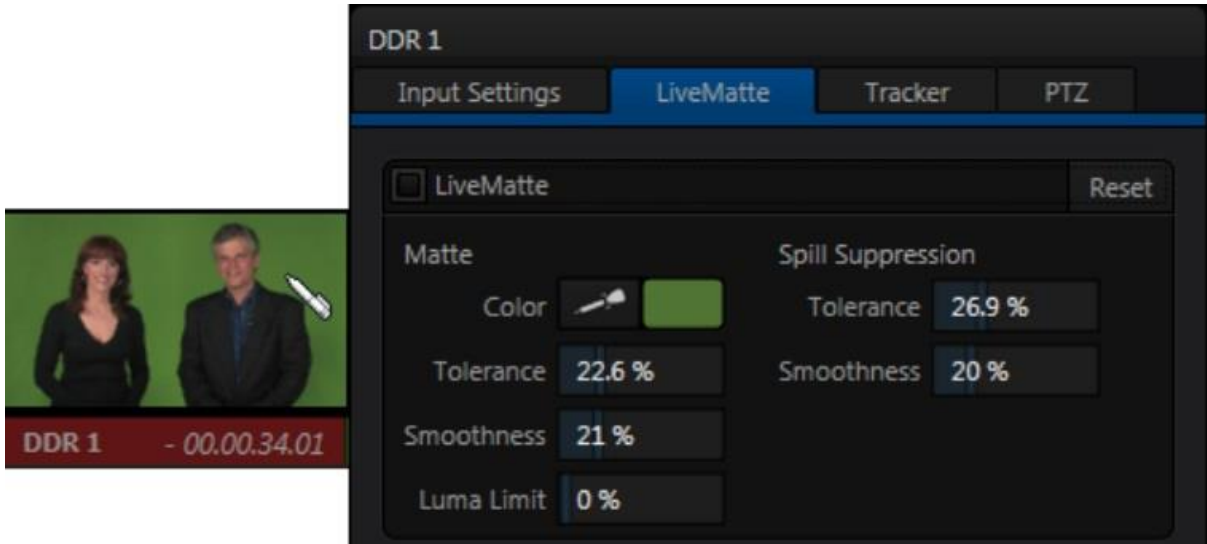


รูปที่ 37 สวิตเซอร์ คอนโทรลเลอร์ ของ Panasonic AV-HS6000



รูปที่ 38 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ Chroma key ของโปรแกรมควบคุม Panasonic AV-HS6000

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก



รูปที่ 39 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ Chroma key ของโปรแกรมควบคุม Newtek TriCaster 8000

### เครื่องประมวลผลที่ทำเฉพาะการแยกฉากหลัง

ตัวอย่างเช่น Datavideo DVK-300HD, Blackmagic Design Ultimatte 12 เป็นต้น จะเป็นเครื่องที่ทำหน้าที่แยกฉากหลังที่ไม่ต้องการออกแล้วนำฉากหลังใหม่รวมเข้าไปให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

#### ข้อดี

- ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เนื่องจากสามารถปรับค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการแยกฉากหลังได้หลากหลาย และมีส่วนอื่นเสริมเพื่อให้เวลานำภาพฉากหลังใหม่เข้ามาประกอบดูสมจริงมากขึ้น

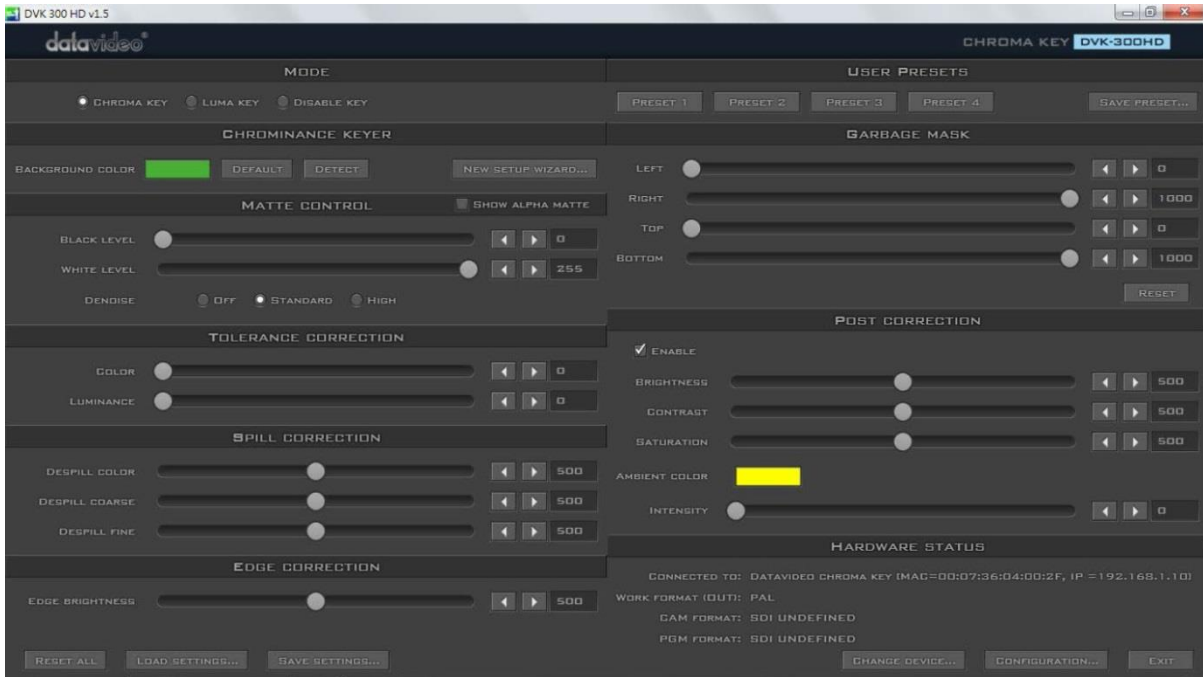
#### ข้อด้อย

- ไม่สามารถทำงานด้วยตัวเองจนได้ผลลัพธ์สุดท้ายได้ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อื่นมาประกอบด้วย เช่น อุปกรณ์ที่สร้างภาพฉากหลังใหม่ขึ้นมา เป็นต้น



รูปที่ 40 เครื่อง Datavideo DVK-300HD

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

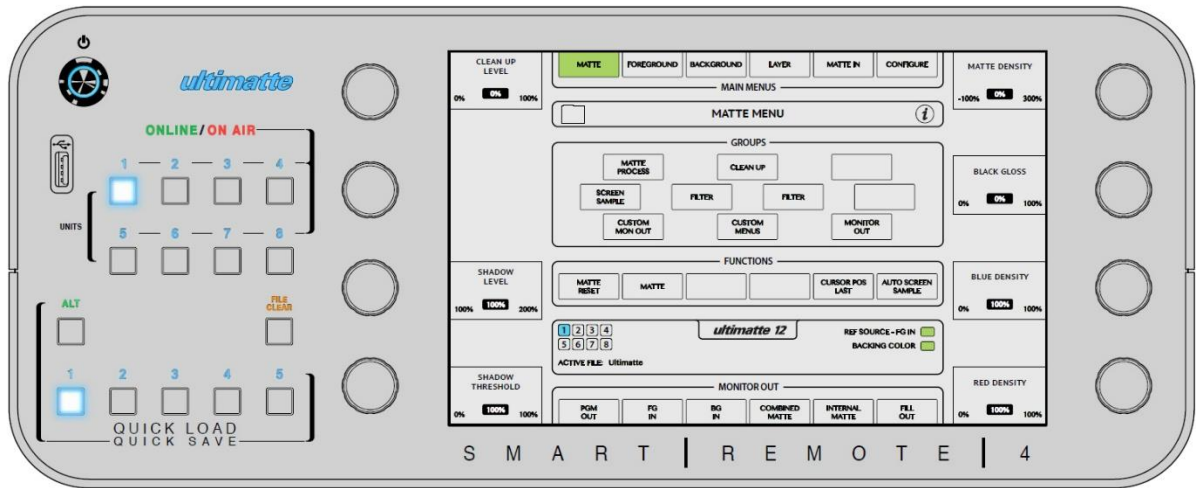


รูปที่ 41 หน้าต่างแสดงส่วนการทำ Chroma key ของโปรแกรมควบคุม DVK-300HD



รูปที่ 42 เครื่อง Blackmagic Design Ultimatte 12 ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น Smart Remote (บน) และส่วนที่เป็นเครื่องประมวลผล (ล่าง)

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก



รูปที่ 43 Smart Remote สำหรับควบคุมปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ Blackmagic Design Ultimatte

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

ชื่อ / รุ่น	Open Broadcaster Software 20.1.3	vMix 20	Telestream Wirecast 8.2	Datavideo TVS-1200A	Blackmagic Design ATEM 2 M/E Production Studio 4K	Panasonic AV-HS6000	Newtek TriCaster 8000	Datavideo DVK-300HD	Blackmagic Design Ultimatte 12
ประเภท	ซอฟต์แวร์	ซอฟต์แวร์	ซอฟต์แวร์	ฮาร์ดแวร์เฉพาะสำหรับงาน Production Switcher				ฮาร์ดแวร์เฉพาะสำหรับทำ Chroma key	
ราคาโดยประมาณ <sup>1</sup> (USD)	ไม่มีค่าใช้จ่าย (Open source)	350 - 1,200	695 - 995	8,499	3,795.28	19,999	34,995 (รวม Control surface)	1,799	9,995
ราคาโดยประมาณ <sup>2</sup> (บาท)	ไม่มีค่าใช้จ่าย (Open source)	12,000 - 45,000	25,000- 35,000	320,000	150,000	700,000	1,300,000	65,000	350,000
ตัวควบคุม (Controller)	คีย์บอร์ดและเมาส์	คีย์บอร์ดและเมาส์	คีย์บอร์ดและเมาส์	คีย์บอร์ดและเมาส์ หรือ สวิตเซอร์ คอนโทรลเลอร์	คีย์บอร์ดและเมาส์ หรือ สวิตเซอร์ คอนโทรลเลอร์	สวิตเซอร์ คอนโทรลเลอร์และ หน้าจอแบบสัมผัส	สวิตเซอร์ คอนโทรลเลอร์	คีย์บอร์ดและเมาส์	Remote SR-4 (อุปกรณ์เฉพาะ)
การเลือกสีฉากหลัง	Color picker	Color picker	Color picker	Color picker	Track bar	Color picker	Color picker	Color picker	Color picker
การปรับค่าพารามิเตอร์	Track bar + Spin boxes	Track bar	Track bar + Text box	Track bar + Spin boxes	Track bar + Spin boxes	Track bar (HW knob)	Track bar	Track bar + Spin boxes	Track bar (HW knob)
Cropping	บน ล่าง ซ้าย ขวา	บน ล่าง ซ้าย ขวา	บน ล่าง ซ้าย ขวา	บน ล่าง ซ้าย ขวา	บน ล่าง ซ้าย ขวา	บน ล่าง ซ้าย ขวา	บน ล่าง ซ้าย ขวา	บน ล่าง ซ้าย ขวา	บน ล่าง ซ้าย ขวา

ตาราง 6 ตารางเปรียบเทียบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของระบบแยกฉากหลังต่าง ๆ

<sup>1</sup> ราคาอ้างอิงจากเว็บไซต์ [www.bhphotovideo.com](http://www.bhphotovideo.com)

<sup>2</sup> คำนวณจากอัตราแลกเปลี่ยนประมาณ 1 USD = 35 บาท



## สรุปผลการเปรียบเทียบหน้าตาของโปรแกรมที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

โปรแกรมแยกฉากหลังที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนประกอบกัน ดังนี้

1. ส่วนที่ทำการแยกฉากหลัง (Chroma key)
  - 1.1. การเลือกสีฉากหลัง จะใช้ GUI แบบ Color picker จากภาพจากกล้องโดยตรง หรือ จาก Color chart



รูปที่ 44 การเลือกสีฉากหลังด้วย Color picker จากภาพโดยตรง หรือ จาก Color chart ของโปรแกรม vMix



รูปที่ 45 การใช้ Color picker เพื่อเลือกสีฉากหลังจากภาพโดยตรง ของโปรแกรมควบคุม Newtek TriCaster 8000

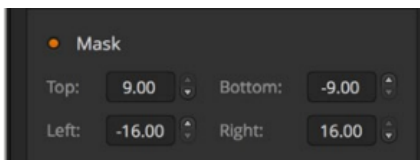
- 1.2. การปรับค่าพารามิเตอร์ของการแยกฉากหลังจะใช้ Track bar หรือ Spin boxes



รูปที่ 46 การปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วย Track bar หรือ Spin boxes ของโปรแกรม OBS

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

1.3. ส่วน Garbage matting หรือ Cropping หรือ Masking เป็นส่วนที่ตัดบริเวณที่ไม่ต้องการทิ้ง ในโปรแกรมส่วนใหญ่จะทำการเลื่อนขอบแต่ละด้านเข้ามาแทน โดยใช้ Track bar หรือ Spin boxes เป็นตัวเลื่อนตามความละเอียดของภาพ



รูปที่ 47 การทำ Mask ด้วย Spin boxes ของโปรแกรมควบคุม Blackmagic Design ATEM 2 M/E Production Studio 4K

2. ส่วนเสริม เช่น การลดสีที่สะท้อนใส่ (Spill Suppression หรือ Despill), การปรับแก้สี (Color correction) มักจะทำการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วย Track bar หรือ Spin boxes เช่นกัน



รูปที่ 48 การปรับค่าพารามิเตอร์ส่วนอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย Track bar หรือ Spin boxes ของโปรแกรมควบคุม DVK-300HD

### หน้าต่างส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ของโปรแกรมที่นำเสนอ

เนื่องจากโปรแกรมที่นำเสนอจะใช้ตัวควบคุมเป็นคีย์บอร์ดและเมาส์ จึงจะใช้ GUI หลัก ที่เป็น Track bar ประกอบกับ GUI แบบอื่นตามความเหมาะสม ดังนี้

ตัวเครื่องจะรับ Input เป็น SDI 2 ช่อง ที่เป็น ภาพจากกล้อง และ ภาพ CG และส่ง Output ออก 2 เป็น ภาพ Alpha และ ภาพ Compose ต่อกับจอมอนิเตอร์ความละเอียด 1920 x 1080 พิกเซล เพื่อใช้ในการควบคุมผ่านคีย์บอร์ดและเมาส์

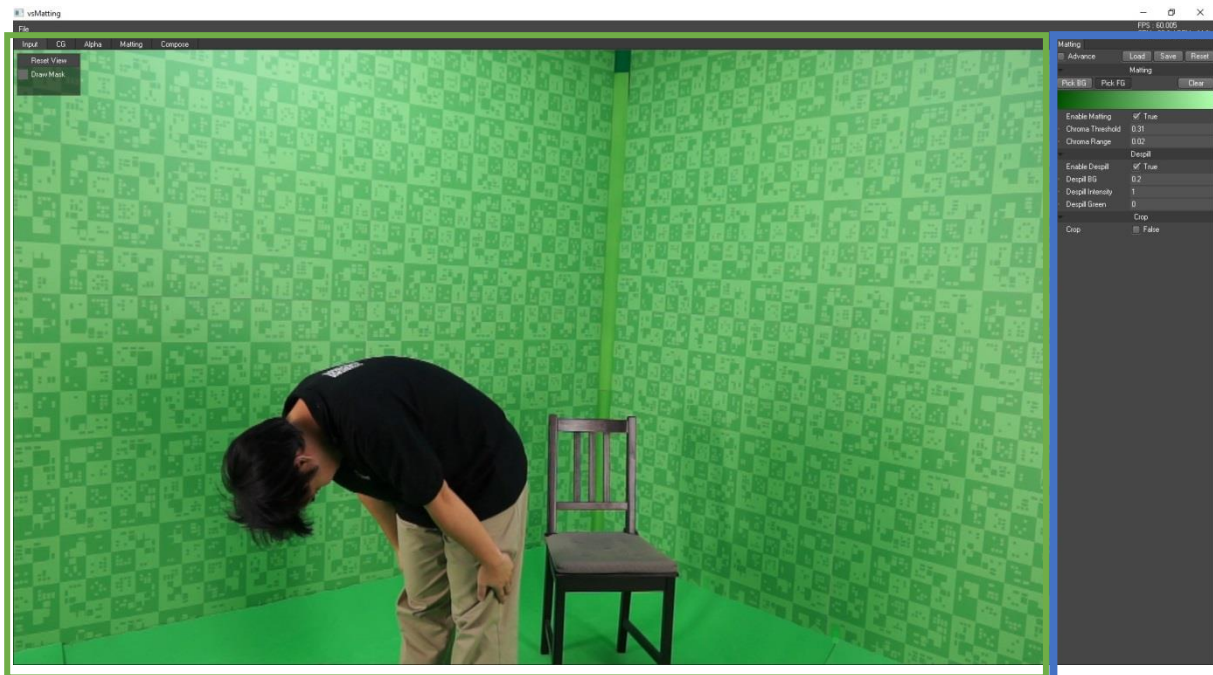


รูปที่ 49 รูปเครื่องประมวลผลและอุปกรณ์อื่น ๆ ประกอบด้วยจอมอนิเตอร์, คีย์บอร์ดและเมาส์

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

## หน้าต่างหลัก

เมื่อเปิดเครื่องมาเครื่องจะเข้าโปรแกรมโดยอัตโนมัติและทำงานในรูปแบบล่าสุดก่อนปิดเครื่องไป จะมีหน้าต่างการทำงานดังนี้ ในหน้าต่างของโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนแสดงภาพ และส่วนปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ



รูปที่ 50 หน้าต่างหลักของโปรแกรมที่นำเสนอบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแสดงภาพ (กรอบสีส้ม) และส่วนปรับค่า (กรอบสีฟ้า)

สาเหตุที่ออกแบบให้หน้าต่างหลักของโปรแกรมมีลักษณะนี้ เนื่องจากต้องการให้มีพื้นที่แสดงภาพใหญ่ที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อที่จะได้เห็นรายละเอียดเล็ก ๆ น้อย ๆ ที่ยังมีปัญหาในขณะที่ปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

## ส่วนแสดงภาพ

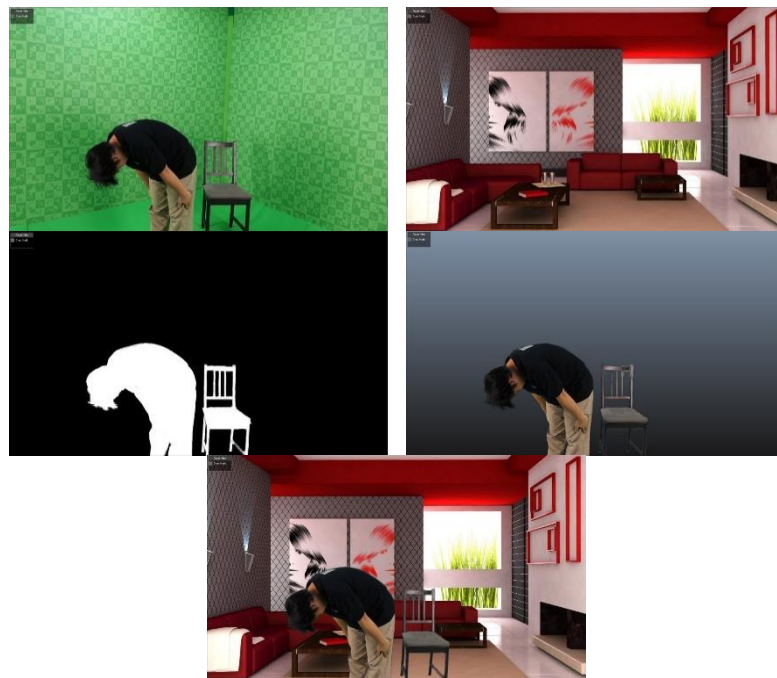


รูปที่ 51 GUI แบบ Tab สำหรับสลับเปลี่ยนการแสดงผลภาพ

ในส่วนแสดงภาพทางผู้พัฒนาใช้รูปแบบ Tab เพื่อใช้ในการสลับเปลี่ยนระหว่างภาพทั้งหมด 5 แบบ ดังนี้

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

1. Input ภาพที่ต้องการแยกฉากหลังที่ได้จากกล้อง
2. CG ภาพฉากหลังใหม่ที่ต้องการใส่ไปแทนฉากหลังเดิม
3. Alpha ภาพความทึบแสงเพื่อบอกว่าบริเวณไหนเป็นฉากหลัง (สีดำ) หรือ บริเวณไหนเป็นนักแสดง (สีขาว)
4. Matting ภาพที่เกิดจากนำภาพ Input และ ภาพ Alpha มาทำให้เกิดภาพนักแสดงที่มีความโปร่งใส
5. Compose ภาพผลลัพธ์สุดท้ายที่เกิดจากการตัดฉากหลังของภาพ Input แล้วนำไปซ้อนบน CG เรียบร้อย



รูปที่ 52 ส่วนแสดงภาพสามารถแสดงภาพได้ทั้งหมด 5 แบบ ดังนี้ Input (บนซ้าย), CG (บนขวา)  
Alpha (ล่างซ้าย), Matting (ล่างกลาง) และ Compose (ล่างขวา)

สาเหตุที่เลือกใช้ Tab ในการเปลี่ยนภาพบริเวณส่วนแสดงภาพ เนื่องจากมีภาพที่ต้องแสดงทั้งหมด 5 ภาพ และต้องการความสามารถในการสลับไปมาระหว่างภาพได้อย่างรวดเร็ว เพียงการใช้เมาส์คลิกเพียงครั้งเดียว (ในกรณีที่ต้องการหาว่าจุดไหนในภาพที่ยังต้องแก้ไข) อีกทั้งยังคล้ายกับการใช้เว็บเบราว์เซอร์ เช่น Internet Explorer, Google Chrome ที่ผู้ใช้ส่วนใหญ่มักคุ้นเคยในการสลับเปลี่ยนหน้าจอภาพในโปรแกรมเดียวกัน

## ส่วนปรับค่า

เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานสำหรับผู้ใช้งานเริ่มต้น ผู้พัฒนาจึงออกแบบให้ส่วนปรับค่าสามารถใช้งานได้ 2 รูปแบบคือ Default และ Advance โดยเลือกผ่าน Checkbox

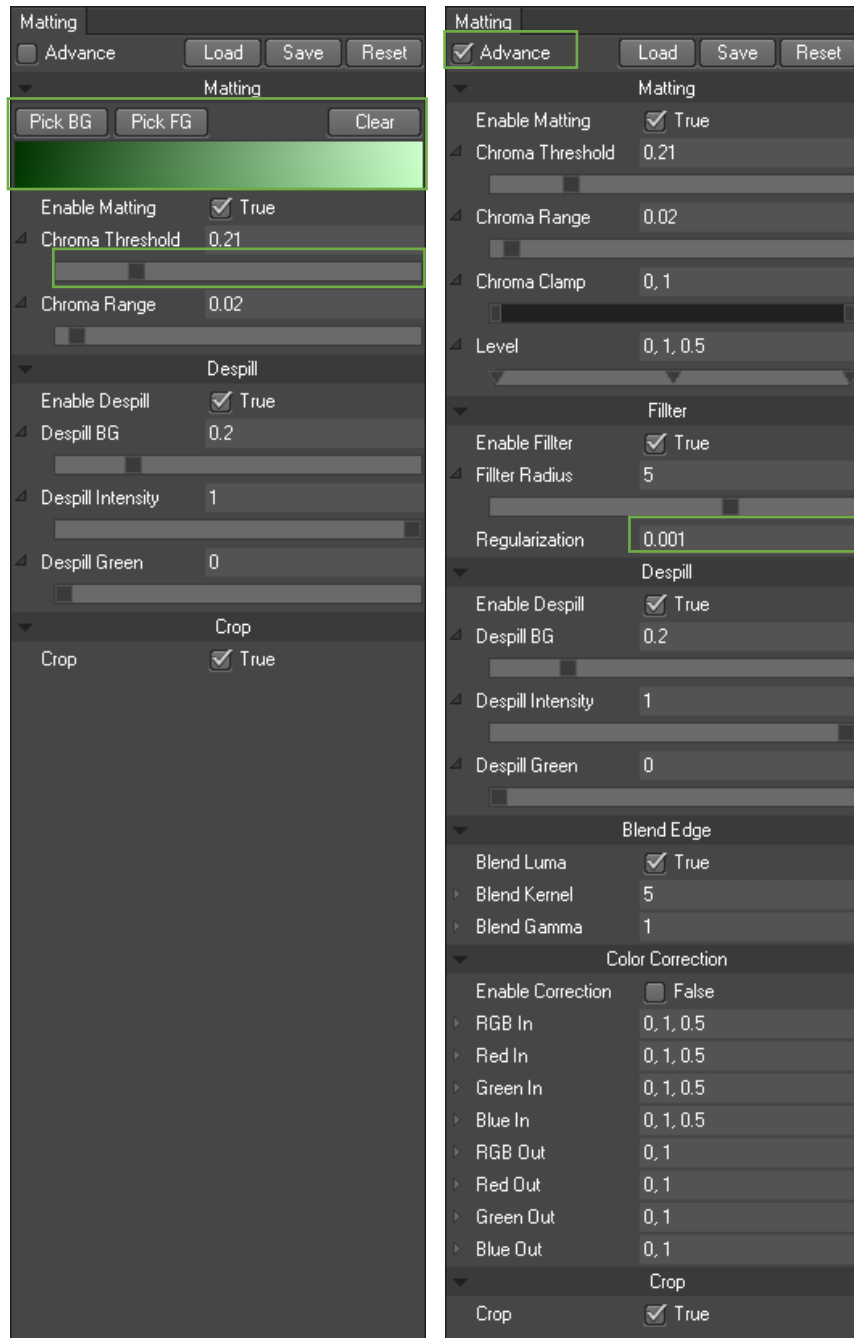


รูปที่ 53 Checkbox Advance สำหรับเปลี่ยนรูปแบบการตั้งค่า

ในส่วนการปรับค่านี้นี้จะมี GUI หลัก ๆ ที่ใช้อยู่ทั้งหมด 4 ชนิด ตามลักษณะการใช้งาน ดังนี้

1. Color picker ใช้สำหรับเลือกสีภาพพื้นหลัง หรือภาพพื้นหน้า
2. Track bar ใช้สำหรับเลื่อนปรับค่าพร้อมสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าที่ปรับได้ทันที
3. Text box ใช้สำหรับกรอกค่าที่ต้องการปรับแบบเป็นตัวเลขเฉพาะเจาะจง
4. Checkbox ใช้สำหรับเลือกเปิด/ปิดการปรับค่านั้น ๆ เช่น การเปิด/ปิดการตั้งค่าแบบ Advance เป็นต้น

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีที่เสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก



รูปที่ 54 แสดงการใช้งาน GUI ประเภทต่าง ๆ ได้แก่ 1. Color picker, 2. Track bar, 3. Text box และ 4. Checkbox และเปรียบเทียบส่วนปรับค่าแบบ Default และ Advance

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

### ส่วนเสริมเพิ่มเติม

ในหัวข้อนี้จะพูดถึงส่วนที่ผู้พัฒนาออกแบบ GUI ให้แตกต่างจากโปรแกรมอื่น ๆ เพื่อที่เพิ่มความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น

### การเลือกสีฉากหลัง

โปรแกรมที่มีอยู่ในท้องตลาดส่วนจะการใช้การเลือกสีของฉากหลังได้เพียงจุดสีจุดเดียว เพื่อไปตัดออก แต่สำหรับโหมด Default ของโปรแกรมนี้อั้ผู้พัฒนาเลือกที่จะทำให้สามารถเลือกสีของฉากหลังจากจุดที่อยู่แตกต่างกันหลาย ๆ จุดได้ อีกทั้งยังสามารถเลือกสีของภาพที่ไม่ต้องการให้ตัดออกได้เช่นกัน



รูปที่ 55 แสดง GUI ของ Color Picker ในการเลือกสี Background (BG) และ Foreground (FG)



รูปที่ 56 แสดงผลลัพธ์เริ่มต้น (ซ้าย), ผลลัพธ์เมื่อการเลือกสี BG เพิ่มบริเวณฉากหลัง (กลาง) และ แสดงการเลือกสี FG เพิ่มบริเวณขาทางแดง(ขวา)

### Garbage matting หรือ Cropping หรือ Masking

ส่วนนี้คือส่วนที่ทำการเลือกเฉพาะส่วนที่ต้องการใช้เท่านั้น บริเวณอื่นที่ไม่อยู่ในส่วนนี้จะถูกตัดออกทันทีโดยไม่คำนึงถึงค่าสี จะมีประโยชน์อย่างมากในกรณีในพื้นที่จำกัดทำให้ภาพที่ได้จากกล้องมีของที่ไม่ต้องการอยู่ จึงต้องมีการใช้ส่วนนี้ในการตัดส่วนที่ไม่ต้องการออกไป แต่ในโปรแกรมอื่น ๆ มักจะการใช้การเลื่อนขอบภาพเข้ามาในแต่ละด้าน แต่ทางผู้พัฒนาเลือกใช้วิธีการกำหนดเป็นจุดขอบภาพแทนในการเลือกส่วนที่ต้องการไว้แทน จึงทำให้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่า



รูปที่ 57 แสดงการ Crop เริ่มจากซ้ายไปขวา เพื่อตัดภาพเก้าอี้ออกจากผลลัพธ์



## สรุปการออกแบบส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้

จากการศึกษาหน้าต่างโปรแกรมประเภทเดียวกันที่มีอยู่ในท้องตลาด และนำมาออกแบบเพื่อให้เข้ากับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นใหม่ โดยคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งาน จึงทำให้ได้โปรแกรมในลักษณะที่ใช้ GUI ประเภทเดียวกันในการทำงานแบบเดียวกัน แต่สิ่งสำคัญที่จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างกันคือการนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จาก GUI ไปประมวลผลตามระเบียบวิธีที่นำเสนอเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง แม่นยำ กลมกลืน และสวยงามมากขึ้น

นอกจากการใช้ GUI ประเภทเดียวกันกับโปรแกรมในท้องตลาดแล้ว ผู้พัฒนายังได้เพิ่มเติมและปรับปรุง GUI บางส่วน เช่น เรื่องการแบ่งหมวดออกเป็น Default สำหรับการใช้งานเบื้องต้น และ Advance สำหรับการปรับค่าขั้นสูง หรือการใช้ Color picker สำหรับเลือกสี Background และ Foreground ได้ เป็นต้น สามารถสรุปได้ตามตารางด้านล่างนี้

ประเภท	ซอฟต์แวร์
ตัวควบคุม (Controller)	คีย์บอร์ดและเมาส์
การเลือกสีฉากหลัง	Color picker (สามารถเลือกสี BG และ FG ได้)
การปรับค่าพารามิเตอร์	Track bar + Spin boxes + Text box
Cropping	ได้เป็นกรอบ Polygon

ตาราง 7 สรุปการออกแบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้

การออกแบบส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ของผู้พัฒนาตามรายงานฉบับนี้ มุ่งเน้นและคาดหวังที่จะอำนวยความสะดวกให้ทั้งผู้ใช้งานใหม่ และผู้ใช้งานที่เคยใช้โปรแกรมอื่นมาก่อน และหวังว่าผู้ที่ได้มาใช้งานโปรแกรมนี้จะสามารถปรับตัวเข้ากับโปรแกรมนี้ได้รวดเร็วและใช้งานได้สะดวกขึ้น

## บทที่ 9

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์แยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการถ่ายทำรายการโทรทัศน์ และมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เป้าหมายคือเพื่อให้ได้อุปกรณ์ดังกล่าวซึ่งถูกพัฒนาขึ้นด้วยนักวิจัยภายในประเทศ แนวคิดของงานวิจัยนี้อยู่ที่การนำเอาระบบคอมพิวเตอร์มาใช้ในการคำนวณการแยกฉากหลัง โดยนำเอาขั้นตอนวิธีที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายแล้วมาพัฒนาเพิ่มเติมเทคนิคต่าง ๆ เข้าไป โดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ปัจจุบันซึ่งมีพลังในการทำงานที่มากมาย พร้อมกับการใช้อุปกรณ์รับรู้ความลึกมาเสริมในการทำงาน ซึ่งอุปกรณ์รับรู้ความลึกนี้จะช่วยให้ระบบทราบได้ว่าจุดใดในภาพข้อมูลนำเข้านั้นมีความลึกเท่าไร และใช้สมมติฐานที่ว่าจุดที่อยู่ลึกที่สุด ซึ่งคือจุดที่ไกลจากกล้องถ่ายวีดิทัศน์มากที่สุด นั้นจะต้องเป็นจุดที่เป็นฉากหลังอย่างแน่นอน และนำเอาข้อมูลดังกล่าวมาช่วยในการแก้ปัญหาการแยกฉากหลัง

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับการแยกภาพวัตถุออกจากฉากหลังโดยใช้วิธีการพิจารณาค่าสีร่วมกับอุปกรณ์รับรู้ความลึก
2. เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการแยกภาพวัตถุออกจากฉากหลังโดยใช้วิธีการพิจารณาค่าสี ซึ่งสามารถทำงานได้อย่างสะดวก

สำหรับวัตถุประสงค์ที่ 1 นั้นบรรลุได้โดยการเลือกเอาวิธีการแยกฉากหลังที่มีอยู่แล้วมาพัฒนาปรับปรุงเพิ่มเติม การเลือกวิธีการแยกฉากหลังที่มีอยู่แล้วนั้นทำโดยการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งหลาย และเลือกวิธีที่เหมาะสมกับงานวิจัยมาสองวิธี ได้แก่ Color Difference และ Chroma Key แล้วจึงทำการทดลองเปรียบเทียบหาวิธีการที่เหมาะสม ซึ่งได้ผลสรุปเป็นวิธีการ Color Difference ตามการทดลองในบทที่ 4

การปรับปรุงวิธีการดังกล่าว อาศัยแนวคิดสองส่วนคือการพัฒนาทางด้านขั้นตอนวิธี และการนำเอาอุปกรณ์รับรู้ความลึกมาเสริม สำหรับการพัฒนาทางขั้นตอนวิธีนั้น ทางผู้วิจัยได้มีข้อสังเกตว่าขั้นตอนวิธี Color Difference นั้นต้องอาศัยพารามิเตอร์ที่สำคัญคือค่าความต่างของสีสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งต้องกำหนดโดยผู้ใช้ ค่าพารามิเตอร์นี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าความทึบ ซึ่งระบุว่าแต่ละจุดสีในภาพนั้นมีความเป็นฉากหลังมากน้อยเพียงใด อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะใช้ค่าเดียวกันตลอดทั้งภาพ ในขณะที่บริเวณต่าง ๆ ในภาพนั้นอาจจะมีค่าดังกล่าวที่เหมาะสมแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น บริเวณที่มีความสว่างมาก ค่าที่เหมาะสมก็จะมีค่าที่แตกต่างจากบริเวณที่มีความสว่างน้อย งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้นำเอาขั้นตอนวิธีการประมาณความหนาแน่นคอร์เนลมาใช้ เพื่อปรับ

ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้เหมาะสมกับแต่ละบริเวณของภาพ ซึ่งรายละเอียดของวิธีการดังกล่าวได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 5

ผลลัพธ์จากการนำเอาขั้นตอนวิธีการประมาณค่าความหนาแน่นคอร์เนลมาใช้นั้นทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้น ดังที่เห็นได้จากผลการทดลองในบทที่ 7 อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยยังเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้นั้นยังสามารถปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นไปได้อีก เนื่องจากค่าความทึบที่ได้มานั้นมีความไม่ราบเรียบที่สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะใช้ตัวกรองต่าง ๆ มาใช้ในการปรับลดความไม่ราบเรียบเหล่านั้น อย่างไรก็ตาม จุดที่เป็นจุดเปลี่ยนผ่านระหว่างฉากหลังกับส่วนที่เป็นนักแสดงนั้นมักจะมีความไม่ราบเรียบอยู่แล้ว ทางคณะผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ตัวกรองแบบนำทางซึ่งเป็นตัวกรองที่ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความราบเรียบมากยิ่งขึ้น โดยอาศัยข้อมูลสีจากภาพนำเข้ามาเป็นตัวนำทางในการปรับความราบเรียบ วิธีการดังกล่าวนี้ได้ถูกกล่าวถึงในรายละเอียดไว้ในบทที่ 6 และได้ทำการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพในบทที่ 7

นอกเหนือไปจากการใช้การประมาณค่าความหนาแน่นคอร์เนล และ การใช้ตัวกรองแบบนำทางแล้ว งานวิจัยชิ้นนี้ยังเห็นถึงปัญหาการกำหนดค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นโดยผู้ใช้ ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญ งานวิจัยนี้จึงได้เสนอการปรับค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นอัตโนมัติ โดยใช้อุปกรณ์วัดความลึก ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานคือจุดที่อยู่ไกลจากกล้องวิดิทัศน์มากที่สุดนั้นคือจุดที่เป็นฉากหลังอย่างแน่นอน และได้เสนอขั้นตอนในการนำเอาอุปกรณ์รับรู้ความลึกมาช่วยปรับค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นให้เหมาะสม ดังที่ได้กล่าวไว้ในช่วงหลังของบทที่ 5

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นโดยละเอียด โดยมีการวัดระยะเวลาที่ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการทำงาน ได้ข้อสรุปว่าเวลาที่ใช้สำหรับการประมวลผลภาพที่ความละเอียดระดับ Full HD (1920 x 1080) นั้นสามารถทำได้ภายในเวลาต่ำกว่า 12 มิลลิวินาทีบนเครื่องคอมพิวเตอร์สมรรถนะปานกลางในปัจจุบัน ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานในการถ่ายทำรายการโทรทัศน์ที่ความละเอียด Full HD ที่ความถี่ 60 เฟรมต่อวินาที และได้ทำการวัดความแม่นยำในการแยกฉากหลัง โดยวัดค่า RMS Error ระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีที่ได้พัฒนาขึ้นเทียบกับขั้นตอนวิธี Color Difference ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบบนตัวแปรต้นต่าง ๆ เช่นสีเสื้อของนักแสดง สภาพแสง คุณภาพของกล้องที่ใช้ และระยะห่างระหว่างนักแสดงกับฉากหลัง โดยได้ข้อสรุปว่าขั้นตอนวิธีที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นให้ความแม่นยำที่ดีกว่าในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ กันเหล่านั้นอย่างเห็นได้ชัด

เมื่อได้ผลการทดลองจนเป็นที่มั่นใจแล้วว่าวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นมีคุณภาพที่ดีและสามารถใช้งานได้จริง จึงได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบซึ่งใช้ขั้นตอนวิธีดังกล่าว โดยได้ทำการศึกษาอุปกรณ์ดังกล่าวที่มีอยู่ในท้องตลาดเพื่อสร้างส่วนประสานกับผู้ใช้ที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับกับผู้ใช้ที่มีอยู่

แล้ว และได้ออกแบบส่วนประสานกับผู้ใช้ตามแนวทางดังกล่าว การออกแบบอุปกรณ์และผลผลิตมีรายละเอียดอยู่ในบทที่ 8 พร้อมกันนี้ได้จัดทำเอกสารสำหรับการขอสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรของอุปกรณ์ต้นแบบดังกล่าว เพื่อเป็นทรัพย์สินทางปัญญาของผู้ให้ทุนต่อไป

### ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้งานวิจัยจะเสร็จสมบูรณ์แล้ว และได้ต้นแบบอุปกรณ์ที่สามารถใช้งานได้จริง โดยที่มีคุณภาพดีและใช้วัสดุอุปกรณ์ราคาต่ำแล้วก็ตาม การพัฒนาต่อยอดยังสามารถทำได้อีกมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการพัฒนาต้นแบบให้เป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งต้องการการสนับสนุนทางด้านการตลาด รวมถึงการยอมรับจากผู้ใช้งานจริง ซึ่งจะต้องมีการพัฒนาในอีกหลาย ๆ ด้าน ได้แก่

- การแนะนำผลิตภัณฑ์ให้เป็นที่รู้จักต่อตลาด การโฆษณา ทดลองใช้
- การขาย ติดตั้ง และฝึกอบรมการใช้งาน
- การบริการหลังการขาย การซ่อมบำรุง

ทางคณะผู้วิจัยจะได้พยายามพัฒนาในส่วนต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วต่อไป โดยหวังว่าจะได้รับการสนับสนุนต่าง ๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อมจากหน่วยงานและบริษัทต่าง ๆ ในอนาคต

### บรรณานุกรม

- [Chuang01] Y.-Y. Chuang, B. Curless, D. Salesin, and R. Szeliski, "A Bayesian Approach to Digital Matting," Proc. CVPR, pp. 264-271, 2001.
- [Achanta12] R. Achanta, A. Shaji, K. Smith, A. Lucchi, P. Fua, and S. Susstrunk, "Slic superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 34, no. 11, pp. 2274-2282, Nov. 2012.
- [Ashikhmin97] M. Ashikhmin. "High Quality Chroma Key". Available from: <http://www.cs.utah.edu/~michael/chroma/> , 1997
- [Bradski00] Bradski, G., "The OpenCV Library", Dr. Dobb's Journal of Software Tools, 2000
- [Chen12] Q. Chen, D. Li, and C.-K. Tang, "Knn matting," in Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on. IEEE, 2012, pp. 869-876.
- [Craig05] John J. Craig, "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", Pearson Education, Incorporated, 2005
- [Gastal10] E. S. L. Gastal and M. M. Oliveira, "Shared sampling for real-time alpha matting," Computer Graphics Forum, vol. 29, no. 2, pp. 575-584, May 2010, proceedings of Eurographics.
- [Gastal11] E.S.L. Gastal and M.M. Oliveira, "Domain Transform for EdgeAware Image and Video Processing," ACM Trans. Graphics, vol. 30, no. 4, pp. 69:1-69:12, 2011.
- [He11] K. He, C. Rhemann, C. Rother, X. Tang, and J. Sun, "A global sampling method for alpha matting," in Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on, June 2011, pp. 2049-2056.
- [He13] K. He, J. Sun, and X. Tang, "Guided Image Filtering," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 35, no. 6, pp. 1397-1409, June 2013.
- [Huang75] T. Huang, "Two-Dimensional Signal Processing II : Transforms and Median Filters," Springer Verlag, Berlin, 1975.

- [Jin14] M. Jin, B.-K. Kim, and W.-J. Song, “Adaptive propagation-based color-sampling for alpha matting,” *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 7, pp. 1101–1110, July 2014.
- [Johnson14] J. Johnson, D. Rajan, and H. Cholakkal, “Sparse codes as alpha matte,” in *BMVC*, 2014
- [Kass10] M. Kass and J. Solomon, “Smoothed Local Histogram Filters,” *ACM Trans. Graphics*, vol. 29, pp. 100:1-100:10, July 2010.
- [Lee11] P. G. Lee and Y. Wu, “Nonlocal matting,” in *2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, 2011, pp. 2193–2200.
- [Levin08] A. Levin, D. Lischinski, and Y. Weiss, “A closed-form solution to natural image matting,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, no. 2, pp. 228–242, 2008.
- [Loktyushin11] A. Loktyushin and S. Harmeling, “Automatic Foreground-Background Refocusing,” *ICIP 2011*
- [Mishima93] Y. Mishima, “Soft Edge Chroma-Key Generation Based upon Hexoctahedral Color Space” . U.S.Patent 5355174, 1993
- [Myeong14] H. Myeong, S. Lin and K. Lee, “Alpha Matting of Motion-Blurred Objects in Bracket Sequence Images”, *ECCV 2014*
- [Paris06] S. Paris and F. Durand, “A Fast Approximation of the Bilateral Filter Using a Signal Processing Approach,” *Proc. European Conf. Computer Vision*, 2006.
- [Perreault07] S. Perreault and P. Hébert, “Median Filtering in Constant Time,” *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 16, no. 9, pp. 2389-2394, Sept. 2007.
- [Porikli08] F. Porikli, “Constant Time  $O(1)$  Bilateral Filtering,” *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008.
- [Poynton12] C. Poynton, “*Digital Video and HD: Algorithms and Interfaces*”, Second Edition, Morgan Kaufman, 2012
- [Rajan12] D. Rajan, “Weighted color and texture sample selection for image matting,” in *Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision*

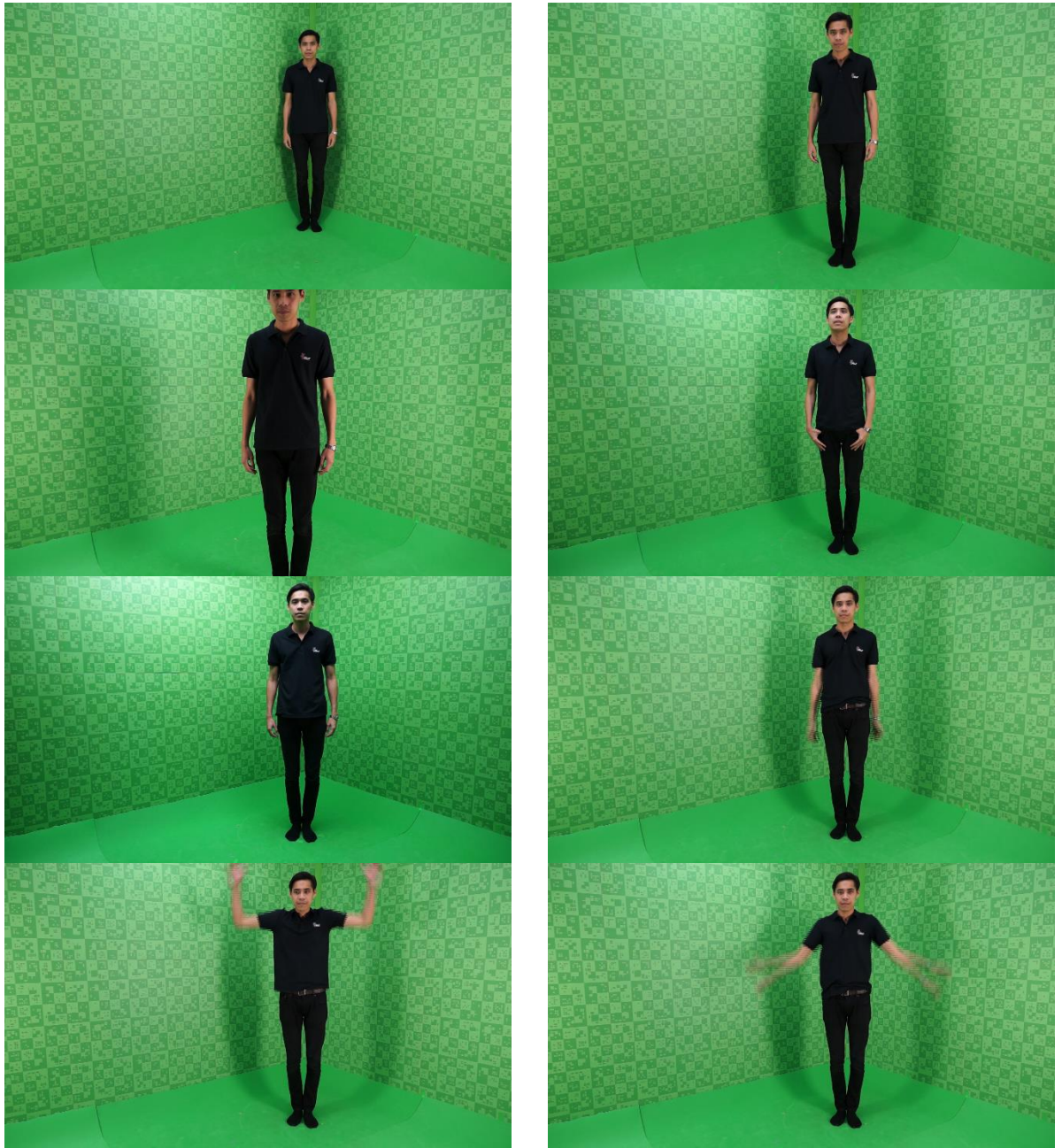
- and Pattern Recognition (CVPR), ser. CVPR'12. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2012, pp. 718–725.
- [Ren15] C. Y. Ren, V. A. Prisacariu, and I. D. Reid, “gslicr: SLIC superpixels at over 250 Hz,” CoRR, vol. abs/1509.04232, 2015.
- [Sanchez13] E.J. Fernandez-Sanchez, J. Diaz and E. Ros, “Background Subtraction Based on Color and Depth Using Active Sensors”, Sensors 2013, Vol. 13, pp 8895-8915
- [Shahrian13] E. Shahrian, D. Rajan, B. Price, and S. Cohen, “Improving image matting using comprehensive sampling sets,” in Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, ser. CVPR '13. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2013, pp. 636–643.
- [Tomasi98] C. Tomasi and R. Manduchi, “Bilateral Filtering for Gray and Color Images,” Proc. IEEE Int’l Computer Vision Conf., 1998.
- [Ultimatte02]<http://www.ultimatte.com>
- [Wang07] J. Wang and M. Cohen, “Optimized color sampling for robust matting,” in IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR'07, 2007, pp. 1–8.
- [Wang07] J. Wang and M. Cohen, "Image and Video Matting: A Survey," FTCCGV, vol. 3, no. 2, 2007.
- [Weiss06] B. Weiss, “Fast Median and Bilateral Filtering,” ACM Trans. Graphics, vol. 25, no. 3, pp. 519-526, July 2006.
- [Wright08] S. Wright, “Compositing Visual Effects: Essential for the Aspiring Artists”, Elsevier 2008
- [Wright10] S. Wright, Digital Compositing for Film and Video, ser. Focal Press visual effects and animation series. Elsevier/Focal Press, 2010.
- [Yang09] Q. Yang, K.-H. Tan, and N. Ahuja, “Real-Time O(1) Bilateral Filtering,” Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 557-564, 2009.
- [Yoon12] S. M. Yoon and G. Yoon, “Alpha matting using compressive sensing. Electronics letters,” 48(3):153–155, 2012.

- [Zheng12] Z. Zhang, Q. Zhu, and Y. Xie, “Learning based alpha matting using support vector regression,” in ICIP, 2012.

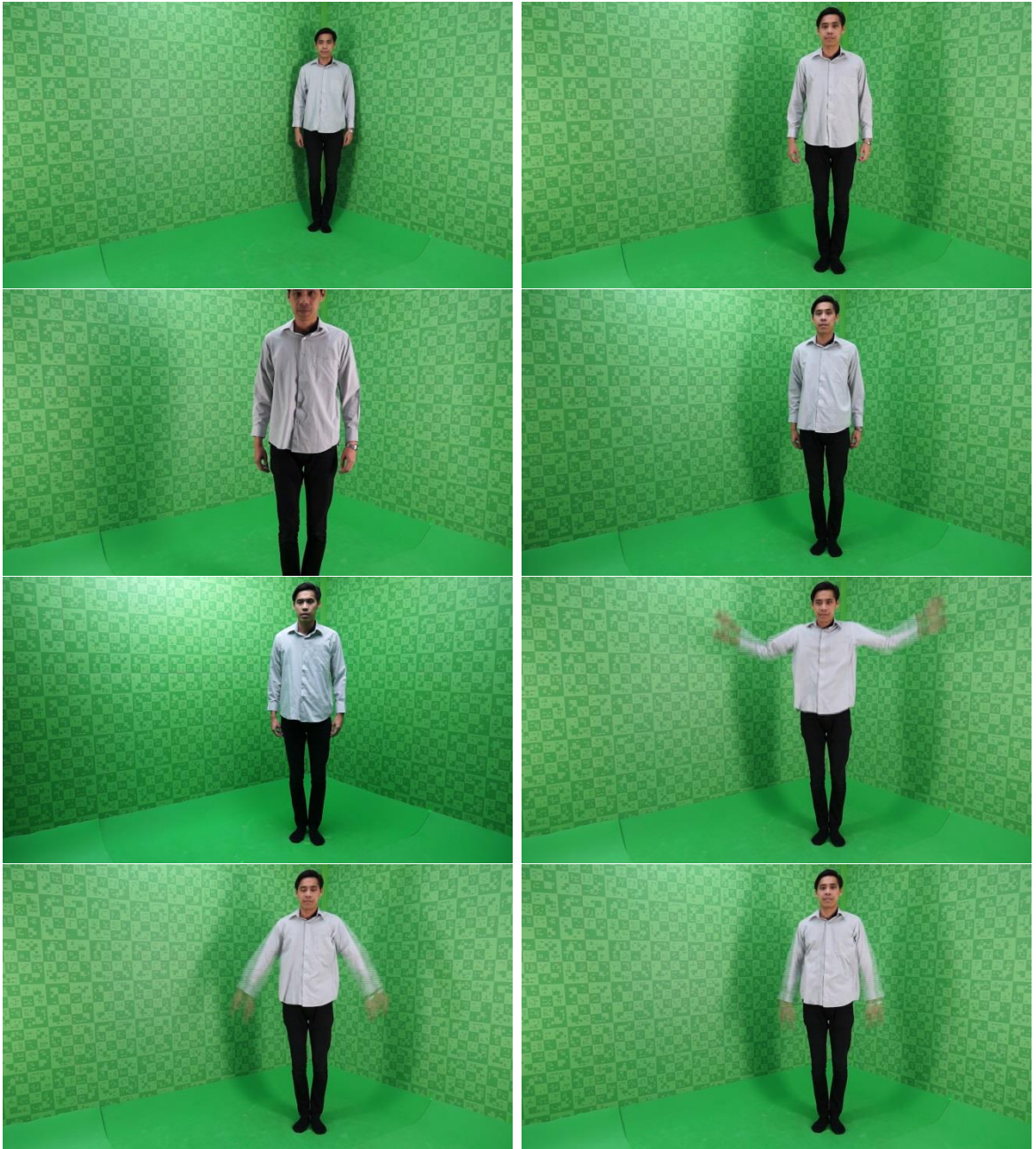


ภาคผนวก ก  
ผลการทดลองเปรียบเทียบขั้นตอนวิธี Color Difference และ  
Chroma Key

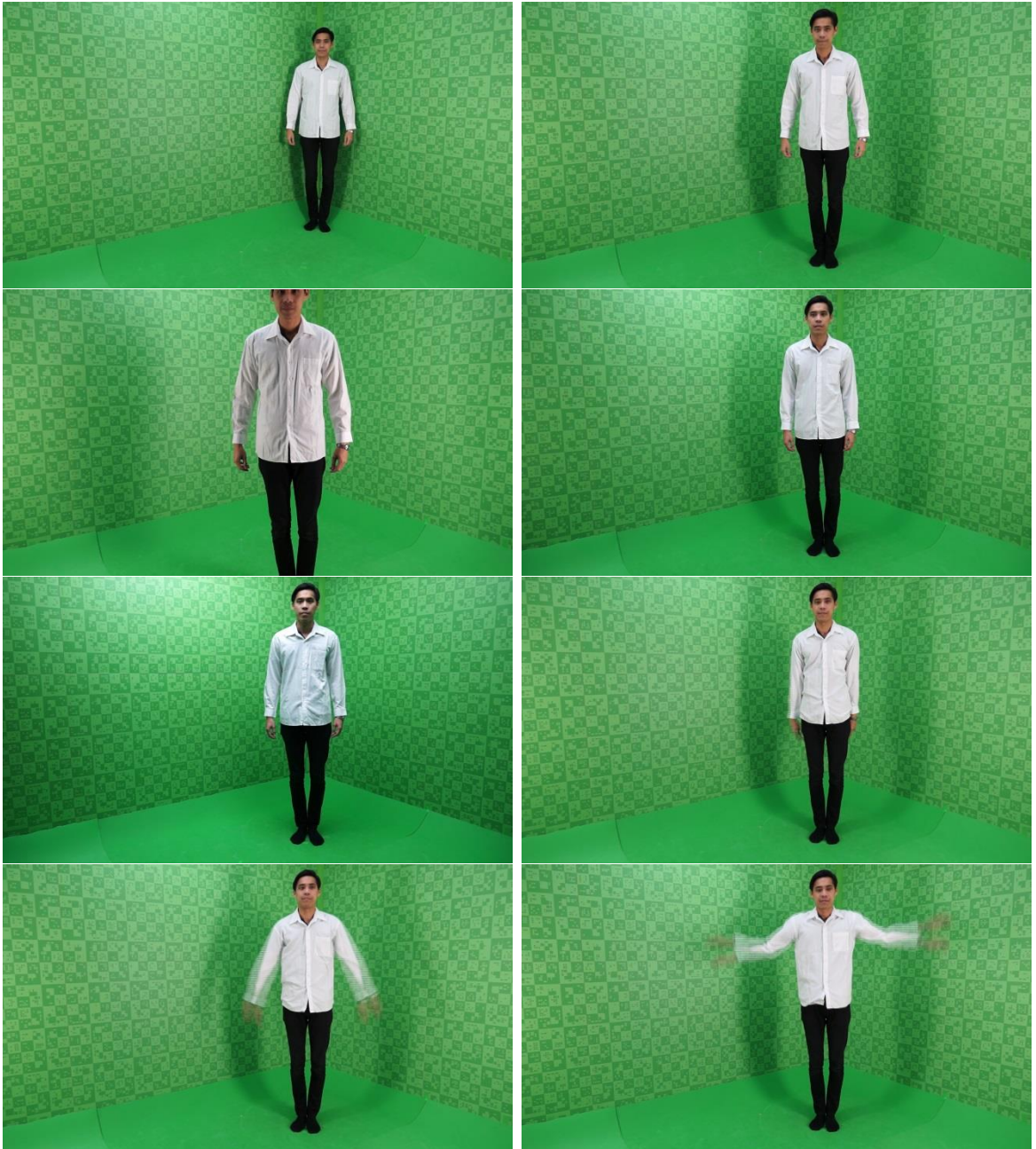
บทนี้จะแสดงถึงภาพผลลัพธ์ของการทดลองการเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีต่าง ๆ ที่เลือกมาใช้เป็นขั้นตอนวิธีเบื้องต้น ดังที่ได้กล่าวไว้ใน บทที่ 4 การทดลองเปรียบเทียบวิธี Color Difference และ Chroma Key ซึ่งจะแสดงถึงภาพเฟรมตัวอย่างและผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง



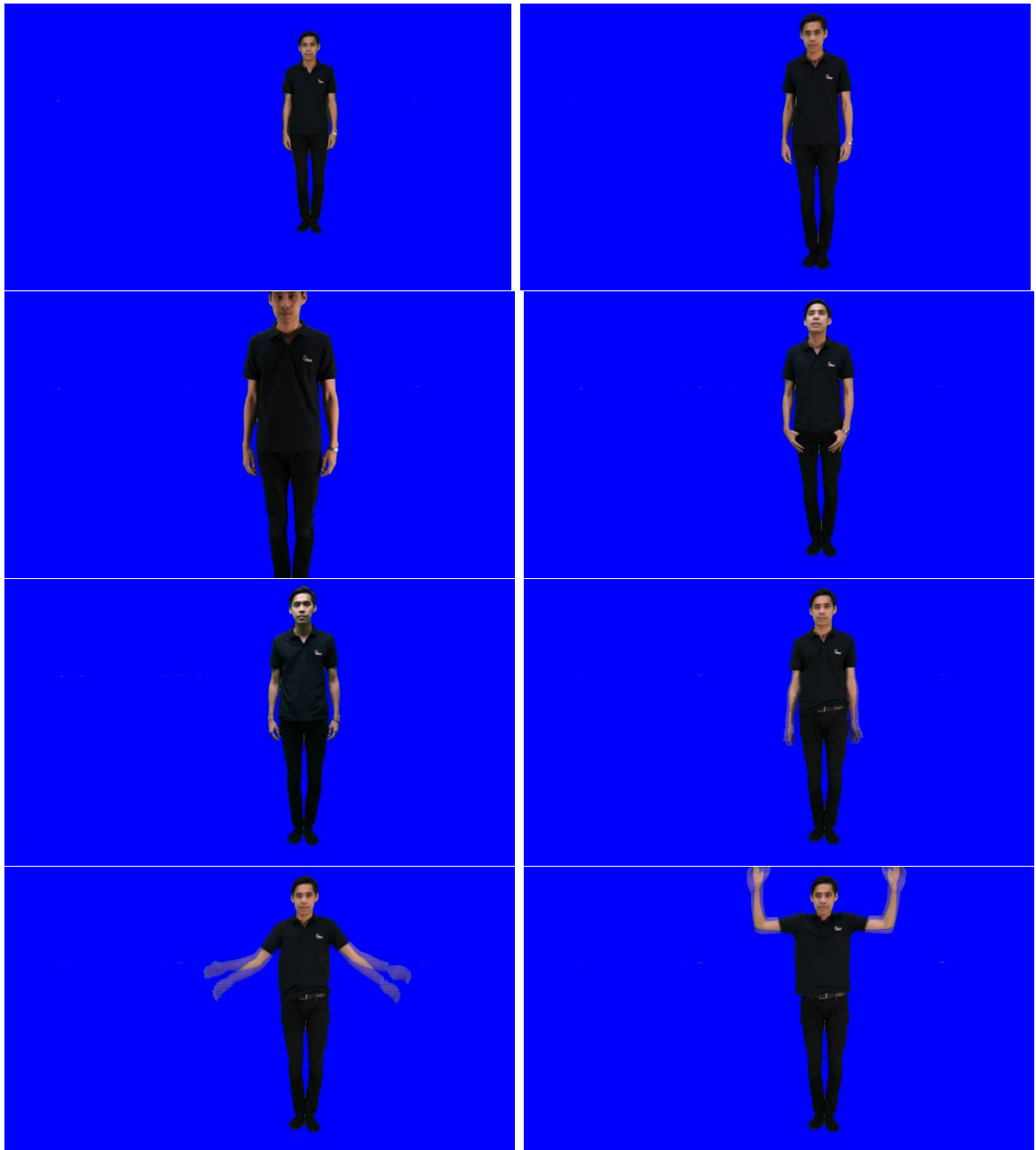
รูป 58 ตัวอย่างภาพนำเข้าเมื่อใส่เสื้อสีดำ



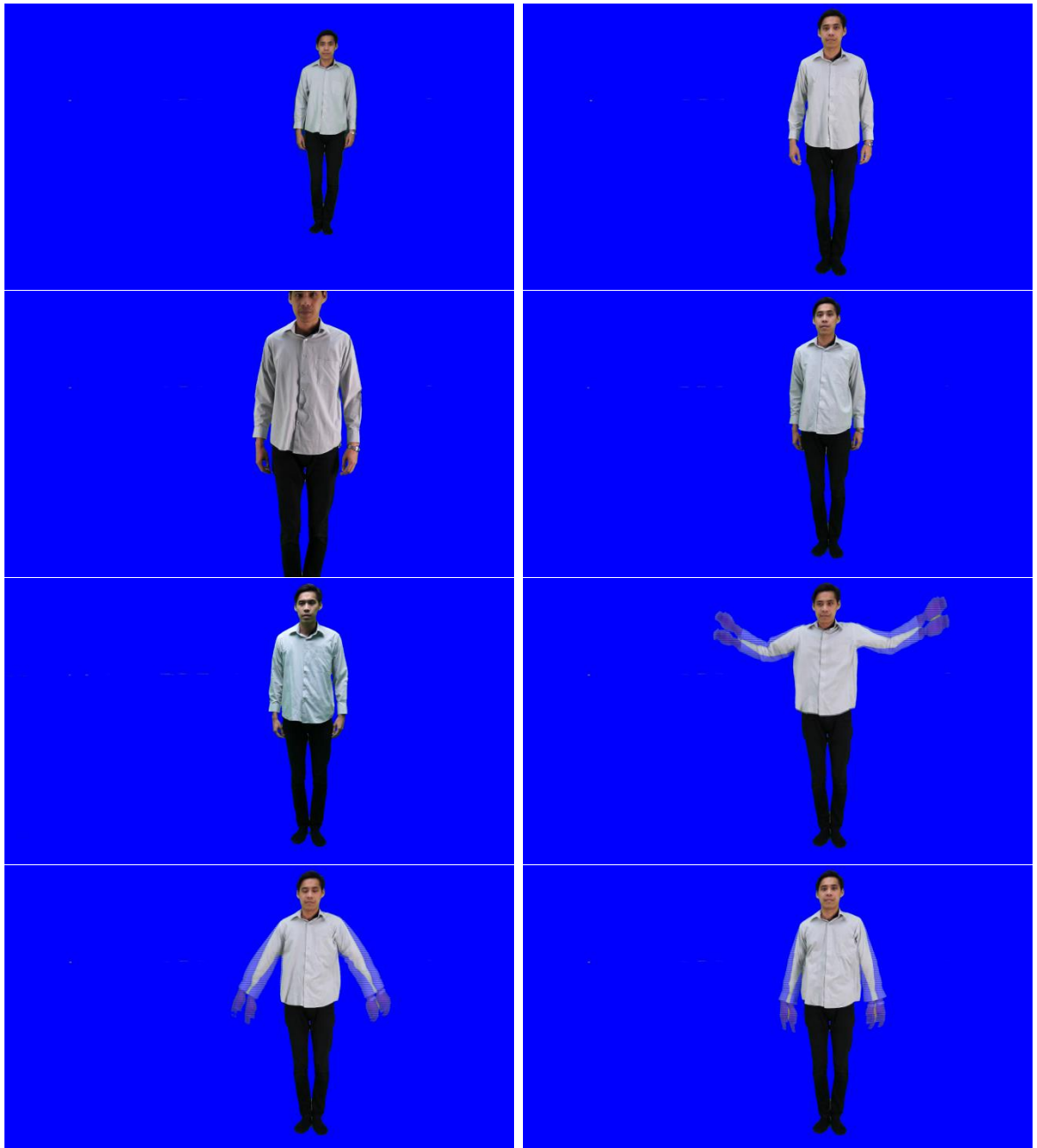
รูป 59 ตัวอย่างภาพนำเข้าเมื่อใส่เสื้อสีเทา



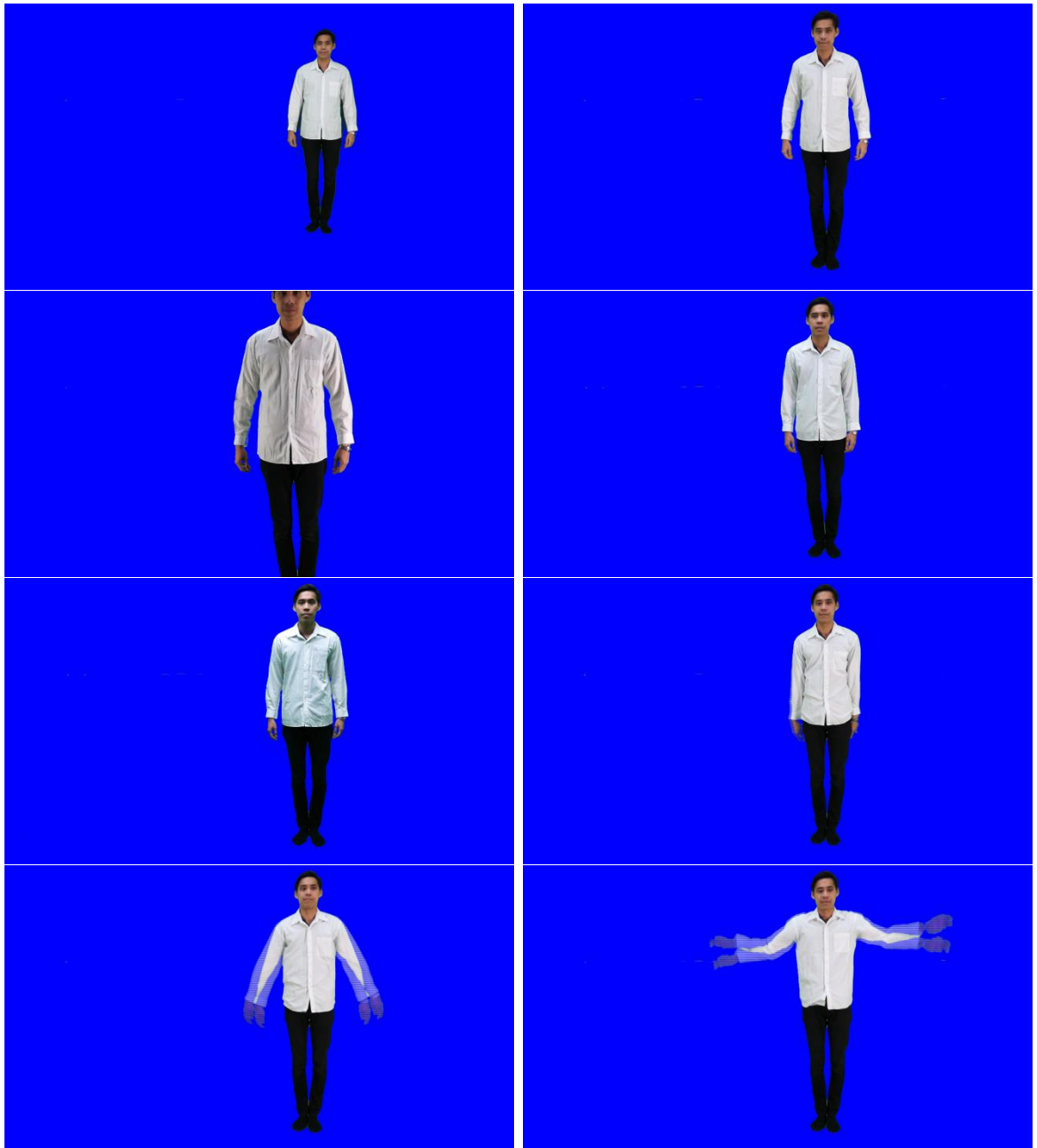
รูป 60 ตัวอย่างภาพนำเข้าเมื่อใส่เสื้อสีขาว



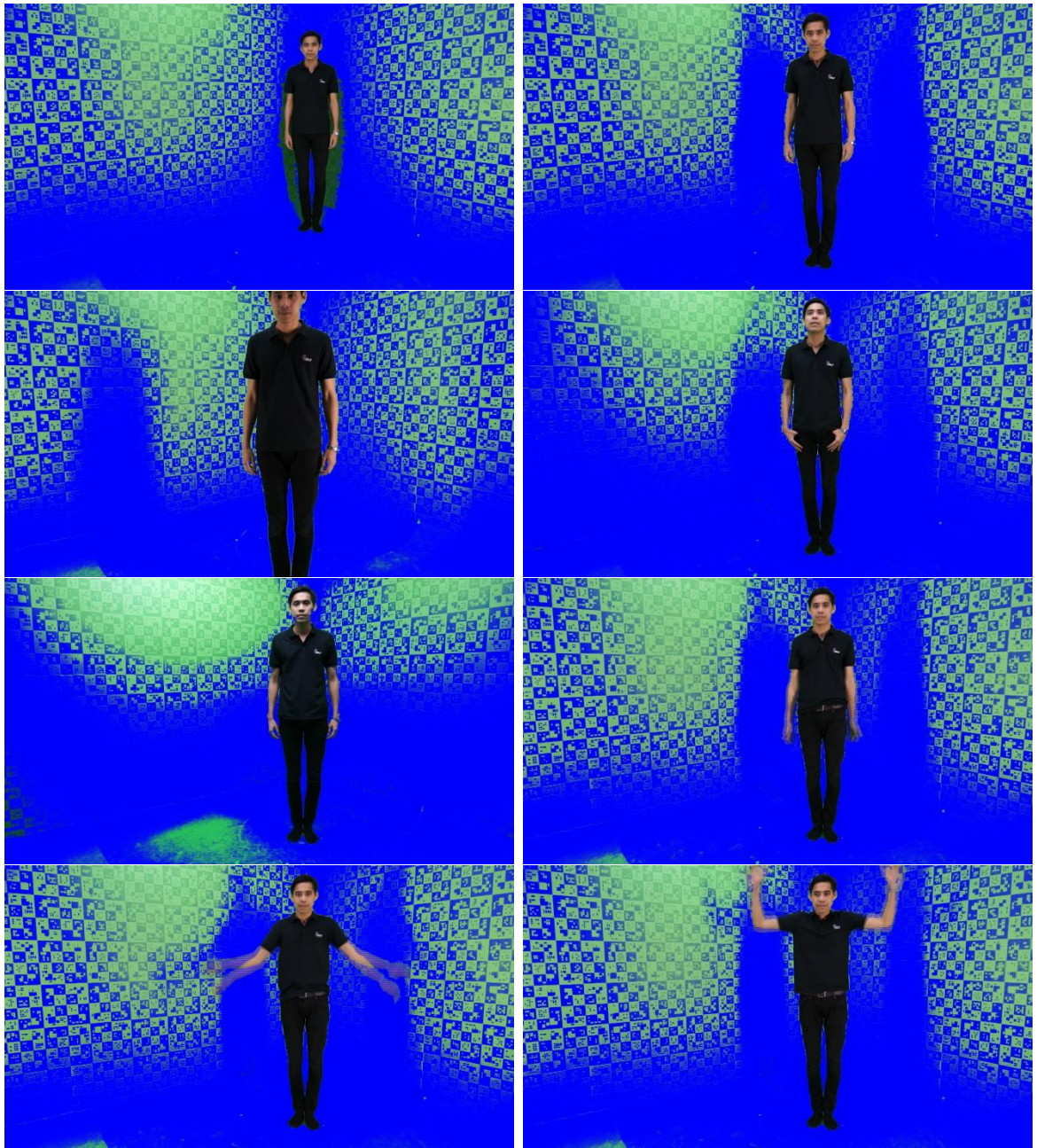
รูป 61 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Color difference เมื่อใส่เสื้อสีดำ



รูป 62 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Color difference เมื่อใส่เสื้อสีเทา

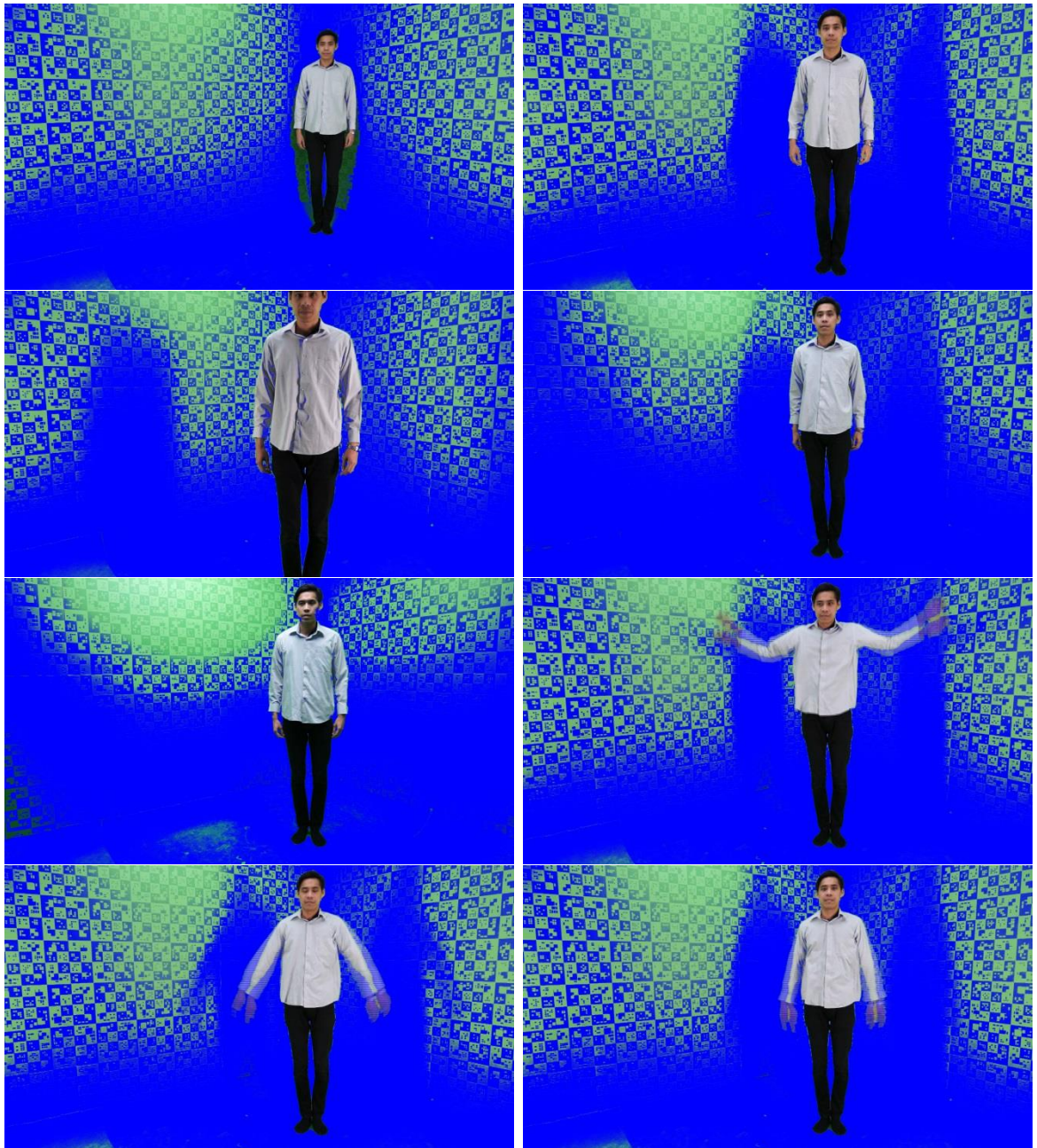


รูป 63 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Color difference เมื่อใส่เสื้อสีขาว

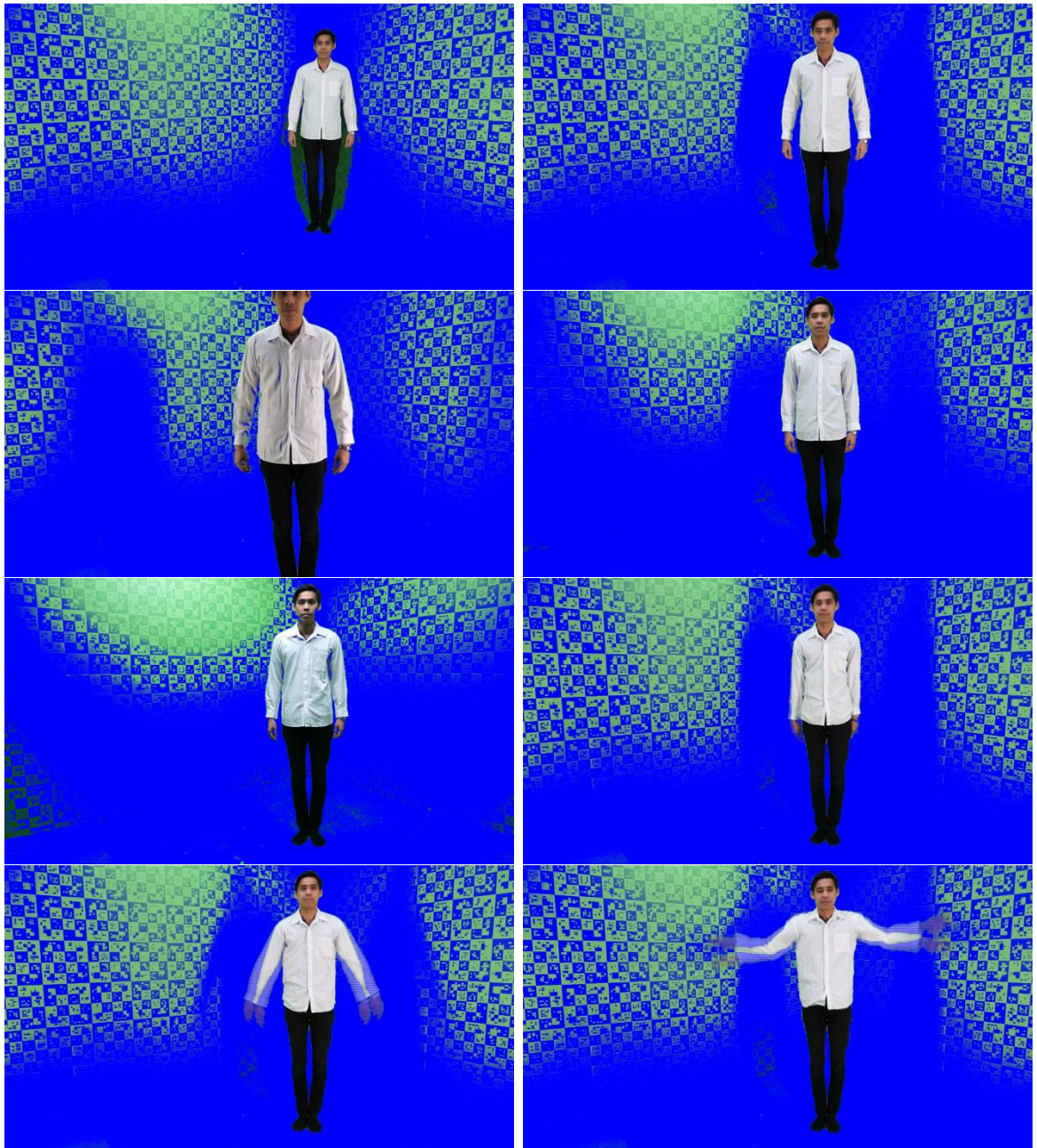


รูป 64 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี RGB เมื่อใส่เสื้อสีดำ

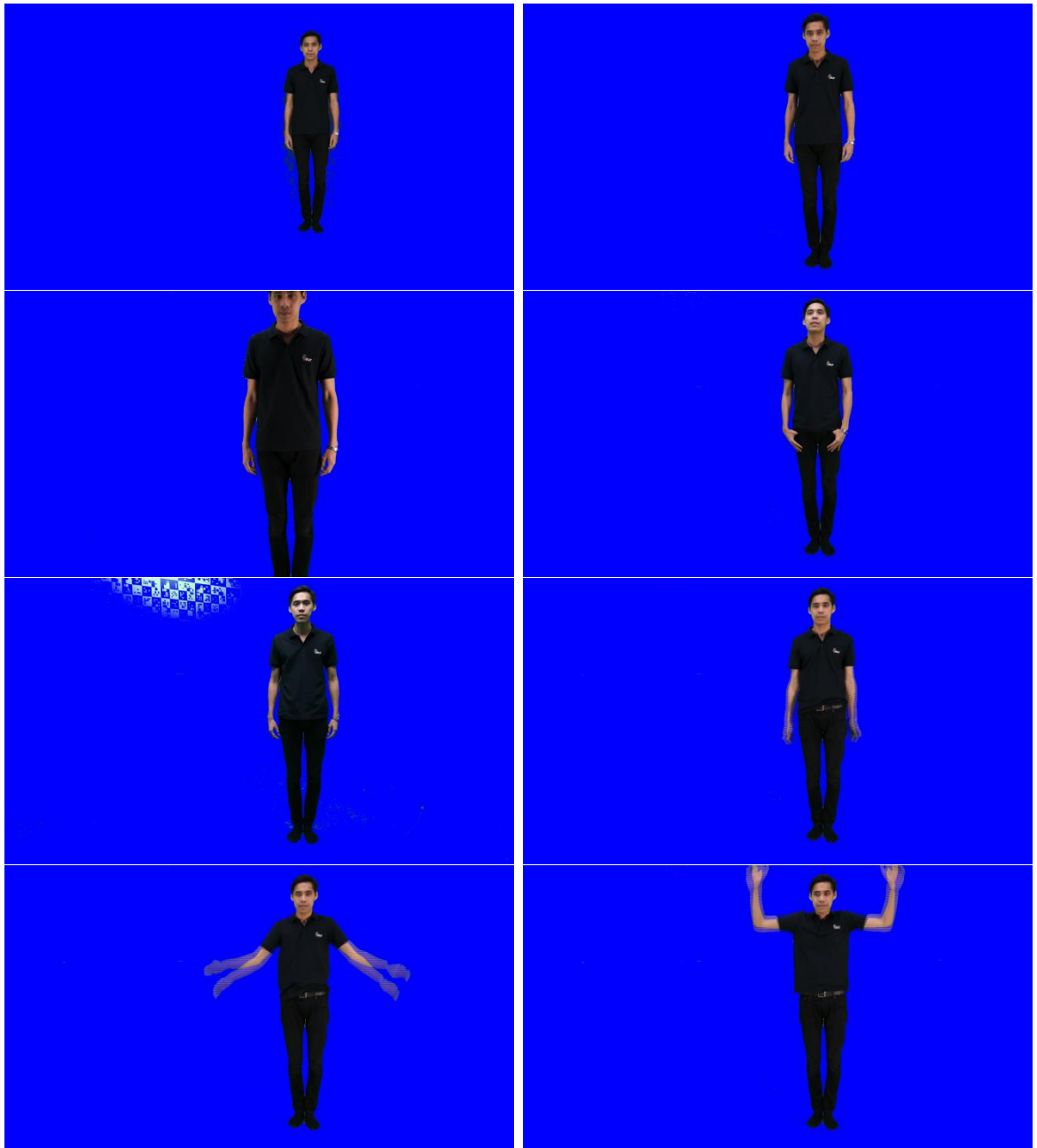




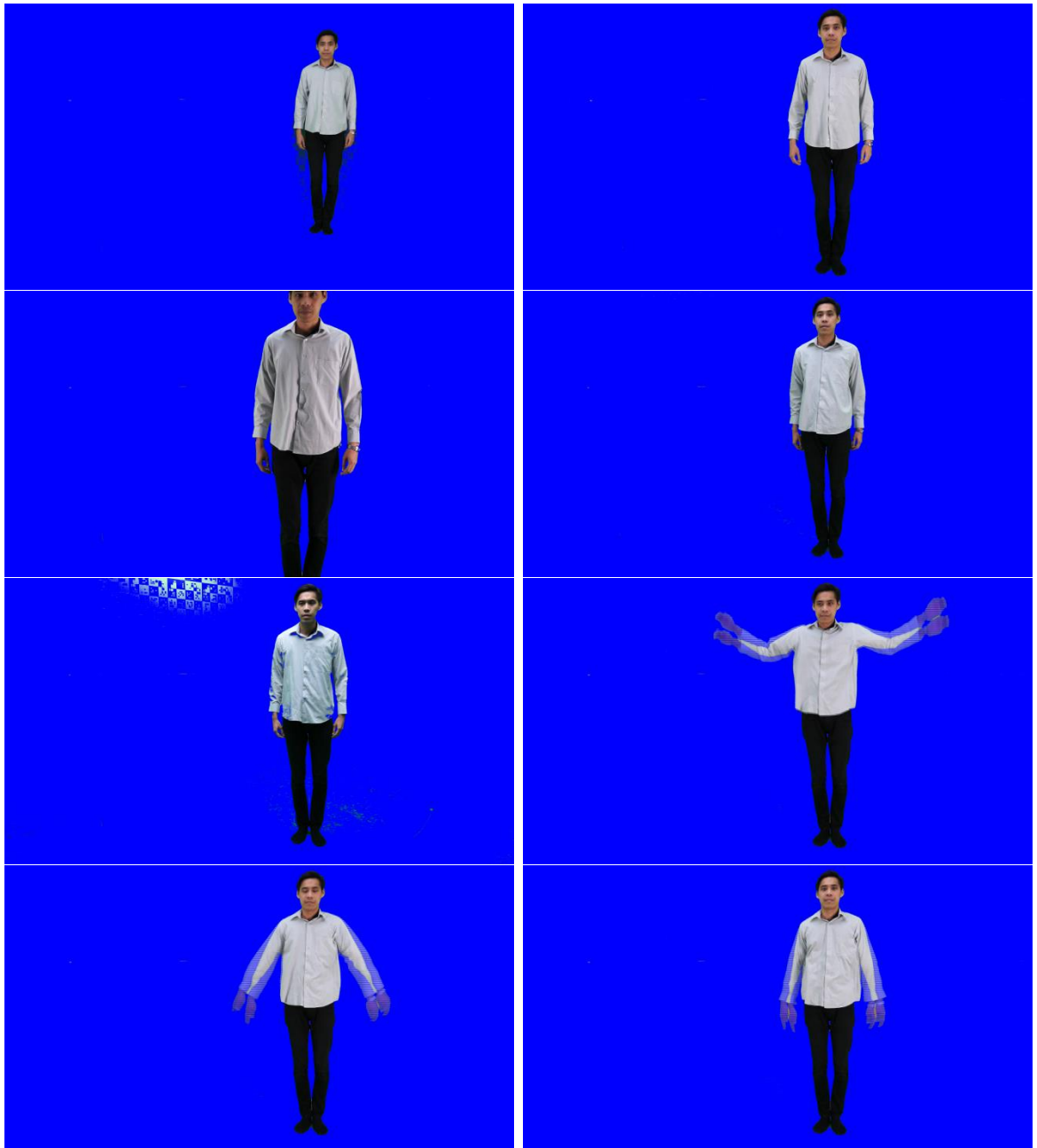
รูป 65 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี RGB เมื่อใส่เสื้อสีเทา



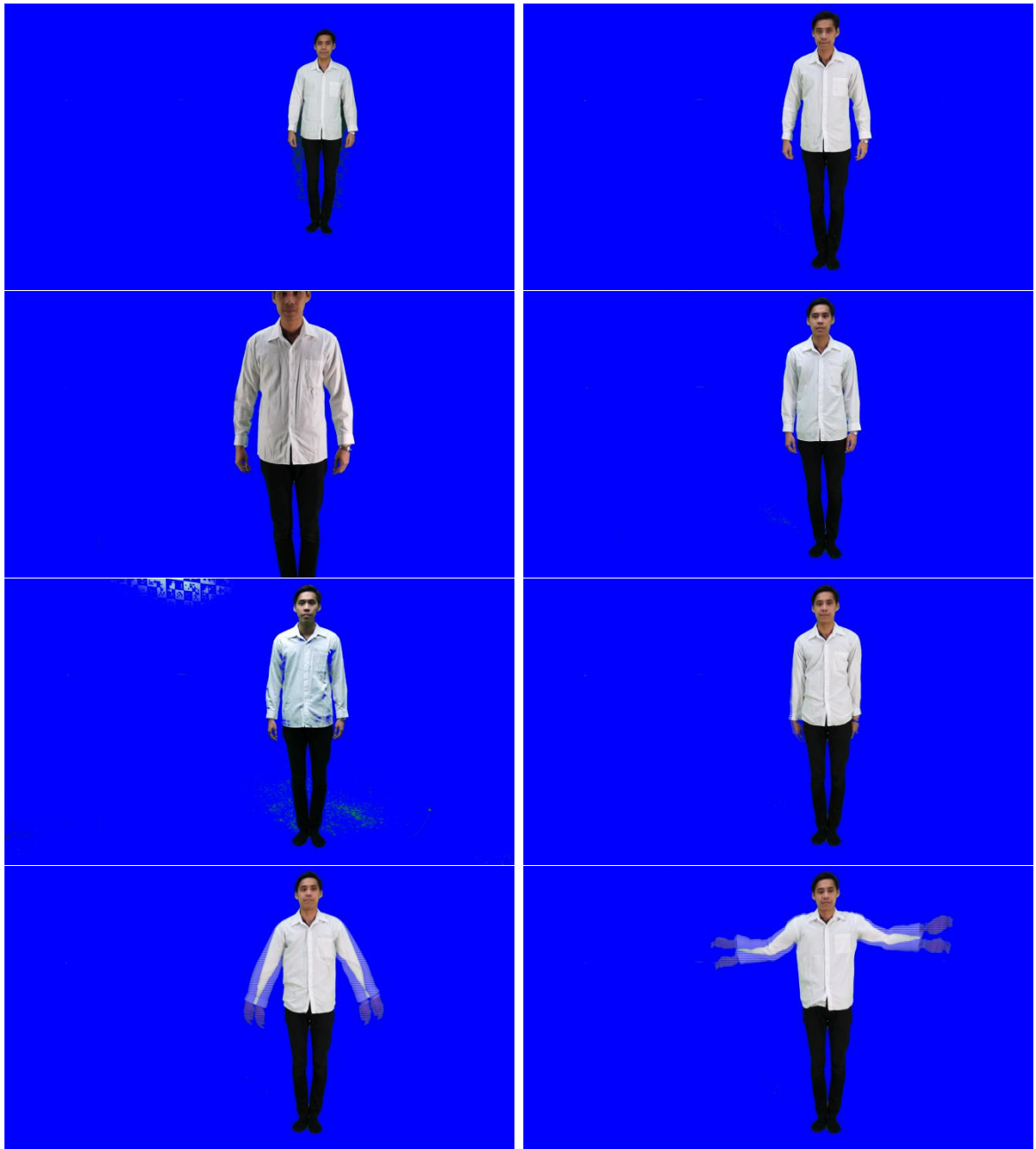
รูป 66 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี RGB เมื่อใส่เสื้อสีขาว



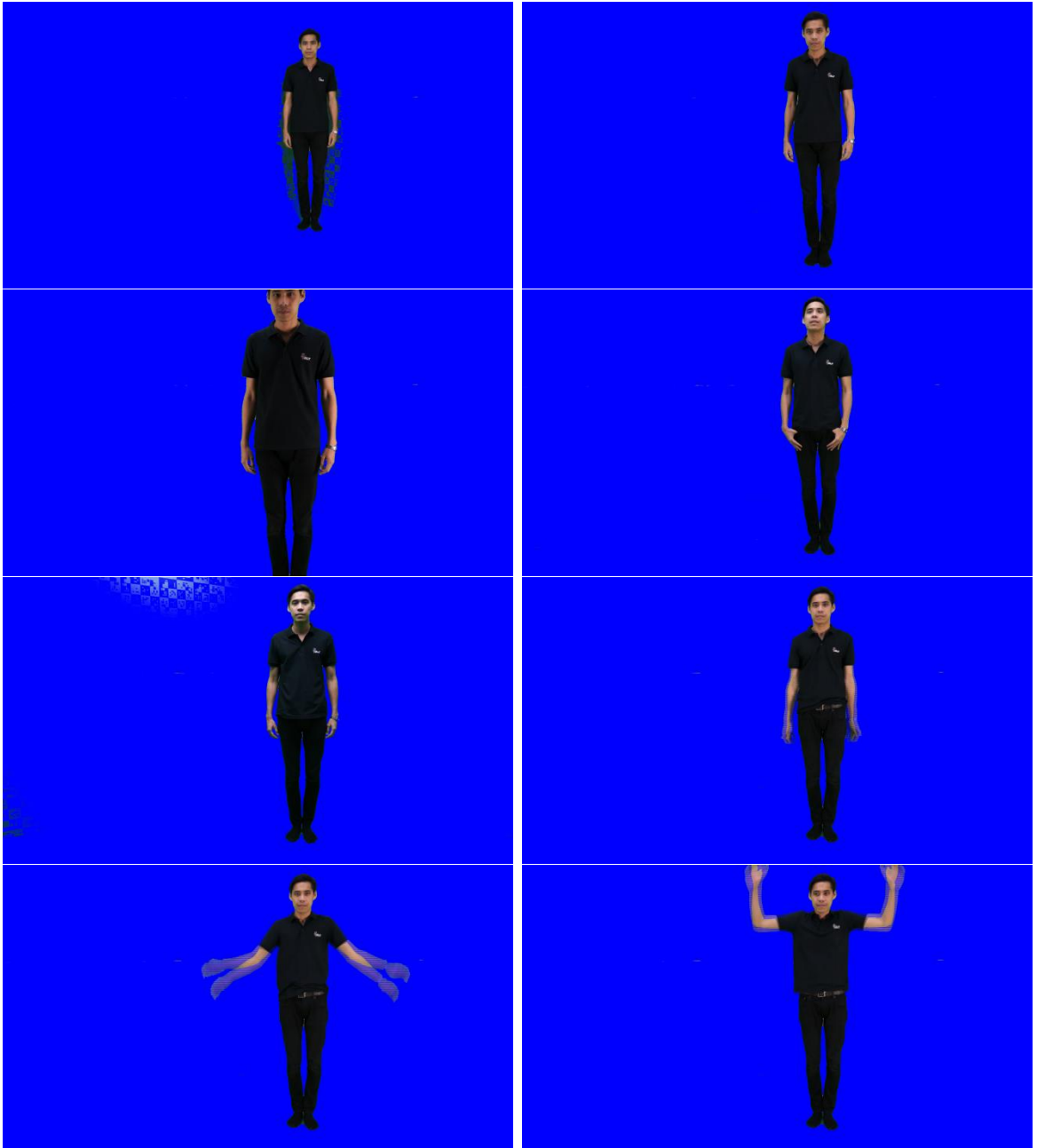
รูป 67 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี HSV เมื่อใส่เสื้อสีดำ



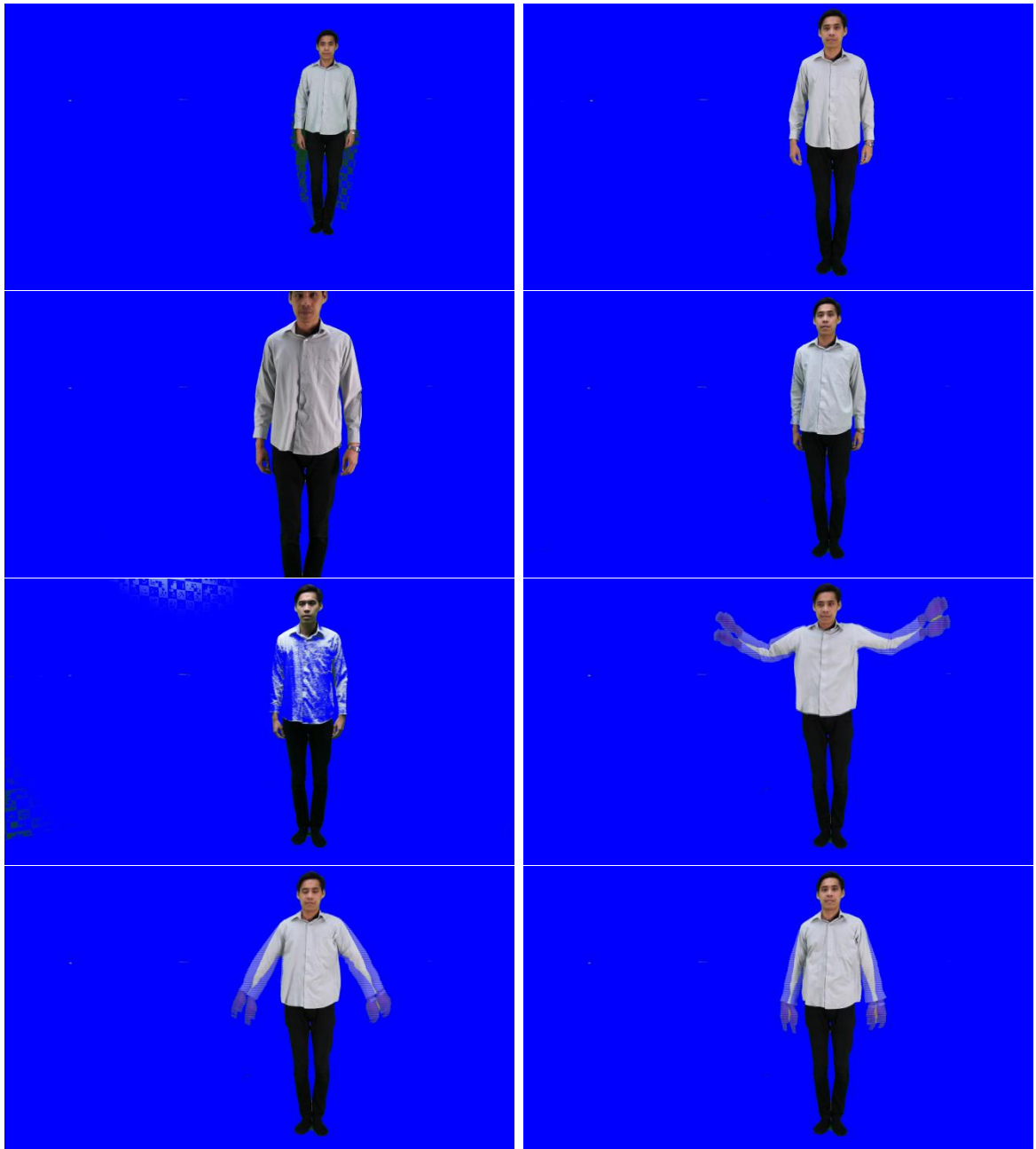
รูป 68 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี HSV เมื่อใส่เสื้อสีเทา



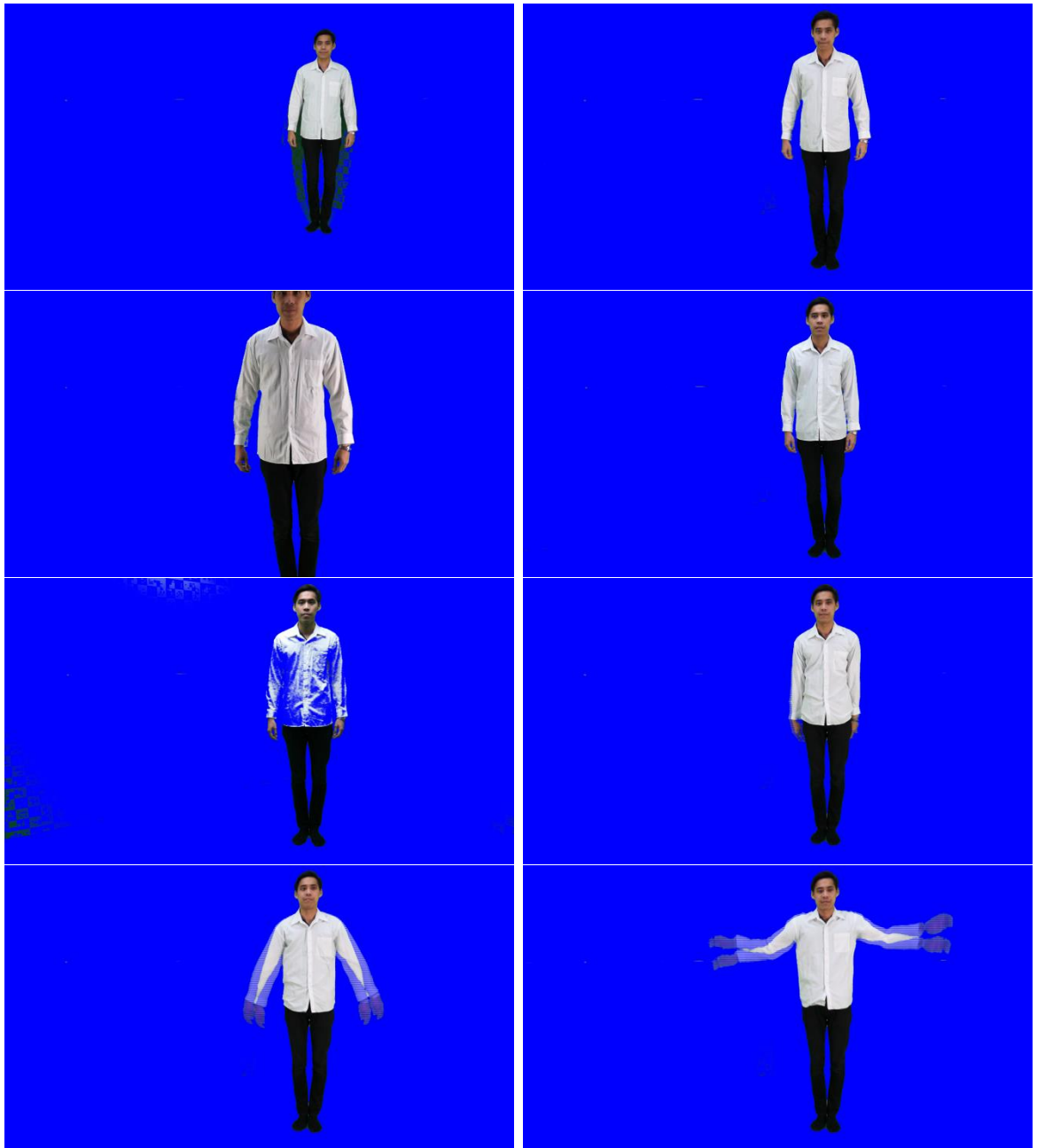
รูป 69 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี HSV เมื่อใส่เสื้อสีขาว



รูป 70 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี YUV เมื่อใส่เสื้อสีดำ



รูป 71 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี YUV เมื่อใส่เสื้อสีเทา



รูป 72 ผลการทดลองจากระเบียบวิธี Chroma key ในปริภูมิสี YUV เมื่อใส่เสื้อสีขาว



อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

ภาคผนวก ข  
อภิธานศัพท์และการตั้งชื่อตัวแปร

## อภิธานศัพท์

คำศัพท์ภาษาไทย	คำศัพท์ภาษาอังกฤษ	คำอธิบาย
ขั้นตอนวิธี	Algorithm	วิธีการที่ใช้ในการคำนวณต่าง ๆ
อุปกรณ์รับรู้	Sensor	อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับสภาพภายนอก
ค่าทึบแสง	Alpha Value	ค่าที่ระบุว่าจุดดังกล่าวควรจะเป็นฉากหลังหรือเป็นฉากหน้า
จุดภาพ	Pixel	จุดหนึ่งจุดในภาพ
ไตรแมพ	Tri-map	แผนภาพที่ระบุว่าส่วนใดคือฉากหลัง, ส่วนใดคือวัตถุ และส่วนใดคือบริเวณที่ไม่แน่ใจ
ฟังก์ชันเคอร์เนล	Kernel function	ฟังก์ชันในรูปแบบฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณกับกลุ่มของจุดภาพ
การประมาณความหนาแน่นเคอร์เนล	Kernel Density Estimation	วิธีการคำนวณฟังก์ชันเคอร์เนลโดยอัตโนมัติ
การเทียบมาตรฐาน	Calibration	การเปรียบเทียบตำแหน่งของกล้องกับตำแหน่งอ้างอิง
พารามิเตอร์ภายใน	Intrinsic parameter	พารามิเตอร์ที่ระบุถึงคุณสมบัติภายในต่าง ๆ ของกล้อง เช่น ความยาวโฟกัส ขนาดของจุดภาพ, จุดกึ่งกลางภาพ
พารามิเตอร์ภายนอก	Extrinsic parameter	พารามิเตอร์ที่ระบุถึงตำแหน่งของกล้องเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงภายนอก
จุดโฟกัส	Focal length	ระยะโฟกัสของกล้อง
จุดกึ่งกลางภาพ	Principal point	จุดภาพที่แกนสมมติของชุดเลนส์ของกล้องสัมผัส
คลังโปรแกรม	Program library	ชุดโปรแกรมสำหรับการทำงานต่าง ๆ ที่มีผู้พัฒนาขึ้นมาแล้ว และสามารถนำไปใช้ได้ทันที
ตัวกรองแบบนำทาง	Guided Filter	เป็นขั้นตอนวิธีของตัวกรองแบบหนึ่งซึ่งได้นำมาใช้งานวิจัยนี้

## การตั้งชื่อตัวแปร

$i$  แทนดัชนีของจุดสี

$C_i$  แทนจุดสีและสีที่ดัชนี  $i$  โดยมี  $C_{i,R}, C_{i,G}, C_{i,B}$  แทนช่องสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินตามลำดับ

$D_i$  แทนค่าระดับสีเขียวที่จุดสี  $C_i$

$\alpha_i$  แทนค่าความทึบที่จุดสี  $C_i$

$t_{max}$  แทนค่ากำหนดพื้นหลัง

$t_{min}$  แทนค่ากำหนดพื้นหน้า

$saturate$  แทนฟังก์ชันจำกัดช่วง  $[0, 1]$

$F_i$  แทนค่าสีพื้นหน้าของจุดสี  $C_i$

$B_i$  แทนค่าสีพื้นหลังของจุดสี  $C_i$

$\hat{f}_h(x)$  แทนฟังก์ชันการประมาณความหนาแน่นคอร์เนลของตัวแปร  $x$

$\hat{f}'_h(x)$  แทนอนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของฟังก์ชันการประมาณความหนาแน่นคอร์เนลของตัวแปร  $x$

$h$  แทนค่ากำหนดความราบเรียบหรือแบนด์วิดท์

$n$  แทนจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการประมาณความหนาแน่นคอร์เนล

$K(x)$  แทนฟังก์ชันคอร์เนลของตัวแปร  $x$  โดยจะเป็นฟังก์ชันเกาส์เซียนสำหรับงานวิจัยนี้

$K'(x)$  แทนอนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของฟังก์ชันคอร์เนลของตัวแปร  $x$

$W_i$  แทนหน้าต่างซึ่งมีขนาด  $\sqrt{n} \times \sqrt{n}$  ล้อมรอบจุดสี  $C_i$

$D_{W_i}$  แทนเซตของค่าระดับสีเขียวของจุดสีที่อยู่ในหน้าต่าง  $W_i$

$D$  แทนค่าที่ใช้ในการไล่หาค่า  $\hat{D}$

$s$  แทนลำดับการไล่ค่า  $D$

$\hat{D}$  แทนค่าที่ทำให้เกิดค่า  $\hat{f}_h(\hat{D})$  ที่เป็นค่ามากที่สุดเฉพาะที่

$(\hat{D}_m, \hat{f}_h(\hat{D}_m))$  แทนคู่ลำดับของค่า  $\hat{D}$  และค่า  $\hat{f}_h(\hat{D})$  ที่สัมพันธ์กับค่ามากที่สุดเฉพาะที่

โดยที่  $m$  แทนดัชนี

$t_{i,min}$  และ  $t_{i,max}$  แทนค่ากำหนดเฉพาะที่สำหรับจุดสี  $C_i$

$w_{i,min}$  และ  $w_{i,max}$  แทนค่าถ่วงน้ำหนักในการปรับค่า  $t_{i,min}$  และ  $t_{i,max}$

$SW_i$  แทนหน้าต่างที่กำหนดจุดสีที่ถูกนำมาคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ค่ากำหนดช่วงมี

ความราบเรียบ

$\{F_P\}$  แทนกรอบอ้างอิงของกระดานหมากรุก

$\{F_D\}$  แทนกรอบอ้างอิงของกล้องวัดความลึก

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

$\{F_C\}$  แทนกรอบอ้างอิงของกล้องสี

${}^P_D T$  แทนเมทริกซ์การแปลงของ  $\{F_D\}$  เทียบกับ  $\{F_P\}$

${}^P_C T$  แทนเมทริกซ์การแปลงของ  $\{F_C\}$  เทียบกับ  $\{F_P\}$

อุปกรณ์สำหรับการแยกฉากหลังโดยการพิจารณาค่าสีแบบทันทีเสริมด้วยอุปกรณ์รับรู้ความลึก

ภาคผนวก ค  
รายชื่อไฟล์ตัวอย่างวีดีโอผลการทดลอง

การทดลองที่ได้รายงานไปในบทที่ 7 นั้นเป็นการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพบนภาพนิ่ง เพื่อให้เห็นภาพรวมของผลลัพธ์ในการใช้งานจริง คณะผู้วิจัยได้แนบตัวอย่างภาพวีดิทัศน์ประกอบผลการทดลอง โดยใช้ผู้แสดงซึ่งใส่เสื้อสองแบบได้แก่เสื้อสีขาว และ เสื้อสีดำ โดยมีรายละเอียดของไฟล์ตาราง ๆ ดังต่อไปนี้

### โพลเดอร์ Video (Black Shirt)

แสดงตัวอย่างการทำงานสำหรับผู้แสดงที่ใส่เสื้อสีดำ

ชื่อไฟล์	คำอธิบาย
1_Input.mp4	ตัวอย่างภาพข้อมูลนำเข้า
2_CD_Alpha.mp4	ผลลัพธ์ค่าทึบแสงที่ได้จากขั้นตอนวิธี Color Different ซึ่งได้เลือกมาเป็นขั้นตอนวิธีตั้งต้นในการทำวิจัย
3_CD_Compose.mp4	ผลการรวมภาพข้อมูลนำเข้ากับภาพฉากหลังสีน้ำเงินโดยใช้ค่าทึบแสงที่ได้จากขั้นตอนวิธี Color Different
4_KDE_Alpha.mp4	ผลลัพธ์ค่าทึบแสงที่ได้จากการปรับปรุงด้วยวิธี KDE ตามที่ได้รายงานไว้ในรายงานฉบับก่อนหน้า
5_KDE_Compose.mp4	ผลการรวมภาพข้อมูลนำเข้ากับภาพฉากหลังสีน้ำเงินโดยใช้ค่าทึบแสงที่ได้จากการปรับปรุงด้วยวิธี KDE
6_KDEGF_alpha.mp4	ผลลัพธ์ค่าทึบแสงที่ได้จากการปรับปรุงผลลัพธ์ในจากวิธี KDE ด้วยตัวกรอง Guided Filterตามที่ได้รายงานไว้ในรายงานฉบับนี้
7_KDEGF_Compose.mp4	ผลการรวมภาพข้อมูลนำเข้ากับภาพฉากหลังสีน้ำเงินโดยใช้ค่าทึบแสงที่ได้จากการปรับปรุงผลลัพธ์ในจากวิธี KDE ด้วยตัวกรอง Guided Filter
8_Compare.mp4	วีดิทัศน์เปรียบเทียบข้อมูลนำเข้า และผลลัพธ์การรวมภาพจากทั้งสามวิธี พร้อมด้วยการระบุจุดที่มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนด้วยสายตา

### โพลเดอร์ Video (White Shirt)

แสดงตัวอย่างการทำงานสำหรับผู้แสดงที่ใส่เสื้อสีขาว รวมถึงผลลัพธ์ที่ได้จากอุปกรณ์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาด

ชื่อไฟล์	คำอธิบาย
1_Input.mp4	ตัวอย่างภาพข้อมูลนำเข้า
2_CD_Alpha.mp4	ผลลัพธ์ค่าทึบแสงที่ได้จากขั้นตอนวิธี Color Difference ซึ่งได้เลือกมาเป็นขั้นตอนวิธีตั้งต้นในการทำวิจัย

3_CD_Compose.mp4	ผลการรวมภาพข้อมูลนำเข้ากับภาพฉากหลังสีน้ำเงินโดยใช้ค่าทึบแสงที่ได้จากขั้นตอนวิธี Color Difference
4_KDE_Alpha.mp4	ผลลัพธ์ค่าทึบแสงที่ได้จากการปรับปรุงด้วยวิธี KDE ตามที่ได้รายงานไว้ในรายงานฉบับก่อนหน้า
5_KDE_Compose.mp4	ผลการรวมภาพข้อมูลนำเข้ากับภาพฉากหลังสีน้ำเงินโดยใช้ค่าทึบแสงที่ได้จากการปรับปรุงด้วยวิธี KDE
6_KDEGF_alpha.mp4	ผลลัพธ์ค่าทึบแสงที่ได้จากการปรับปรุงผลลัพธ์ในจากวิธี KDE ด้วยตัวกรอง Guided Filterตามที่ได้รายงานไว้ในรายงานฉบับนี้
7_KDEGF_Compose.mp4	ผลการรวมภาพข้อมูลนำเข้ากับภาพฉากหลังสีน้ำเงินโดยใช้ค่าทึบแสงที่ได้จากการปรับปรุงผลลัพธ์ในจากวิธี KDE ด้วยตัวกรอง Guided Filter
8_ATEM Key.mp4	เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการรวมภาพข้อมูลนำเข้ากับภาพฉากหลังสีน้ำเงินโดยใช้ค่าทึบแสงที่ได้จาก อุปกรณ์แยกฉากหลังที่มีขายในท้องตลาด คือ Black Magic Design ATEM 2 M/E Production Studio 4K ซึ่งจะเห็นได้ว่า ช่วงท้ายของภาพเคลื่อนไหว (ช่วงวินาทีที่ 9 – 11) ค่าทึบแสงที่ได้นั้นปนเปื้อนเข้ามาในส่วนเสื้อสีขาวเป็นจำนวนมาก
9_Compare.mp4	วิดีโอที่เปรียบเทียบข้อมูลนำเข้า และผลลัพธ์การรวมภาพจากทั้งสามวิธี (CD, KDE, KDEGF) พร้อมด้วยการระบุจุดที่มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนด้วยสายตา
9_Compare2.mp4	วิดีโอที่เปรียบเทียบผลลัพธ์การรวมภาพจากทั้งสี่วิธี (CD, KDE, KDEGF, ATEM) พร้อมด้วยการระบุจุดที่มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนด้วยสายตา
Compare.bmp	ตัวอย่างภาพนิ่งที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่าง KDE และ KDEGF

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อหัวหน้าโครงการ

(ภาษาไทย) อรรถวิทย์ สุดแสง

(ภาษาอังกฤษ) Attawith Sudsang

ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail [attawith@gmail.com](mailto:attawith@gmail.com)

### ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขาวิชา	มหาวิทยาลัย	ปี พ.ศ. ที่ได้รับ
Ph.D.	Computer Science	U. of Illinois at Urbana-Champaign	2542
M.S.	Computer Science	U. of Illinois at Urbana-Champaign	2537
วศ.บ.	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2534

### ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

#### Journal Article

1. Saranrittichai, P., Niparnan, N., Sudsang, A., 2D-laser scan registration using multi-scale NDT with polar scan clustering, **Applied Mechanics and Materials**, 446-447, pp. 981-985. , 2014
2. Niparnan, N., Phoka, T., Suttasupa, Y., Sudsang, A., New computational method for three-fingered force-closure test, **Robotica**, pp. 1-21. , 2013
3. P. Pipattanasomporn, A. Sudsang, *Two-Finger Caging of Nonconvex Polytopes*, **IEEE Transactions on Robotics**, Vol 27, Issue 2., 2011
4. T. Phoka, P. Vongmasa, C. Nilwatchararang, P. Pipattanasomporn and A. Sudsang, *Optimal Independent Contact Regions for Two-Fingered Grasping of Polygon*, **Robotica**, 2011
5. N. Niparnan, A. Sudsang and P. Chongstitvatana. *Positive Span of Force and Torque Components in Three Dimensional Four Finger Force Closure Grasps*. **Advanced Robotics**. Vol. 22, No. 13-14, 2008.



6. Sudsang, F. Rothanger and J. Ponce. *Motion Planning for Disc-Shaped Robots Pushing a Polygonal Object in the Plane*. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, Vol 18, No. 4, pages 550-562, Aug, 2002.
7. A. Sudsang, J. Ponce and N. Srinivasa. *In-Hand Manipulation: Geometry and Algorithms*. **Algorithmica**, Vol 26, No. 4, pages 466-493, Jan, 2000.
8. A. Sudsang and J. Ponce. *In-Hand Manipulation: Experiments with a Reconfigurable Gripper*. **Advanced Robotics**. Vol. 12, No. 5, pages 509-533, Dec, 1998.
9. J. Ponce, S. Sullivan, A. Sudsang, J. Boissonnat and J. Merlet. *On Computing Four-Finger Equilibrium and Force-Closure Grasps of Polyhedral Objects*. **International Journal of Robotics Research**, Vol. 16, No. 1, pages 11-35, Feb,1997
10. Sudsang, J. Ponce and N. Srinivasa. *Algorithms for Constructing Immobilizing Fixtures and Grasps of Three-dimensional Objects*. In J.-P. Laumont and M. Overmars, editors, **Algorithmic Foundations of Robotics II**, pages 363-380. AK Peters, Ltd., 1997.
11. J. Ponce, A. Sudsang, and Steve Sullivan. *Algorithms for Computing Force-Closure Grasps of Polyhedral Objects*. In K. Goldberg, et al, editors, **Algorithmic Foundations of Robotics I**, pages 167-184. AK Peters, Ltd, 1995.

#### Conference

12. Makapunyo, T., Phoka, T., Pipattanasomporn, P., Niparnan, N., Sudsang, A., Measurement framework of partial cage quality based on probabilistic motion planning, Proceedings - **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, art. no. 6630780, pp. 1574-1579. 2013
13. Saranrittichai, P., Niparnan, N., Sudsang, A., Robust local obstacle avoidance for mobile robot based on Dynamic Window approach, **10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2013**, art. no. 6559615, 2013
14. Udsatid, P., Niparnan, N., Sudsang, A., Human position tracking for side by side walking mobile robot using foot positions, **2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2012 - Conference Digest**, art. no. 6491160, pp. 1374-1378., 2012
15. Makapunyo, T., Phoka, T., Pipattanasomporn, P., Niparnan, N., Sudsang, A., Measurement framework of partial cage quality, **2012 IEEE International Conference on Robotics**

- and Biomimetics, **ROBIO 2012** - Conference Digest, art. no. 6491231, pp. 1812-1816., 2012
16. S., Sattaratnamai, S., Niparnan, N., Sudsang, A., On improving laser data for extrinsic LRF/camera calibration, **IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2011**, art. no. 6181309, pp. 343-348., 2011
  17. Suttasupa, Y., Sudsang, A., Niparnan, N., Plane detection for Kinect image sequences, **IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2011**, art. no. 6181413, pp. 970-975., 2011
  18. Thonnagith, P., Niparnan, N., Sudsang, A., Solving precision grasp with simple feature-matching technique, **IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2011**, art. no. 6181504, pp. 1516-1521, 2011
  19. P. Thonnagith, A. Sudsang, New hand posture classification strategy for finding kinematically-feasible precision grasps, **International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)**, 2010
  20. T. Phoka, A. Sudsang, Regrasp planning of three-fingered hand for a polygonal object, **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation (IEEE ICRA)**, 2010
  21. P. Pipattanasomporn, A. Sudsang, Object caging under imperfect shape knowledge, **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation (IEEE ICRA)**, 2010
  22. T. Phoka, A. Sudsang, Contact point clustering approach for 5-fingered regrasp planning, **Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IEEE IROS)**, 2009
  23. N. Niparnan, T. Phoka, A. Sudsang, Heuristic approach for multiple queries of 3D n-finger frictional force closure grasp, **Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IEEE IROS)**, 2009
  24. T. Phoka, A. Sudsang, Contact point clustering approach for 5-fingered regrasp planning, **Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IEEE IROS)**, 2009
  25. Y. Suttasupa, A. Sudsang and N. Niparnan , 3D SLAM for Omnidirectional Camera, **Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (IEEE ROBIO)**, 2008
  26. M. Wongphati, N. Niparnan and A. Sudsang, Bearing Only FastSLAM Using Vertical Line Information from an Omnidirectional Camera, **Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (IEEE ROBIO)**, 2008

27. P. Thonnagith, P. Pipattanasomporn, N. Niparnan and A. Sudsang, New Combination of Programmable Force Fields for Fast Planar Part Manipulation with Guaranteed Unique Configuration, **Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (IEEE ROBOTICS)**, 2008
28. T. Phoka, P. Wongmasa, C. Nilwatchararang, P. Pipattanasomporn and A. Sudsang. Planning Optimal Independent Contact Regions for Two-Fingered Force-Closure Grasp of a Polygon. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 1175-1180, 2008
29. P. Pipattanasomporn, P. Wongmasa and A. Sudsang. Caging rigid polytopes via finger dispersion control. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, 1181-1186, 2008
30. N. Boonpinon and A. Sudsang, *Formation Control for Multi-Robot Teams Using A Data Glove*, **Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics (IEEE RAM)**, pp. 525 - 531
31. N. Suarod, N. Boonpinon and A. Sudsang. A heuristic method for computing caging formation of polygonal object. **Proc of the IEEE International Conf. on Robotics and Biomimetics**, pp 823-828, 2007
32. T. Phoka, N. Niparnan and A. Sudsang. Hierarchical Simplification for 5-Fingered 3D Regrasp Planning on Triangular Mesh Objects. **Proc of the IEEE International Conf. on Robotics and Biomimetics**, pp 571-576, 2007
33. N. Boonpinon and A. Sudsang. Constrained Coverage for Heterogeneous Multi-Robot Team. **Proc of the IEEE International Conf. on Robotics and Biomimetics**, pp 799-804, 2007
34. P. Pipattanasomporn, P. Wongmasa and A. Sudsang. Two-Finger Squeezing Caging of Polygonal and Polyhedral Object. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, 205-210, 2007
35. N. Niparnan and A. Sudsang. Positive Span of Force and Torque Components of Three-Fingered Three-Dimensional Force-Closure Grasps. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 4701-4706, 2007
36. T. Phoka, N. Niparnan and A. Sudsang. Planning Optimal Grasps for Curved Objects. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Biomimetics**, 2006.

37. N. Niparnan, T. Phoka and A. Sudsang. Computing Frictionless Force-Closure Grasps of 2D Objects from Contact Point Set, **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Biomimetics**, 2006.
38. N. Boonpinon and A. Sudsang. Heterogeneity Driven Circular Formation, **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Biomimetics**, 2006.
39. N. Niparnan and A. Sudsang. Computing All Force-Closure Grasps of 2D Objects from Contact Point Set, **Proc. of the IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems**, pp 1599-1604, 2006.
40. P. Vongmasa and A. Sudsang. Coverage Diameters of Polygons, **Proc. of the IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems**, pp 4036-4041, 2006.
41. N. Niparnan and A. Sudsang. A Heuristic Approach for Computing Frictionless Force-Closure Grasps of 2D Objects from Contact Point Set, **Proc. of the IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics**, 2006
42. T. Phoka, N. Niparnan and A. Sudsang. Planning Optimal Force-Closure Grasps for Curved Objects by Genetic Algorithm. **Proc. of the IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics**, 2006
43. P. Pipattanasomporn and A. Sudsang. Two-Finger Caging of Concave Polygon, **Proc. Of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, 2006
44. P. Pipattanasomporn, S. Dhanapanichkul and A. Sudsang. Emergence of Straight-Line Trajectory in Cooperative Object Transportation. **Proc. of the International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems**, 2005.
45. A. Sudsang and T. Phoka. Geometric Reformulation of 3-Fingered Force-Closure Condition. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 2349-2354, 2005.
46. T. Phoka, P. Pipattanasomporn, N. Niparnan and A. Sudsang. Regrasp Planning of Four-Fingered Hand for Parallel Grasp of a Polygonal Object. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 791-796, 2005.
47. N. Niparnan and A. Sudsang. Fast Computation of 4-Fingered Force-Closure Grasps from Surface Points. **Proc. of the IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems**, pp 3692-3697, 2004.

48. T. Phoka and A. Sudsang. Regrasp Planning for a 5-Fingered Hand Manipulating a Polyhedron. **Proc. of the IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems**, pp 3674-3679, 2003.
49. A. Sudsang and T. Phoka. Regrasp Planning for a 4-Fingered Hand Manipulating a Polygon. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 2671-2676, 2003.
50. A. Sudsang and T. Luewirawong. Capturing a Concave Polygon with Two Disc-Shaped Fingers. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 1121-1126, 2003.
51. A. Sudsang. Sensorless Sorting of Two Parts in the Plane Using Programmable Force Fields. **Proc. of the IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems**, pp 1784-1789, 2002.
52. A. Sudsang. Sweeping the Floor: Moving Multiple Objects with Multiple Disc-Shaped Robots. **Proc. of the IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems**, pp 2825-2830, 2002.
53. A. Sudsang. A Sufficient Condition for Capturing an Object in the Plane with Disc-Shaped Robots. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 682-687, 2002.
54. A. Sudsang, F. Rothganger and J. Ponce. An Implemented Planner for Manipulating a Polygonal Object in the Plane with Three Disc-Shaped Mobile Robots. **Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, pp 1499-1506, 2001.
55. A. Sudsang and L. Kavraki. Part Orientation with a Force Field: Orienting Multiple Shapes Using a Single Field. **Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, pp 208-213, 2001.
56. A. Sudsang and L. Kavraki. A Geometric Approach to Designing a Programmable Force Field with a Unique Stable Equilibrium for Parts in the Plane. **Proc of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 1079-1085, 2001 (finalist for best paper award).
57. A. Sudsang and J. Ponce. A New Approach to Motion Planning for Disc-Shaped Robots Manipulating a Polygonal Object in the Plane. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 1068-1075, 2000.

58. A. Sudsang, J. Ponce, M. Hyman and D. Kriegman. On Grasping and Manipulating Polygonal Objects with Three 2-dof Robots in the Plane. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 2227-2234, 1999.
59. A. Sudsang and J. Ponce. On Grasping and Manipulating Polygonal Objects with Disc-Shaped Robots in the Plane. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 2740-2746, 1998.
60. A. Sudsang and J. Ponce. In-Hand Manipulation: Geometry and Algorithms. **Proc. Of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, pp 98-105, 1997 (runner-up for best paper award).
61. A. Sudsang N. Srinivasa and J. Ponce. On Planning Immobilizing Grasps for a Reconfigurable Gripper. **Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, pp 106-113, 1997.
62. A. Sudsang and J. Ponce. New Techniques for Computing Four-Finger Force-Closure Grasps of Polyhedral Objects. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 1355-1360, 1995.

ชื่อผู้ร่วมวิจัย

(ภาษาไทย) นัทที นิพานันท์

(ภาษาอังกฤษ) Nattee Niparnan

ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail [nattee@gmail.com](mailto:nattee@gmail.com)

ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขาวิชา	มหาวิทยาลัย	ปี พ.ศ. ที่ได้รับ
วศ.ด.	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2551
วศ.ม.	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2546
วศ.บ.	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2544

ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

Journal Article

1. Saranrittichai, P., Niparnan, N., Sudsang, A., 2D-laser scan registration using multi-scale NDT with polar scan clustering, **Applied Mechanics and Materials**, 446-447, pp. 981-985. , 2014
2. Niparnan, N., Phoka, T., Suttasupa, Y., Sudsang, A., New computational method for three-fingered force-closure test, **Robotica**, pp. 1-21. , 2013
3. N. Niparnan, A. Sudsang and P. Chongstitvatana. *Positive Span of Force and Torque Components in Three Dimensional Four Finger Force Closure Grasps*. **Advanced Robotics**. Vol. 22, No. 13-14, 2008.

Conference

4. Makapunyo, T., Phoka, T., Pipattanasomporn, P., Niparnan, N., Sudsang, A., Measurement framework of partial cage quality based on probabilistic motion planning, **Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation**, art. no. 6630780, pp. 1574-1579. 2013
5. Saranrittichai, P., Niparnan, N., Sudsang, A., Robust local obstacle avoidance for mobile robot based on Dynamic Window approach, **10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information**

**Technology, ECTI-CON 2013**, art. no. 6559615, 2013

6. Udsatid, P., Niparnan, N., Sudsang, A., Human position tracking for side by side walking mobile robot using foot positions, **2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2012 - Conference Digest**, art. no. 6491160, pp. 1374-1378., 2012
7. Makapunyo, T., Phoka, T., Pipattanasomporn, P., Niparnan, N., Sudsang, A., Measurement framework of partial cage quality, **2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2012 - Conference Digest**, art. no. 6491231, pp. 1812-1816., 2012
8. S., Sattaratnamai, S., Niparnan, N., Sudsang, A., On improving laser data for extrinsic LRF/camera calibration, **IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2011**, art. no. 6181309, pp. 343-348., 2011
9. Suttasupa, Y., Sudsang, A., Niparnan, N., Plane detection for Kinect image sequences, **IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2011**, art. no. 6181413, pp. 970-975., 2011
10. Thonnagith, P., Niparnan, N., Sudsang, A., Solving precision grasp with simple feature-matching technique, **IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2011**, art. no. 6181504, pp. 1516-1521, 2011
11. N. Niparnan, T. Phoka, A. Sudsang, Heuristic approach for multiple queries of 3D n-finger frictional force closure grasp, **Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IEEE IROS)**, 2009
12. Y. Suttasupa, A. Sudsang and N. Niparnan , 3D SLAM for Omnidirectional Camera, **Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (IEEE ROBIO)**, 2008
13. M. Wongphati, N. Niparnan and A. Sudsang, Bearing Only FastSLAM Using Vertical Line Information from an Omnidirectional Camera, **Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (IEEE ROBIO)**, 2008
14. P. Thonnagith, P. Pipattanasomporn, N. Niparnan and A. Sudsang, New Combination of Programmable Force Fields for Fast Planar Part Manipulation with Guaranteed Unique Configuration, **Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (IEEE ROBIO)**, 2008



15. T. Phoka, N. Niparnan and A. Sudsang. Hierarchical Simplification for 5-Fingered 3D Regrasp Planning on Triangular Mesh Objects. **Proc of the IEEE International Conf. on Robotics and Biomimetics**, pp 571-576, 2007
16. N. Niparnan and A. Sudsang. Positive Span of Force and Torque Components of Three-Fingered Three-Dimensional Force-Closure Grasps. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 4701-4706, 2007
17. T. Phoka, N. Niparnan and A. Sudsang. Planning Optimal Grasps for Curved Objects. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Biomimetics**, 2006.
18. N. Niparnan, T. Phoka and A. Sudsang. Computing Frictionless Force-Closure Grasps of 2D Objects from Contact Point Set **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Biomimetics**, 2006.
19. N. Niparnan and A. Sudsang. Computing All Force-Closure Grasps of 2D Objects from Contact Point Set. **Proc. of the IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems**, pp 1599-1604, 2006.
20. N. Niparnan and A. Sudsang. A Heuristic Approach for Computing Frictionless Force-Closure Grasps of 2D Objects from Contact Point Set. **Proc. of the IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics**, 2006
21. T. Phoka, N. Niparnan and A. Sudsang. Planning Optimal Force-Closure Grasps for Curved Objects by Genetic Algorithm. **Proc. of the IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics**, 2006
22. T. Phoka, P. Pipattanasomporn, N. Niparnan and A. Sudsang. Regrasp Planning of Four-Fingered Hand for Parallel Grasp of a Polygonal Object. **Proc. of the IEEE International Conf. on Robotics and Automation**, pp 791-796, 2005.
23. N. Niparnan and A. Sudsang. Fast Computation of 4-Fingered Force-Closure Grasps from Surface Points. **Proc. of the IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems**, pp 3692-3697, 2004.
24. N. Niparnan and P. Chongstitvatana, "An improved genetic algorithm for the inference of finite state machines", **IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics (IEEE SMC)**, Tunisia, 6-9 Oct, 2002.

25. N. Nipaman, P. Chongstitvatana, “An improved genetic algorithm for the inference of finite state machines”, **Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)**, New York, July 9-13, 2002. (Poster)

ชื่อผู้ร่วมวิจัย

(ภาษาไทย) ณัฐพงศ์ ชินธเนศ

(ภาษาอังกฤษ) Nuttapon Chentanez

ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail nuttapon26@gmail.com

ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขาวิชา	มหาวิทยาลัย	ปี พ.ศ. ที่ได้รับ
Ph.D.	Computer Science	U. of California, Berkeley	2553
M.S.	Computer Science	U. of California, Berkeley	2550
B.S.E.	Computer Science	U. of Michigan, Ann Arbor	2548
B.S.E.	Electrical Engineering	U. of Michigan, Ann Arbor	2548

ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

Journal Article

1. M. Macklin, M. Müller, N. Chentanez, T.Y. Kim, Unified Particle Physics for Real-Time Applications, **ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2014)**, 33(4),
2. M. Müller, N. Chentanez, T.Y. Kim, Real Time Dynamic Fracture with Volumetric Approximate Convex Decompositions, **ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2013)**, 32(4)
3. Nuttapon Chentanez, Matthias Müller-Fischer, "Real-Time Eulerian Water Simulation Using a Restricted Tall Cell Grid", **ACM Transaction on Computer Graphics, SIGGRAPH**, 2011
4. Matthias Müller-Fischer, Nuttapon Chentanez, "Solid Simulation with Oriented Particles", **ACM Transaction on Computer Graphics, SIGGRAPH**, 2011
5. Nuttapon Chentanez, Ron Alterovitz, Daniel Ritchie, Jonha Cho, Kris Hauser, Ken Goldberg, James O'Brien, Jonathan Shewchuk, "Interactive Simulation of Surgical Needle Insertion and Steering", **ACM Transaction on Computer Graphics, SIGGRAPH**, 2009
6. Klingner, B.M., Feldman, B.E., Chentanez, N., O'Brien, J.F., Fluid animation with dynamic meshes, **ACM Transactions on Graphics**, 2006

Conference

B๒-๑-๐๐๐๒/๕๗

แบบ กทปส. ME-003

7. M. Müller, N. Chentanez, T.Y. Kim, M. Macklin Strain Based Dynamics, *in Proceedings of ACM SIGGRAPH / EUROGRAPHICS Symposium on Computer Animation (SCA), 2014, Copenhagen, July 21-23, 2014,*
8. N. Chentanez, M. Müller, T.Y. Kim, Coupling 3D Eulerian, Height Field and Particle Methods for the Simulation of Large Scale Liquid Phenomena, *in Proceedings of ACM SIGGRAPH / EUROGRAPHICS Symposium on Computer Animation (SCA), 2014, Copenhagen, July 21-23, 2014*
9. M. Müller, T.Y. Kim, N. Chentanez, Fast Simulation of Inextensible Hair and Fur, *in Proceedings of Virtual Reality Interactions and Physical Simulations (VRIPhys) Darmstadt, Germany, December 6-7 2012*
10. Nuttapon Chentanez, Matthias Müller-Fischer, “Mass Conserving Eulerian Liquid Simulation”, **Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA), 2012** (Honorable mention of best rated paper award)
11. Tae-Yong Kim, Nuttapon Chentanez, Matthias Müller-Fischer, “Long Range Attachments - A Method to Simulate Inextensible Clothing in Computer Games”, **Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA), 2012**
12. Nuttapon Chentanez, Matthias Müller-Fischer, “A Multigrid Fluid Pressure Solver Handling Separating Solid Boundary Conditions”, **IEEE TVCG 2012 special edition**, best of SCA 2011
13. Barbara Solenthaler, Peter Bucher, Nuttapon Chentanez, Matthias Müller, Markus Gross, “SPH Based Shallow Water Simulation”, **Proceedings of Virtual Reality Interactions and Physical Simulations (VRIPhys), 2011**
14. Matthias Müller, Nuttapon Chentanez, “Adding Physics to Animated Characters with Oriented Particles, **Proceedings of Virtual Reality Interactions and Physical Simulations (VRIPhys), 2011**
15. Nuttapon Chentanez, Matthias Müller-Fischer, “A Multigrid Fluid Pressure Solver Handling Separating Solid Boundary Conditions” **Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA), 2011** (Best rated paper award)

16. Nuttapong Chentanez, Matthias Müller-Fischer, "Real-time Simulation of Large Body of Water with Small Scale Details" **Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA)**, 2010
17. Matthias Müller-Fischer, Nuttapong Chentanez, "Wrinkle Mesh" **Proceedings of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA)**, 2010
18. Rik Jensen, Kris Hauser, Nuttapong Chentanez, Frank van der Stappen, and Ken Goldberg "Surgical Retraction of Non-Uniform Deformable Layers of Tissue: 2D Robot Grasping and Path Planning", **Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**, 2009
19. Kris Hauser, Ron Alterovitz, Nuttapong Chentanez, Allison Okamura, Ken Goldberg "Feedback Control for Steerable Needles in 3D Deformable Tissue Using Helical Paths", **Proceedings of Robotics Science and Systems Conference (RSS)**, 2009
20. Chentanez, N., Goktekin, T.G., Feldman, B.E., O'Brien, J.F., Simultaneous coupling of fluids and deformable bodies, **ACM SIGGRAPH 2006: Sketches, SIGGRAPH '06**, 2006
21. Klingner, B.M., Feldman, B.E., Chentanez, N., O'Brien, J.F., Fluid animation with dynamic meshes, **ACM SIGGRAPH 2006 Papers, SIGGRAPH '06**, 2006
22. Singh, S., Barto, A.G., Chentanez, N., Intrinsically motivated reinforcement learning, **Advances in Neural Information Processing Systems**, 2005



กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์  
สาธารณะ (สำนักงาน กสทช.)