



## รายงานการศึกษาค้นคว้าวิชาการ

เรื่อง

ระบบตรวจจับการเข้าพักแบบเรียลไทม์โดยใช้

เซ็นเซอร์อาร์เรย์เทอร์โมไพร์ความละเอียดต่ำสำหรับสภาพแวดล้อมในร่ม

ของ

B. SHUBHA 1,2 AND V. VEENA DEVI SHASTRIMATH1,2, (Member, IEEE) 1Department of Electronics and Communication Engineering, NMAM Institute of Technology, Nitte, Karkala, Karnataka 574110, India 2Visvesvaraya Technological University, Belagavi, Karnataka 590018, India

นำเสนอโดย

นายคมชาญ ตรีพงษ์พัฒน์ 640911145

นายมุฮัมมัดซอลิฮิน ฮะแวปือซา 640911148

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของรายวิชา 618390 สัมมนา

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบคอมพิวเตอร์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

## บทคัดย่อ

เซ็นเซอร์อาร์เรย์แอนเลย์แอร์เรย์ที่มีความละเอียดต่ำมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในหลายแอปพลิเคชันในร่มสนามนอกอุตสาหกรรมต่างๆเช่น ระบบรักษาความปลอดภัย,การสำรวจอัจฉริยะ,หุ่นยนต์,ทหาร,และระบบติดตามสุขภาพ มันมีขนาดเล็ก,มีราคาประหยัดและมีรูปภาพทางร้อนที่มีความละเอียดต่ำของสภาพแวดล้อมทำให้น่าสนใจในการใช้ในแอปพลิเคชันที่เน้นความเป็นส่วนตัวหลายอุตสาหกรรมที่กำลังสู่สู่อุตสาหกรรม 4.0 กำลังเผชิญกับความท้าทายในการใช้เซ็นเซอร์และอัตโนมัติระบบหนึ่งในพื้นที่ที่ออกต่อมเอาเป็นหลักใช้เซ็นเซอร์เพื่อให้ระบบทำงานอัจฉริยะโดยขึ้นอยู่กับความมีคนอยู่ ความท้าทายสำคัญในแอปพลิเคชันเช่นนี้คือการรักษาความเป็นส่วนตัว แม้ว่าระบบภาพแบบดั้งเดิมที่ใช้ระบบกล้องออปติคอลจะล้มเหลวในการบรรลุเป้าหมายนี้ สิ่งเดียวกันสามารถทำได้โดยการใช้เซ็นเซอร์อาร์เรย์แอนเลย์ที่ให้ข้อมูลทางความร้อนของพื้นที่ที่ต้องการนี้ทำให้เป็นไปได้ที่จะระบุจำนวนคนในพื้นที่ที่กำหนดโดยไม่เปิดเผยเอกสารสิทธิส่วนบุคคลของพวกเขา บทความนี้นำเสนอวิธีการตรวจจับการครอบครองมนุษย์โดยใช้เซ็นเซอร์อาร์เรย์อินฟราเรดที่มีความละเอียดต่ำเพื่อรักษาความเป็นส่วนตัวและหลีกเลี่ยงปัญหาความเป็นส่วนบุคคล ระบบที่เสนอตรวจจับวัตถุออกแบบข้อมูลอินฟราเรดโดยใช้เซ็นเซอร์ Grid-EYE (AMG8833) อาร์เรย์เทอร์โมไฟล์ความละเอียดต่ำ โดยเซ็นเซอร์จะเก็บข้อมูลการกระจายความร้อนขนาด 8x8 พิกเซล ข้อมูลการกระจายความร้อนเหล่านี้ถูกนำเข้าสู่กระบวนการซึ่งรวมถึงการถดถอย,กระจาย,การใช้ค่าโน้มถอยแบบปรับตัวเองและการลดภาพพื้นหลังเพื่อบรรลุเป้าหมายในการตรวจจับมนุษย์

**คำสำคัญ :** เซ็นเซอร์อาร์เรย์เทอร์โมไฟล์,การตรวจจับเป้าหมายมนุษย์, bicubic interpolation, การกรองภาพเกาส์เซียน,การกำหนดขอบเขตที่เปลี่ยนแปลงได้, Raspberry Pi

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
สารบัญ	ข
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 เซ็นเซอร์อาร์เรย์	3
2.1 พื้นที่ของเป้าหมายในภาพเทอร์มอล	5
2.2 อุณหภูมิในระหว่างเป้าหมาย	6
2.3 มุมมองของเซ็นเซอร์ Grid-EYE	7
2.4 Raspberry Pi	7
บทที่ 3 ระบบตรวจคนหลายคนที่นั่ง/เคลื่อนที่	9
3.1 ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ Grid-EYE	9
3.2 การประเมินตำแหน่ง	10
3.2.1 การประเมินตำแหน่ง Nearest Neighbor	11
3.2.2 การประเมินตำแหน่ง BILINEAR	12
3.3.3 การประเมินตำแหน่ง BICUBIC	13
3.3 การลบพื้นหลัง	16
3.4 การกรอง	17
3.4.1 การกรองภาพเกาส์เซียน	18
3.4.2 การกรองภาพเฉลี่ย	19
3.4.3 ตัวกรองสัญญาณมัลติสเกล	19
3.5 การกำหนดขอบเขตที่เปลี่ยนแปลงได้	19
3.6 ภาพความร้อนแบบไบนารีและการตรวจจับเป้าหมาย	20
บทที่ 4 ผลการทดลอง	21
4.1 ขั้นตอนการติดตั้งระบบสะสมข้อมูล	23
4.2 การเปรียบเทียบอัลกอริธึมการประมาณค่าแบบต่างๆ	24
4.3 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างวิธีการกรองแบบต่างๆ	26
4.4 อุณหภูมิห้องกับขนาดสิ่งของ	27
4.5 อัลกอริธึมตรวจสอบการใช้งานของพื้นที่	27
4.6 การดำเนินการแบบเรียลไทม์ของอัลกอริธึมตรวจสอบ	28

บทที่ 5 บทสรุปและการต่อยอด	29
เอกสารอ้างอิง	30
ภาคผนวก (บทความต้นฉบับ)	31

## บทที่ 1

ระบบตรวจสอบการครอบครองเป็นสิ่งจำเป็นในหลายแอปพลิเคชันที่ใช้ในสภาพแวดล้อมในร่มสนาม นอก ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิและการไหลแสงในห้องสามารถประมาณค่าและควบคุมได้ตามข้อมูลการครอบครองเพื่อประหยัดพลังงาน [1], [2], [3] การใช้งานนี้ยังสามารถใช้ในบ้าน, ห้องสมุด, พิพิธภัณฑ์, และสำนักงานเพื่อติดตามกิจกรรมการเคลื่อนไหวของคน นี่มีประโยชน์ในการลดการใช้สินทรัพย์การพื้นที่และอาคาร ความรู้สึกเกี่ยวกับมนุษย์สามารถจัดการได้โดยใช้อุปกรณ์พกพาหลายรายการเช่น เซ็นเซอร์สวมใส่ [4], กล้องอปติคอล [5], อุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยคลื่นวิทยุความถี่สูง (RFIDs) [6], และอุปกรณ์ WLAN [7] อย่างไรก็ตาม, เซ็นเซอร์สวมใส่มิสะดวกสำหรับผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม, กล้องไมเท่านั้นถูกควบคุมโดยสภาพแวดล้อมแต่ยังมีปัญหาเรื่องความเป็นส่วนตัวในเรื่องตราสิทธิ [8] ในการระบุตำแหน่งที่ใช้ RFID และ WLAN, ผู้ใช้ต้องพกอุปกรณ์รับด้วยตนเอง บทความนี้มุ่งเน้นแก้ปัญหาเหล่านี้โดยการเสนอเซ็นเซอร์อุณหภูมิสำหรับการตรวจจับมนุษย์เพื่อรักษาความเป็นส่วนตัวของบุคคล ในเซ็นเซอร์เหล่านี้, ค่าอุณหภูมิของพื้นที่ถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า [9], [10] การตรวจจับมนุษย์สามารถทำได้โดยการประมวลผลและวิเคราะห์สัญญาณที่ได้รับ หากคำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่ำและเซ็นเซอร์อุณหภูมิเหล่านี้กำลังได้รับความนิยมในการติดตามและการบ้านอัจฉริยะเนื่องจากความแม่นยำและประสิทธิภาพของพวกเขา [11]

การตรวจคนเป็นหนึ่งในข้อมูลสำคัญและควรมีในแอปพลิเคชันในโลกความเป็นจริง นี่สามารถบรรลุได้โดยใช้เซ็นเซอร์อินฟราเรดไร้สายหลายอัน (PIR) [12], [13] และต้องจัดเซ็นเซอร์ไว้ในที่ต่าง ๆ ในมุมต่าง ๆ วิธีการตั้งเดิมนี้ยากต่อการปฏิบัติ, แต่มีข้อจำกัด เช่น - สามารถตรวจจับได้เมื่อเป้าหมายเคลื่อนไหวเท่านั้น เซ็นเซอร์อุณหภูมิระยะเบียบสามารถเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาเนื่องจากมันสามารถตรวจจับวัตถุทั้งที่เคลื่อนที่และนิ่ง ความสามารถในการตรวจความไวและความตอบสนองของเซ็นเซอร์อารีย์ของอุณหภูมิสูง และมีอัตราสัญญาณต่อเสียงที่ดีกว่าทำให้มันเหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิในแอปพลิเคชันต่าง ๆ มากกว่าเซ็นเซอร์ไร้ระยะเบียบ [14], [15]

การก้าวหน้าในเชิงที่เกี่ยวกับการตรวจจับมนุษย์ใช้เซ็นเซอร์อุณหภูมิเพื่อตรวจจับบุคคล [16] สำหรับการใช้งานต่าง ๆ เช่น นับที่ประตูและการตรวจจับคนเดินทางโดยใช้หุ่นยนต์ การพยากรณ์แล้วไม่สามารถแก้ไขประมาณ ออกภาพพื้นหลังแบบภาพเบลอเทคนิคและผลที่ได้รับความนิยมแทนไม่ดีขึ้นเนื่องจากภาพทางร้อนที่ไม่ชัดเจน

การใช้วิธีการโอกาสโดยใช้เซ็นเซอร์ Grid-EYE [18] ได้ผลสำเร็จในรูปของการตรวจคน แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากขนาดของวัตถุ การทำงานที่ใช้เซ็นเซอร์ Grid-EYE ถูกขยายไปในการติดตาม [19] และกิจกรรมที่

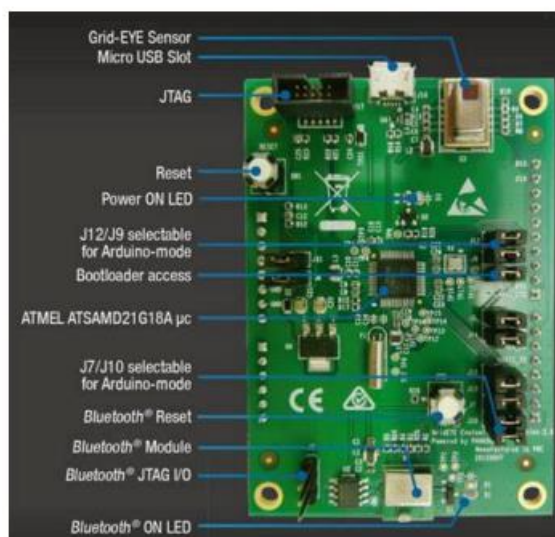
เกี่ยวกับพลังงานได้รับการจัดรู้ในที่ทำงาน [20] การประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ Grid-EYE ได้สังเกตเห็นในแอปพลิเคชันเช่น - การตรวจความเคลื่อนไหวของนิ้วมือ [21], การตรวจและติดตามคนภายใน FOV ขนาด 2.5 x 2.5 เมตร [22] และการตรวจคนในรถ [23] ทั้งหมดมีการทำงานโดยใช้เซ็นเซอร์ Grid-EYE โดยไม่ต้องประมวลผลข้อมูลมากนักและการประมวลผลในเวลาจริงน้อยมากแอปพลิเคชันต่าง ๆ เช่น - การติดตามการตรวจการตกอาวุธของผู้สูงอายุโดยใช้เซ็นเซอร์อาร์เรย์คลาสที่ k-Nearest Neighbor [24] โดยใช้ 16x4 อาร์เรย์อุณหภูมิ, การตรวจความแตกต่างในการวางตัวของมนุษย์เช่นเดิน, นอน, นั่ง [25] โดยใช้ 16x16 อาร์เรย์อุณหภูมิและการติดตามคนที่เดินทางบนเส้นทางหลายเหลี่ยมด้วยอาร์เรย์อุณหภูมิที่มีความละเอียดสูง 24x32 [26] อย่างไรก็ตาม ยังคงมีการบิดเบือนขอบของพื้นที่การตรวจครอบคลุมมุมมองกว้างของเซ็นเซอร์ มนุษย์ทำงานเพื่อปรับปรุงพื้นที่การตรวจเดียวกันโดยใช้เซ็นเซอร์มากขึ้น [27] และสลับในราคาของระบบ

ในบทความนี้, วิธีการที่เสนอใช้เซ็นเซอร์อาร์เรย์เดี่ยว (Grid-EYE) เพื่อตรวจคนหลายคนในเวลาจริง ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ถูกเก็บรวบรวมและประมวลผลในเวลาจริงเพื่อตรวจคนอยู่หรือไม่อยู่ในบางที่ ในบทความนี้การตรวจคนโดยใช้เซ็นเซอร์อุณหภูมิที่มีประสิทธิภาพทำได้โดยการเชื่อมต่อเซ็นเซอร์อุณหภูมิกับ Raspberry Pi และการประมวลผลสัญญาณในเวลาจริง การศึกษาจำลองเบื้องต้นดำเนินการโดยใช้เซ็นเซอร์อาร์เรย์เดี่ยวเพื่อตรวจจับเป้าหมายหลายรายการในพื้นที่ตรวจ โดยใช้ MATLAB ภายหลังโดยใช้ Raspberry Pi และการเขียนโปรแกรมด้วย Python, การดำเนินการเปรียบเทียบเทคนิคการประมาณค่าและการกรองที่ต่างกันเพื่อเลือกเมธอดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจเป้าหมาย การเปรียบเทียบเวลาการคำนวณสำหรับการตรวจเป้าหมายโดยใช้การจำลองใน MATLAB และการดำเนินการในเวลาจริง จุดสำคัญในบทความนี้คือการทำให้การตรวจคนในเวลาจริงโดยใช้เซ็นเซอร์อุณหภูมิ ความพยายามเน้นไปที่การคำนวณเวลาของอัลกอริทึมประมวลผลสัญญาณที่คำนวณใน Raspberry Pi ให้น้อยกว่าอัตราเฟรมของเซ็นเซอร์ส่วนที่เหลือของบทความนี้จัดลำดับตามนี้ ส่วน II นำเสนอข้อมูลของเซ็นเซอร์อาร์เรย์ระยะเบียบ (Grid-EYE sensor), รายละเอียดของชุดการประเมินเซ็นเซอร์ Grid-EYE ที่ใช้และข้อมูลของ Raspberry Pi ส่วน III นำเสนอวิธีการที่ใช้ในการตรวจคนนั่ง/หลายคน ส่วน IV นำเสนอผลทดลองการตรวจเป้าหมายมนุษย์ในเวลาจริง ส่วน V คือส่วนสรุป

## บทที่ 2

### เซ็นเซอร์อาร์เรย์

รังสีอินฟราเรดของเป้าหมายถูกตีบรรยายโดยเซ็นเซอร์อาร์เรย์อินฟราเรดเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและแปลงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเหล่านี้เป็นสัญญาณไฟฟ้า หลายเซ็นเซอร์อาร์เรย์ถูกเชื่อมต่อเป็นชุดตายในเซ็นเซอร์อุณหภูมิอาร์เรย์ และพวกเขาทำงานโดยใช้หลักการของ "Seebeck Effect" [13]. เซ็นเซอร์อาร์เรย์อาร์เรย์ระเบียบได้รับรังสีอินฟราเรดจากมนุษย์และตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนไหวและนิ่งทั้งสองโดยให้ค่าอุณหภูมิของเป้าหมาย ค่าอุณหภูมิถูกรับจากเซ็นเซอร์อาร์เรย์ระเบียบ (Grid-EYE-AMG8834) โดยใช้ชุดการประเมินเซ็นเซอร์ Grid-EYE เหมือนที่แสดงในรูปที่ 1 [28].



**FIGURE 1. Grid-EYE infrared array sensor evaluation kit [28].**

รูปที่ 1 ชุดประเมินเซ็นเซอร์อาร์เรย์อินฟราเรด Grid-EYE [28]

องค์ประกอบที่ใช้ในเซ็นเซอร์ AMG8834 Grid-EYE ถูกฝังอยู่ในชุดการประเมิน เซ็นเซอร์ Grid-EYE ถูกเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ (ATMEGA21G18A) ผ่านโปรโตคอล I2C ชุดนี้จะถูกจ่ายพลังงานผ่านพอร์ตไมโครยูเอสบี ข้อมูลอุณหภูมินั้นที่ถูกประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ผ่านโปรโตคอล USB การเชื่อมต่อระหว่าง Grid-EYE, ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ PC แสดงในรูปที่ 2 ข้อมูลของเซ็นเซอร์ Grid-EYE อยู่ในตาราง 1 เซ็นเซอร์ Grid-EYE ให้รูปภาพอุณหภูมิขนาด 8x8 รูปที่ 3 แสดงผลลัพธ์เซ็นเซอร์อุณหภูมิ โดยที่มนุษย์อยู่ในพื้นที่ตรวจจับในภาพนี้, สีแดงและสีน้ำเงินแสดงถึงอุณหภูมิสูงและต่ำตามลำดับ

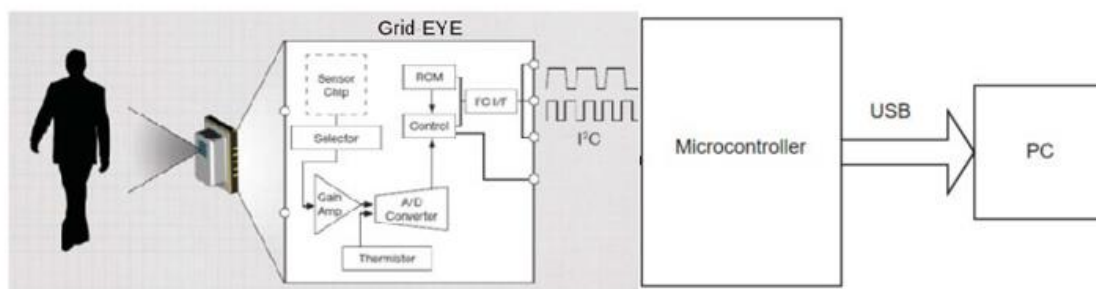


FIGURE 2. Connection block diagram.

รูปที่ 2 แผนภาพบล็อกการเชื่อมต่อ

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของเซ็นเซอร์ Grid-EYE

TABLE 1. Specifications of grid eye sensor [29].

Parameter	Details
Number of Pixels	64(8 rows x 8 columns)
Temperature range of targets	$-20^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$
Absolute temperature accuracy	$\pm 3^{\circ}\text{C}$
Range of Detection	7m
Acquisition Frequency	1 frame/s or 10 frames/s
Field of View (FoV)	$60^{\circ}\text{C}$

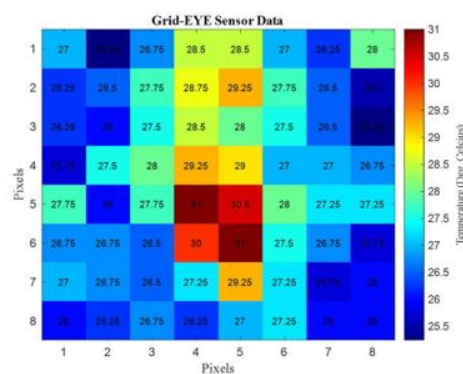


FIGURE 3. Grid-EYE sensor data.

รูปที่ 3 ข้อมูลเซ็นเซอร์ Grid-EYE

ฮิสโตแกรมของภาพความร้อนกับมนุษย์แสดงในรูปที่ 4 โดยสังเกตได้จากรูปที่ จำนวนครั้งของอุณหภูมิหนึ่งๆ ที่เกิดขึ้นในห้องหนึ่งๆ[30]

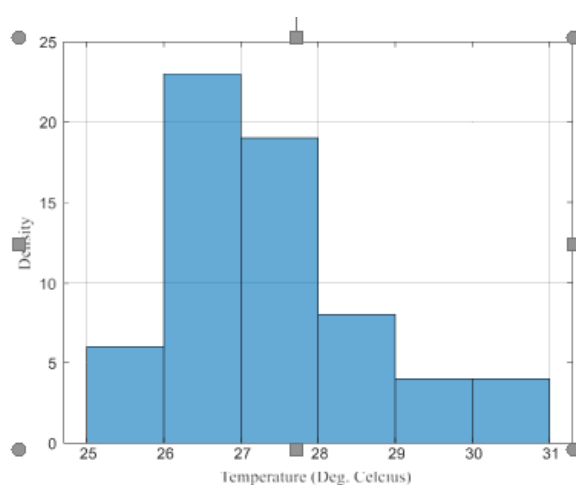


FIGURE 4. Histogram of thermal image.

รูปที่ 4 ฮิสโตแกรมของภาพความร้อน



## A. พื้นที่ของเป้าหมายในภาพเทอร์มอล

ข้อมูลขนาด 64 พิกเซล ( $8 \times 8$ ) ที่ได้รับจากเซ็นเซอร์ Grid-EYE นั้นถูกใช้สำหรับการประมวลผลข้อมูลเพิ่มเติม หากระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ Grid-EYE และเป้าหมายเพิ่มขึ้น เซ็นเซอร์จะครอบคลุมพื้นที่ที่ตรวจจับเพิ่มเติม เป้าหมายที่อยู่ในพื้นที่ที่ตรวจจับจะแสดงในภาพผลลัพธ์ของเซ็นเซอร์ Grid-EYE ด้วยค่าพิกเซลที่มีอุณหภูมิสูงบางส่วนตามที่แสดงในรูปที่ 5.

แผงเทอร์โมไฟล์ประกอบด้วยองค์ประกอบการตรวจจับ 64 ชิ้น และแต่ละองค์ประกอบมี FoV อยู่ที่  $7.5^\circ$  รูปที่ 5 ยังแสดงพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยแต่ละพิกเซลสำหรับระยะห่างระหว่างวัตถุกับเซ็นเซอร์ที่แตกต่างกัน เป้าหมายความร้อนครอบคลุมพิกเซลมากขึ้นในภาพความร้อนเมื่อเป้าหมายอยู่ใกล้กับเซ็นเซอร์มาก ในทำนองเดียวกัน หากเก็บเซ็นเซอร์ไว้ในระยะไกล (5 ม.) เซ็นเซอร์ก็สามารถครอบคลุมมนุษย์ได้ภายในหนึ่งพิกเซล การปรากฏของมนุษย์ในภาพเอ็ดฟุตจะลดลงเมื่อมนุษย์เคลื่อนออกจากเซ็นเซอร์

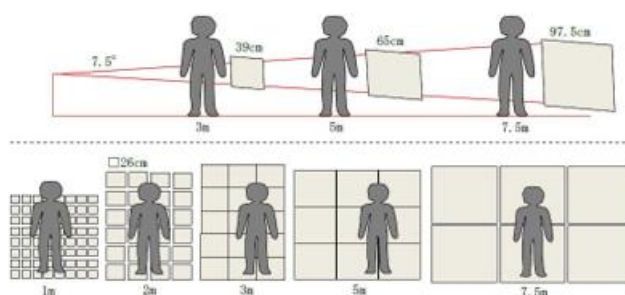


FIGURE 5. Distance versus object size [29].

รูปที่ 5 ระยะทางเทียบกับขนาดวัตถุ [29]

รูปที่ 6 แสดงจำนวนพิกเซลที่มีความร้อนแสดงถึงการมีวัตถุอยู่ในภาพอุณหภูมิที่ถูกขยาย (100 × 100) จำนวนพิกเซลที่มีความร้อนในภาพอุณหภูมิจะลดลงเมื่อวัตถุเคลื่อนออกจากเซ็นเซอร์ คุณสมบัตินี้จึงถูกนำมาใช้ในการประเมินตำแหน่งของมนุษย์ในมุมมองเข้ามา [31] จากการวิเคราะห์นี้ คุณสามารถเลือกที่จะวางเซ็นเซอร์ในระยะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานของตนเองในขณะเดียวกัน

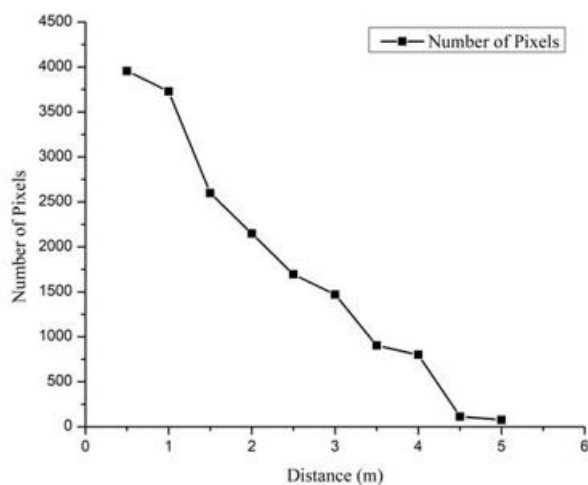


FIGURE 6. Detected heat pixels versus distance.

รูปที่ 6 พิกเซลความร้อนที่ตรวจพบเทียบกับระยะทาง

## B. อุณหภูมิระหว่างเป้าหมาย

ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างที่วัดจากเซ็นเซอร์อาเรย์โดยการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างมนุษย์และเซ็นเซอร์แสดงในรูปที่ 7 ระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์และมนุษย์แปรผันระหว่าง 0.5 ถึง 5 เมตรที่ละ 0.5 เมตร พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างมนุษย์และเซ็นเซอร์เพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิที่วัดของเป้าหมายลดลง จากนี้สามารถสรุปได้ว่ามีขีดจำกัดในระยะของเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจครอบ [32]

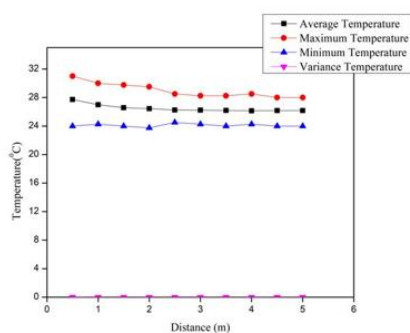


FIGURE 7. Target temperature versus distance.

รูปที่ 7 อุณหภูมิเป้าหมายเทียบกับระยะทาง

### C. มุมมองของเซ็นเซอร์ Grid-EYE

พื้นที่ที่ตรวจจับและมุมมองของเซ็นเซอร์ Grid-EYE แสดงในรูปที่ 8 เซ็นเซอร์ถูกวางแนวนอนและครอบคลุมพื้นที่ที่ตรวจจับที่อยู่ด้านล่าง พื้นที่ที่ตรวจจับที่ใหญ่กว่าสามารถครอบคลุมได้ หากระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์และพื้นเพิ่มขึ้น ระยะขอบของพื้นที่ที่ตรวจจับ, R, ถูกคำนวณตามรูปร่างดังนี้:  $R = 2 * X * \tan \theta$  (1) โดยที่ X คือระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์และวัตถุ และ  $\theta$  คือมุมมอง เมื่อศึกษาเซ็นเซอร์ถูกวางที่ความสูง 2.8 เมตรบนฝ้าเพดานและพื้นที่ที่ตรวจจับบนพื้นคือ 9 ตารางเมตร [32].

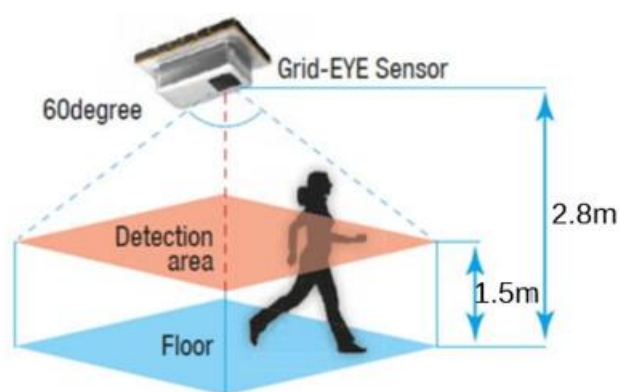


FIGURE 8. Field of view and detection area of Grid- EYE [29].

รูปที่ 8 ขอบเขตการมองเห็นและพื้นที่ที่ตรวจจับของ Grid- EYE [29]

### D. Raspberry Pi

ในบทความนี้ เพื่อการตรวจจับมนุษย์ในเวลาจริง เซ็นเซอร์ Grid-EYE ถูกเชื่อมต่อกับ Raspberry Pi Raspberry Pi จะทำหน้าที่เป็นคอมพิวเตอร์เล็กและราคาไม่แพง มันใช้งานโดยส่วนใหญ่สำหรับการประมวลผลภาพ/วิดีโอเรียลไทม์ อัลกอริทึมประมวลผลสัญญาณถูกนำมาใช้ใน Raspberry Pi เพื่อประมวลผลเฟรมข้อมูลที่ได้รับมาจากเซ็นเซอร์ ส่วนประกอบต่าง ๆ ของ Raspberry Pi 4 แสดงในรูปที่ 9 [33]

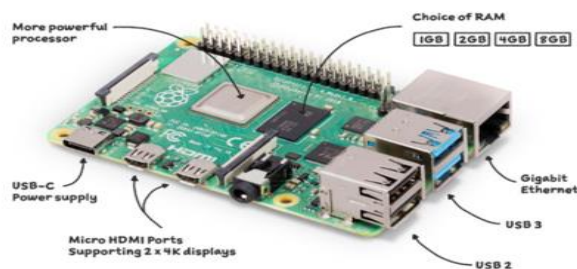


FIGURE 9. Raspberry Pi 4 [33].

รูปที่ 9 ราสเบอร์รี่ Pi 4 [33]

ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของ raspberry Pi[33].

**TABLE 2.** Specifications of raspberry Pi [33].

Parameter	Details
CPU	64 BIT Quad-core ARM Cortex-A72 (1.5GHz)
RAM	4GB
USB Ports	2 USB 3.0 2 USB 2.0
Networking	Gigabit Ethernet

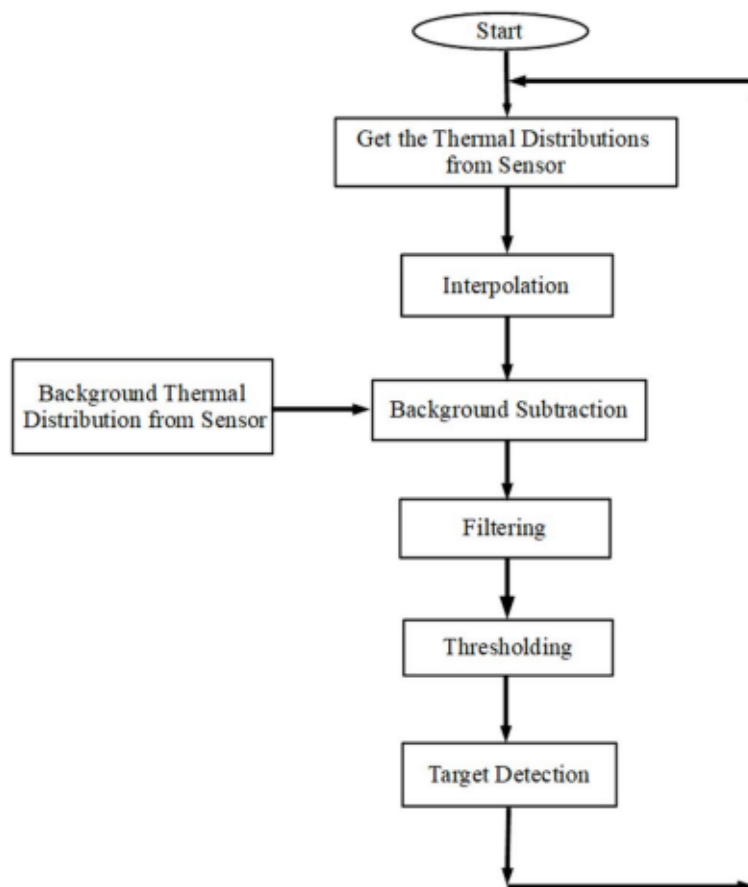
### บทที่ 3

#### ระบบตรวจคนหลายคนที่นั่ง/เคลื่อนที่

ขั้นตอนที่มีในการตรวจคนหลายคนที่นั่งในมุมมองของเซ็นเซอร์แสดงในรูปที่ 10 ค่าอุณหภูมิถูกเก็บรวบรวมจากเซ็นเซอร์อาร์เรย์อินฟราเรด (เฟรม 8x8) และค่าอุณหภูมิเหล่านี้ถูกทำการตีแบบเพื่อให้ได้เฟรมขนาด 100x100 เฟรมที่ถูกทำการประมาณค่าถูกลบออกจากอุณหภูมิพื้นหลังที่ถูกประมาณค่าผลลัพธ์ถูกบรรยายออกโดยใช้ตัวกรองการสับสน เฟรมที่ปรับให้เรียบใช้สำหรับการตรวจจับเป้าหมายโดยใช้การปรับค่าขีดจำกัดแบบปรับได้.

##### A. ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ Grid-EYE

ข้อมูลค่าอุณหภูมิที่เก็บมาจากเซ็นเซอร์เทอร์มอไพล์แสดงในรูปของอาร์เรย์ขนาด  $8 \times 8$  พิกเซลเหมือนมนุษย์เคลื่อนไหวในพื้นที่ตรวจจับของเซ็นเซอร์ Grid-EYE ค่าอุณหภูมิของเซ็นเซอร์ Grid-EYE ถูกเก็บรวบรวมทุกครั้งที่ด้วยอัตรา 10 เฟรมต่อวินาทีผ่านพอร์ตซีเรียลไปยังคอมพิวเตอร์ส่วนตัว ค่าอุณหภูมิเหล่านี้ขนาด 12 บิตเหล่านี้ถูกแปลงเป็นองศาเซลเซียส



**FIGURE 10. Flow chart of the detection of human targets.**

รูปที่ 10 แผนภูมิการไหลของการตรวจจับเป้าหมายของมนุษย์

## B. การประเมินตำแหน่ง

ผลลัพธ์จากเซ็นเซอร์ Grid-EYE มีความละเอียด  $8 \times 8$  และประกอบด้วยพิกเซลจำนวน 64 พิกเซล ซึ่งมีความละเอียดต่ำมากสำหรับการตรวจจับมนุษย์จำเป็นต้องเพิ่มความละเอียดของภาพความร้อนเริ่มต้น ความร้อนจากเซ็นเซอร์ Grid-EYE ถูกประเมินตำแหน่งขึ้นตั้งแต่เริ่มแรกและได้รับภาพความร้อนของความละเอียด  $100 \times 100$  วิธีการประเมินตำแหน่งภาพที่แตกต่างกันเช่น Nearest Neighbor, Bilinear, และ Bicubic ถูกเปรียบเทียบและเลือกวิธีการประเมินตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการตรวจจับมนุษย์

### 1) การประเมินตำแหน่ง Nearest Neighbor

ในเทคนิคการประเมินตำแหน่งนี้ ค่าพิกเซลใหม่ที่ประเมินตำแหน่งจะถูกเลือกจากพิกเซลที่ตั้งอยู่ใกล้เคียงมากที่สุด การประเมินตำแหน่งแบบ Nearest Neighbor จะเพียงคัดลอกค่าที่มีอยู่แล้ว ฟังก์ชันการประมาณค่าแบบ Nearest Neighbor คือ [34]:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases} \quad (2)$$

โดย  $x$  คือระยะห่างระหว่างพิกเซลที่ประเมินตำแหน่งและพิกเซลที่ตั้งอยู่ใกล้เคียง สำหรับภาพสองมิติ ให้พิกเซลที่ประเมินขึ้นมาเป็น  $A = f(x, y)$  และพิกเซลที่ตั้งอยู่ใกล้เคียงที่สุดคือ  $(i, j)$ ,  $(i, j + 1)$ ,  $(i + 1, j)$ ,  $(i + 1, j + 1)$

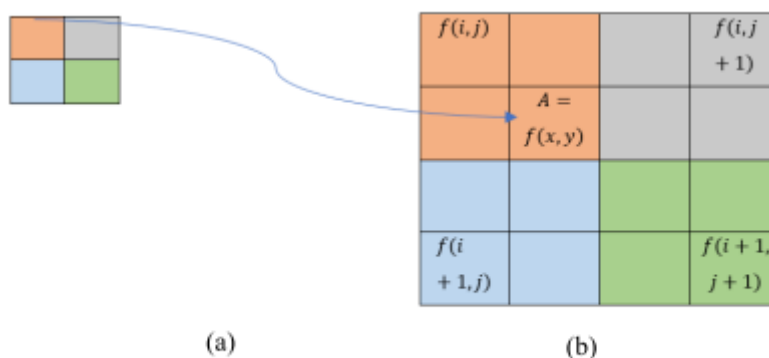
ระยะห่างระหว่าง  $(x, y)$  และ  $(i, j)$ ,  $(i, j + 1)$ ,  $(i + 1, j)$  และ  $(i + 1, j + 1)$  ถูกคำนวณ จากนั้นค่าของ  $(x, y)$  จะถูกตั้งค่าเป็นค่าของจุดที่ใกล้ที่สุดกับ  $(x, y)$  [32] ระยะห่าง  $D$  ระหว่างพิกเซลสองแต่ละด้าน  $f(i, j)$  และ  $f(x, y)$  ถูกคำนวณ:

$$D = \sqrt{(x - i)^2 + (y - j)^2} \quad (3)$$

ขนาดภาพจริงขนาด  $2 \times 2$  แสดงในรูปที่ 11a แต่ละพิกเซลในภาพจริงถูกประเมินตำแหน่งเป็น 4 พิกเซล และภาพที่ประเมินตำแหน่งขึ้นเป็นภาพที่ประเมินตำแหน่งล่าสุดมีพิกเซลสืบทอดพิกเซลเช่นในรูปที่ 11 b ทั้งสองภาพควรมีลักษณะเดียวกัน

## 2) การประเมินตำแหน่ง BILINEAR

การประเมินตำแหน่งแบบ Bilinear นี้คือกระบวนการที่ค่าพิกเซลที่ประเมินตำแหน่งใหม่ ถูกคำนวณจากค่าเฉลี่ยที่มีน้ำหนักของพิกเซลที่ใกล้เคียง 4 พิกเซลที่ใกล้ที่สุด โดยใช้การประเมินตำแหน่งแบบเส้นตรงสามครั้ง สองครั้งในทิศทางแนวนอนและ หนึ่งในทิศทางแนวตั้ง ฟังก์ชันการประเมินตำแหน่งแบบ Bilinear คือ [34]:



**FIGURE 11. a. Actual image b. Interpolated image.**

รูปที่ 11 a. ภาพจริง ข. ภาพ Interpolated

$$f(x) = \begin{cases} 0 & |x| > 1 \\ 1 - |x| & |x| < 1 \end{cases} \quad (4)$$

โดย  $x$  คือระยะห่างระหว่างพิกเซลที่ประเมินตำแหน่งและพิกเซลจุดเชิงขอบคือ P, Q1, Q2, Q3, Q4 ที่ใกล้ที่สุดกับ P ดังแสดงในรูปที่ 12. ในเริ่มต้นจุด R ถูกคำนวณโดยการทำการประเมินตำแหน่งเส้นตรงในทิศทางแนวนอนด้วยการอ้างอิงจากจุด Q1 และ Q2 ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้:

$y_2$	$Q_1$ $= f(x_1, y_2)$	$R$ $= f(x_i, y_2)$	$Q_2$ $= f(x_2, y_2)$
$y_i$		$P$ $= f(x_i, y_i)$	
$y_1$	$Q_4$ $= f(x_1, y_1)$	$S$ $= f(x_i, y_1)$	$Q_3$ $= f(x_2, y_1)$
	$x_1$	$x_i$	$x_2$

**FIGURE 12. Bilinear interpolation.**

รูปที่ 12 การแก้ไขแบบสองบรรทัด



$$R = f(x_i, y_2) = \frac{(x_2 - x_i)}{(x_2 - x_1)} Q_1 + \frac{(x_1 - x_i)}{(x_2 - x_1)} Q_2 \quad (5)$$

จุด S ถูกคำนวณโดยการทำการประเมินตำแหน่งเส้นตรงในทิศทางแนวนอนด้วยการอ้างอิงจากจุด Q3 และ Q4 ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้:

$$S = f(x_i, y_1) = \frac{(x_i - x_1)}{(x_2 - x_1)} Q_3 + \frac{(x_2 - x_i)}{(x_2 - x_1)} Q_4 \quad (6)$$

สุดท้ายค่า P ถูกคำนวณโดยการทำการประเมินตำแหน่งเส้นตรงในทิศทางแนวตั้งด้วยการอ้างอิงจากจุด P และ S ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้:

$$P = B_1(x_i, y_i) = \frac{(y_2 - y_i)}{(y_2 - y_1)} S + \frac{(y_i - y_1)}{(y_2 - y_1)} R \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P = B_1(x_i, y_i) &= \frac{1}{(y_2 - y_1)(x_2 - x_1)} \\ &\times \{(x_2 - x_i)(y_i - y_1)Q_1 + (x_i - x_1)(y_i - y_1)Q_2 \\ &+ (x_i - x_1)(y_2 - y_i)Q_3 \\ &+ (x_2 - x_i)(y_2 - y_i)Q_4\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$Q_1 = f(x_1, y_2), Q_2 = f(x_2, y_2), Q_3 = f(x_2, y_1), Q_4 = f(x_1, y_1)$$

### 3) การประเมินตำแหน่ง BICUBIC

ในการประเมินตำแหน่งแบบ Bicubic ค่าการประเมินตำแหน่งถูกคำนวณ โดยใช้ค่าเฉลี่ยของช่องค่างเคียงขนาด 4x4(16) พิกเซล ระยะทางระหว่างพิกเซล ที่ถูกคำนวณ และพิกเซลที่ยังไม่รู้ในภาพจะแตกต่างกัน

ฟังก์ชันการประเมินตำแหน่งแบบ Bicubic คือ [36]:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{3}{2}|x|^3 - \frac{5}{2}|x|^2 + 1, & 0 \leq |x| < 1 \\ -\frac{1}{2}|x|^3 + \frac{5}{2}|x|^2 - 4|x| + 2, & 1 \leq |x| < 2 \\ 0, & 2 < |x| \end{cases} \quad (9)$$

x คือระยะห่างระหว่างจุดเชิงขอบและจุดที่ประเมินตำแหน่ง สำหรับภาพที่มีขนาดสองมิติ เทคนิคการประเมินตำแหน่งแบบ Bilinear นี้ใช้พอลิโนเมียลลำดับสามชั้นเพื่อคำนวณค่าของรูปภาพ F ในตำแหน่งย่อยพิกเซล(rf,cf)[37] การประเมินตำแหน่ง Bicubic ถูกกำหนดโดย:

$$B_c(x, y) = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 \alpha_{mn} x^m y^n \quad (10)$$

ในการคำนวณค่าของพิกเซลที่ตำแหน่ง  $(r, c)$  ค่าพหุนามความเกี่ยวของทั้ง 16 ค่าความเข้มสี  $\alpha_{mn}$  ถูกวัดจากค่าของภาพและค่าอนุพันธ์ของพิกเซล 4 จุด  $[F(r, c), F(r+1, c), F(r, c+1), F(r+1, c+1)]$  บริเวณรอบๆ  $(r, c)$  ดังแสดงในรูปที่ 13.

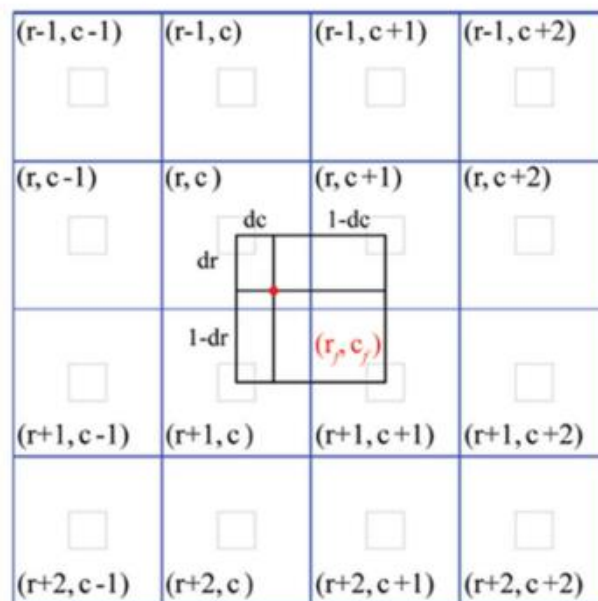


FIGURE 13. Bicubic interpolation [37].

รูปที่ 13 การแก้ไขแบบ Bicubic [37]

ขั้นตอนการคำนวณสำหรับการประเมินตำแหน่ง Bicubic คือ:

- 1) ข้อมูลรูปภาพเดิมถูกนำมาและถูกประเมินตำแหน่งเพื่อสร้างรูปภาพที่ราบเรียบการประเมินตำแหน่งดำเนินการตามแนวราบ เส้นและเส้นเฉียง
- 2) ประมาณ  $F$  แต่อย่างน้อยที่เป็นรูปภาพขนาด  $R \times C$ , รูปภาพใหม่  $S$  ถูกสร้างขึ้นจากรูปภาพ  $F$  ขนาด  $R' \times C'$  ด้วยตำแหน่งพิกเซล  $x \times y$  โดยที่  $x = 1, 2, \dots, R'$  และ  $y = 1, 2, \dots, C'$ .
- 3) ค่าพิกเซลของภาพผลลัพธ์  $S(r', c')$  ถูกกำหนดโดยพิกเซลที่อยู่ใกล้เคียง (4 ค่า) คือ  $F(r, c)$ ,  $F(r+1, c)$ ,  $F(r, c+1)$  และ  $F(r+1, c+1)$ .
- 4) อนุพันธ์บางส่วนของแต่ละพิกเซลใน 4 พิกเซลที่อยู่ใกล้เคียงเหล่านี้ตามแนวแถวและแนวคอลัมน์คือ  $\partial I / \partial r = F_r$  และ  $\partial I / \partial c = F_c$ .

5) การหาอนุพันธ์ข้างข้างแบบตัดกันของแต่ละฟังก์ชันที่ตัวที่อยู่ติดกันรอบๆแนวทแยงมีค่าเท่ากับ  $\partial^2 I / \partial r \partial c = F_{rc}$  ดังนั้นการคำนวณนั้นจะเกี่ยวข้องกับ 16 ค่าในกรณีของการโอนเลี้ยงแบบบายคิวบิคคือสำหรับแต่ละค่าฟังก์ชันที่ติดกันสี่ตัวนั้น คือ ค่าอนุพันธ์บางส่วนของฟังก์ชันทั้งแนวแถว แนวคอลัมน์ และอนุพันธ์ข้างข้าง (ตามแนวทแยง)

6) การหาอนุพันธ์ข้างข้างแบบตัดกันของแต่ละฟังก์ชันที่ตัวที่อยู่ติดกันรอบๆแนวทแยงมีค่าเท่ากับ  $\partial^2 I / \partial r \partial c = F_{rc}$  ดังนั้นการคำนวณนั้นจะเกี่ยวข้องกับ 16 ค่าในกรณีของการโอนเลี้ยงแบบบายคิวบิคคือสำหรับแต่ละค่าฟังก์ชันที่ติดกันสี่ตัวนั้น คือ ค่าอนุพันธ์บางส่วนของฟังก์ชันทั้งแนวแถว แนวคอลัมน์ และอนุพันธ์ข้างข้าง (ตามแนวทแยง) ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชัน  $F(r, c)$ :

$$B_c(r, c) = F(r, c) \quad (11)$$

$$\frac{\partial B_c(r, c)}{\partial r} = \frac{\partial F(r, c)}{\partial r} \quad (12)$$

$$\frac{\partial B_c(r, c)}{\partial c} = \frac{\partial F(r, c)}{\partial c} \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 B_c(r, c)}{\partial r \partial c} = \frac{\partial^2 F(r, c)}{\partial r \partial c} \quad (14)$$

โดย

$$\frac{\partial B_c(r, c)}{\partial r} = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 \alpha_{mn} m r^{m-1} c^n \quad (15)$$

$$\frac{\partial B_c(r, c)}{\partial c} = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 \alpha_{mn} n r^m c^{n-1} \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 B_c(r, c)}{\partial r \partial c} = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 \alpha_{mn} m n r^{m-1} c^{n-1} \quad (17)$$

$$F_r = \frac{\partial F(r, c)}{\partial r} = \frac{F(r+1, c) - F(r-1, c)}{2} \quad (18)$$

$$F_c = \frac{\partial F(r, c)}{\partial c} = \frac{F(r, c+1) - F(r, c-1)}{2} \quad (19)$$

$$F_{rc} = \frac{\partial^2 F(r, c)}{\partial r \partial c} = \frac{F(r+1, c+1) - F(r+1, c-1)}{2} + \frac{F(r-1, c-1) - F(r-1, c+1)}{2} \quad (20)$$

7) เช่นกันกับ ค่าของฟังก์ชันและอนุพันธ์ของมันที่ตำแหน่งฟังก์ชันอื่น ๆ 3 ตัว  $[F(r, c+1), F(r+1, c), F(r+1, c+1)]$  ถูกคำนวณ

8) ค่า  $[r, c]$  มีค่าต่อเนื่องในช่วง  $[0 \times 1]$  และค่าของรูปภาพต้นฉบับ  $F(r, c), F(r+1, c), F(r, c+1), F(r+1, c+1)$  ถูกกำหนดใหม่เป็น  $F(0, 0), F(1, 0), F(0, 1), F(1, 1)$

9) สมการด้านบนถูกนำมาสูตรใหม่ในรูปแมทริกซ์สำหรับสมการเชิงเส้น  $AX = B$  โดยที่

$$X = \begin{bmatrix} \alpha_{00} & \alpha_{10} & \alpha_{20} & \alpha_{30} & \alpha_{01} & \alpha_{11} & \alpha_{21} & \alpha_{31} \\ \alpha_{02} & \alpha_{12} & \alpha_{22} & \alpha_{32} & \alpha_{03} & \alpha_{13} & \alpha_{23} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$B = [F(0,0), F(1,0), F(0,1), F(1,1), F_r(0,0), \dots \dots F_c(0,0), \dots \dots F_{rc}(0,0)] \quad (22)$$

10) ค่าสัมประสิทธิ์ 16 ค่าถูกกำหนดโดย:

$$X = A^{-1}B \quad (23)$$

11) โดยใช้สัมประสิทธิ์ 16 ค่าเหล่านี้ รูปภาพที่ถูกโอนเลียงใหม่ถูกได้รับโดยใช้สูตร:

$$S(x, y) = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 \alpha_{mn} x^m y^n \quad (24)$$

การสังเกตและเปรียบเทียบวิธีการประเมินตำแหน่งแบบต่างๆจะถูกพูดถึงถึงในบท IV. จะพบว่าการประเมินตำแหน่งแบบ Bicubic ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า ในการเพิ่มความละเอียดของรูปภาพความร้อน.

### C. การลบพื้นหลัง (BACKGROUND SUBTRACTION)

ภาพพื้นหลังจะถูกนำมาหาคำนวนอนุกรมเฉลี่ย ค่าอนุกรมเฉลี่ยของภาพพื้นหลังจะถูกนำมาลบออกจากภาพเบื้องหน้าโดย

$$B(i, j) = F(i, j) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N B^k(i, j) \quad (25)$$

$B(i, j)$  คือภาพที่ถูกลบพื้นหลัง  $F(i, j)$  คือภาพความร้อนที่มีคนอยู่  $B^k(i, j)$  คือภาพความร้อนที่ไม่มีคนอยู่  $N$  คือจำนวนภาพ การลบภาพพื้นหลังช่วยในการลบคลื่นรบกวน การมีมนุษย์ในพื้นที่ที่ตรวจจับ จะมีค่าอนุกรมสูงสุดในภาพตัวอย่าง [38], [39], [40].

#### D. การกรอง (FILTERING)

เซ็นเซอร์ Grid-EYE อาจเสี่ยงต่อคลื่นรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอกภาพ ถูกประมวลผ่านเทคนิคการกรองเพื่อเสริมภาพและลดคลื่นรบกวน ในกระบวนการประมวลรูปภาพ ขอบเขตเชิงพื้นที่ที่หมายถึงระนาบรูปภาพเอง โดยที่กระบวนการถูกดำเนินการโดยตรงบนพิกเซลของภาพนำเข้า [41] ในกระบวนการกรองค่าพิกเซลใดๆ ในภาพผลลัพธ์ถูกคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ที่กำหนดล่วงหน้า กับค่าพิกเซลใกล้เคียงในพิกเซลนำเข้า กระบวนการใช้แมสก์กรองที่ถูกเคลื่อนย้ายบนภาพจากจุดไปยังจุด การกระทำในขอบเขตเชิงพื้นที่ที่ถูกแสดงเป็น:

$$P(p, q) = T[f(p, q)] \quad (26)$$

โดยภาพที่นำเข้าคือ  $f(p, q)$ , ภาพผลลัพธ์คือ  $P(p, q)$  และ  $T$  เป็นตัวดำเนินการบนภาพนำเข้า  $f$  ที่กำหนดโดย จุดใกล้เคียงของมัน เมื่อใช้ตัวกรองเชิงพื้นที่สำหรับการกรองรับภาพจะเริ่มจากลงและเสียงถูกนำออก กระบวนการการจางนี้ถูกนำมาใช้กับภาพก่อนที่จะลบวัตถุออกในกระบวนการจางนี้รายละเอียดเล็กๆ ในภาพถูกนำออกและมันเชื่อมต่อกับช่องว่างเล็กๆ ระหว่างเส้นหรือเส้นโค้งตัวกรอง การกรองรับเชิงพื้นที่ที่แตกต่างกันรวมถึงตัวกรองเฉลี่ย(mean)

การกรอง การกรองภาพเกาส์เซียน การกรองภาพเฉลี่ย ในบทความนี้ วิธีการกรองที่แตกต่างกัน ถูกเปรียบเทียบและเลือกใช้วิธีการกรองแบบเกาส์เซียนเป็นที่เหมาะสมที่สุดการเปรียบเทียบการกรองที่ แตกต่างกันใน การทดลองทำในส่วน IV

การกรองภาพเฉลี่ยและการกรองภาพเกาส์เซียนเป็นตัวกรองเชิงเส้น เมื่อกรองเชิงเส้นภาพนำเข้าขนาด  $M \times N$  ด้วยแมสก์กรอง  $w$  ขนาด  $m \times n$  จะเป็นดังนี้:

$$P(p, q) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(p + s, q + t) \quad (27)$$

ค่า  $p$  และ  $q$  ถูกเปลี่ยนแปลงเพื่อนำให้ทุกพิกเซลใน  $w$  ทับกับทุกพิกเซลใน  $f$  แต่บางพิกเซล อาจจะไม่ทับซ้อนกัน ดังนั้นการเติมศูนย์ไปด้านทั้งสองข้างของ  $f$  ทำให้ทุกพิกเซลใน  $w$  ทับกับทุกพิกเซลใน  $f$  หากแมสก์กรองมีขนาด  $m$ , แต่  $p \geq 0$  และ  $q \geq 0$  มีการเติมศูนย์  $m - 1$  ตามทั้งสองข้างของ

### 1)การกรองภาพเกาส์เซียน (GAUSSIAN FILTER)

โดยการใช้ฟังก์ชันเกาส์เซียนสองมิติ,การกรองภาพเกาส์เซียนจะถูกทำลงไปทีรูปภาพ

โดยฟังก์ชันเกาส์เซียนสองมิติมีสมการดังนี้

$$w(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (28)$$

โดย $\sigma$ (sigma)คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ย0.เมทริก3x3ของการกรองภาพเกาส์เซียนมีสมการดังนี้

$$w = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

การแจกแจงแบบปกติสองมิติที่มีค่าเฉลี่ย(0,0)และ $\sigma$ (sigma) = 1 จะเป็นดังรูปที่14

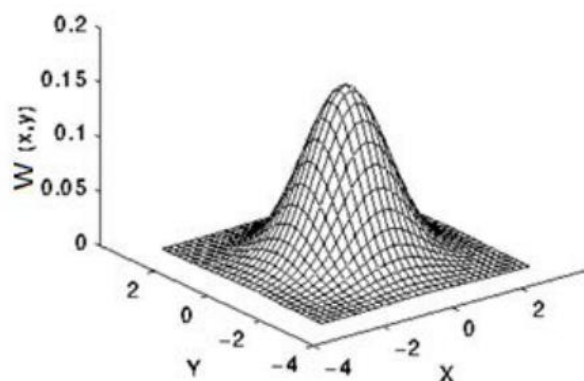


FIGURE 14. 2D Gaussian distribution [42].

รูปที่ 14 การกระจายแบบเกาส์ 2D [42]

## 2)การกรองภาพเฉลี่ย (MEAN FILTER)

ค่าของพิกเซลที่ $f(x,y)$ ทุกพิกเซลจะถูกคำนวณโดยการนำค่าพิกเซลข้างเคียงที่ถูกกรองภาพเฉลี่ยมาหาค่าเฉลี่ย

$$G(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{(x,y)} f(x, y) \quad (30)$$

โดย  $m \times n$  คือขนาดของแมทริก.ตัวอย่างเช่นนำค่าพิกเซลข้างเคียง  $3 \times 3$  ช่องมาหาค่าเฉลี่ยของ $(x,y)$ จะได้

$$w = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

ในการกรองภาพเฉลี่ยทุกตัวแปรมีค่าเท่ากัน[41]

## 3)ตัวกรองสัญญาณมัธยฐาน (MEDIAN FILTER)

มันคือตัวกรองแบบไม่เชิงเส้น.แต่ละพิกเซลจะถูกแทนที่โดยค่ามัธยฐานของพิกเซลข้างเคียง.

ตัวอย่างเช่นช่อง  $3 \times 3$  ในแต่ละช่องจะถูกคำนวณหาค่ามัธยฐานโดย

i)เก็บค่าของทุกพิกเซลในช่องมาเรียงจากมากไปน้อย

ii)เลือกค่าของพิกเซลตรงกลางมาเป็นค่ามัธยฐานสำหรับพิกเซล $(x,y)$ .

## E. การกำหนดขอบเขตที่เปลี่ยนแปลงได้

อุณหภูมิภายในพื้นที่ภายในอาคารนั้นมีความหลากหลาย.เมื่อตัว Grid-EYE ถูกย้ายที่ตั้งอุณหภูมิในอากาศและค่าความร้อนของมนุษย์อาจเปลี่ยนแปลงได้.เราถือว่าอุณหภูมิพื้นหลังของห้องมีตัวแปรค่าเฉลี่ยและมันเปลี่ยนแปลงได้ตามการแจกแจงแบบปกติ.มันมีจุดที่อุณหภูมิสูงหลายจุดในภาพที่ได้ออกมาที่ไม่ใช่จุดเป้าหมาย,ซึ่งจะทำให้ได้ค่าผิดพลาด.มันจำเป็นที่จะต้องกำจัดจุดอุณหภูมิสูงออกไปมิเช่นนั้นมันอาจตรวจสอบผิดพลาดได้.ด้วยเหตุผลนี้ขอบเขตของอุณหภูมิจะถูกคำนวณโดยวิธีการกำหนดขอบเขตที่เปลี่ยนแปลงได้.ในวิธีนี้,ขอบเขต(T)จะถูหาโดยสมการ

$$T = \text{Max} * 0.6$$

โดยที่ค่าMaxคือค่าสูงสุดของค่าความร้อนพื้นหลัง.ค่าขอบเขตคือ60%ของค่าความร้อนสูงสุด.และเป็นที่รู้กันว่ามนุษย์มีค่าความร้อนสูงกว่าค่าขอบเขต,เราจึงสามารถตรวจจับมนุษย์ได้โดยง่าย

## F. ภาพความร้อนแบบไบนารีและการตรวจจับเป้าหมาย

จุดสนใจสามารถหาได้โดยการคำนวณค่าขอบเขตและนำไปเปลี่ยนเป็นภาพความร้อนแบบไบนารีนำค่าจากการแจกแจงแบบปกติมาเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตถ้าค่าการแจกแจงมีค่ามากกว่าให้ค่าในภาพความร้อนมีค่าเป็น1ถ้าไม่ใช่อย่างที่ว่ามาให้เป็น0จากนี้เราจะได้ภาพแบ่งเขตแบบไบนารีออกมาในภาพความร้อนแบบไบนารีภาพอุณหภูมิของสิ่งที่อยู่ในจุดสนใจจะมีค่าเป็น1และพื้นหลังเป็น0ในจุดสนใจแสดงการมีอยู่ของมนุษย์.



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในตอนแรกเซ็นเซอร์ตรวจอุณหภูมิในห้องเปล่าเป็นเวลาสองวินาทีภาพที่ได้จากห้องเปล่านี้ถูกนำไปประเมินตำแหน่งและเฉลี่ยเพื่อหาค่าพื้นหลัง



FIGURE 15. Data acquisition setup.

### รูปที่ 15 การตั้งค่าการเก็บข้อมูล

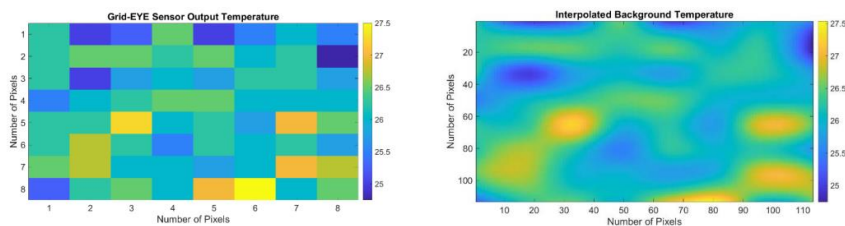


FIGURE 16. Sensor and interpolated image of empty room.

### รูปที่ 16 เซ็นเซอร์และภาพ interpolated ของห้องว่าง

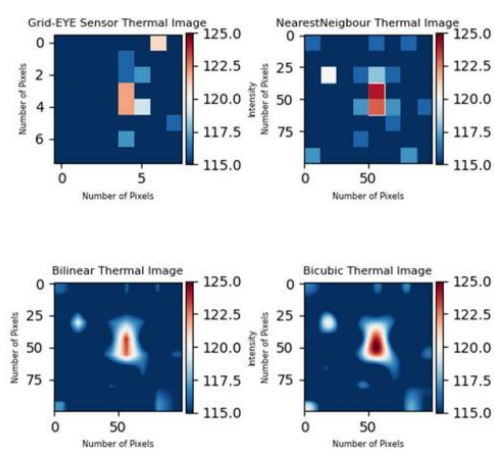


FIGURE 17. Comparison of different interpolation techniques.

รูปที่ 17 การเปรียบเทียบเทคนิคการแก้ไขที่แตกต่างกัน

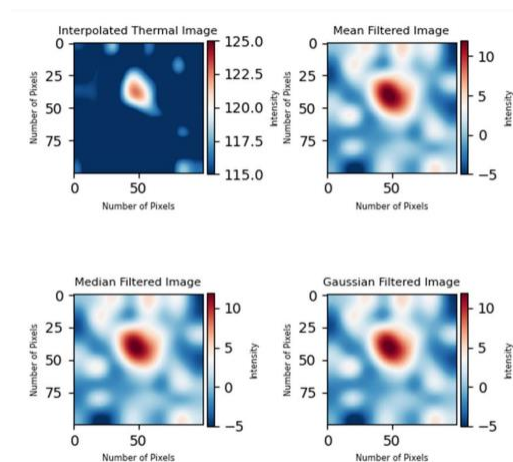
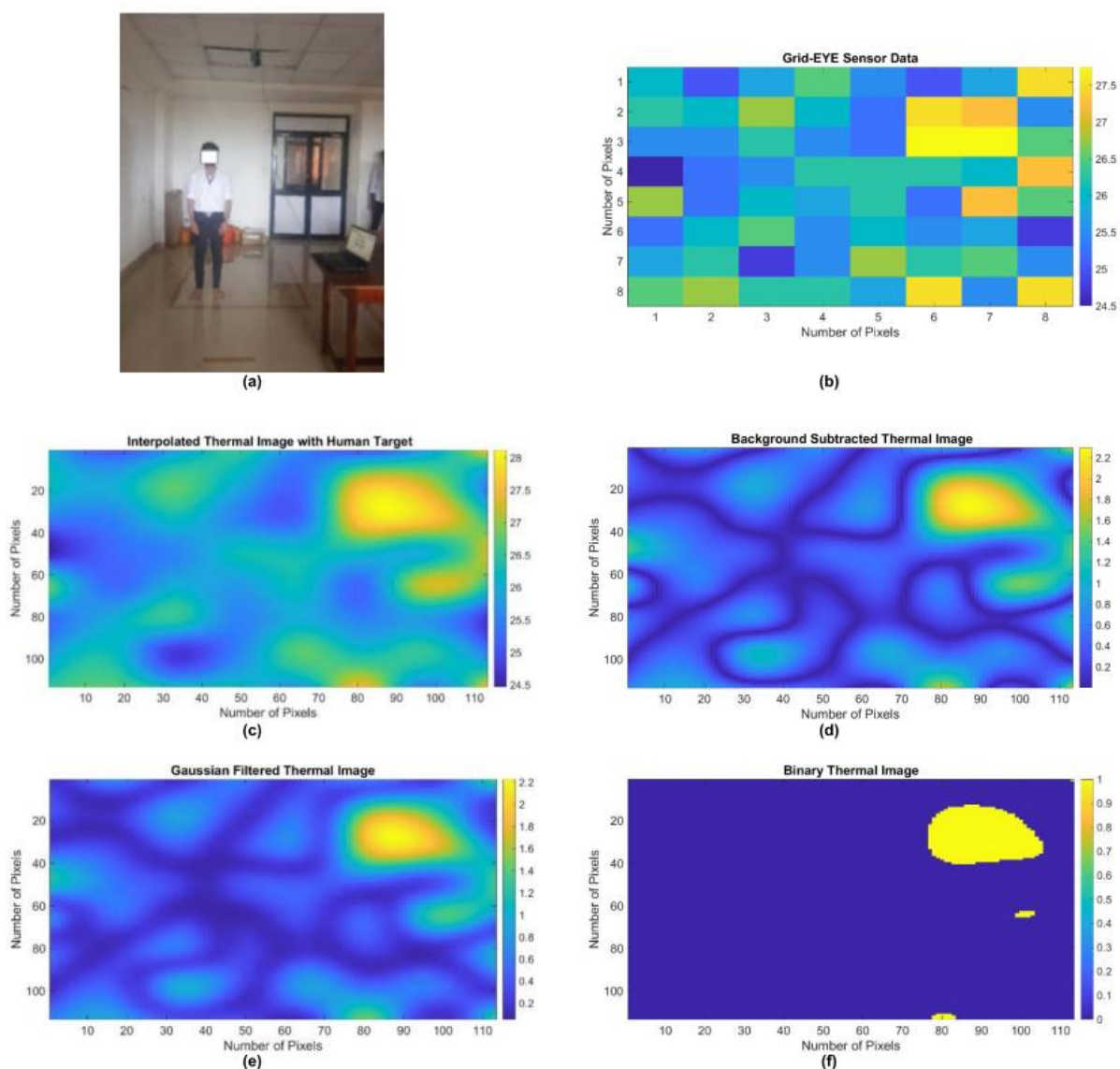


FIGURE 18. Comparison of different filtering methods.

รูปที่ 18 การเปรียบเทียบวิธีการกรองที่แตกต่างกัน

นำภาพความร้อนที่มีมนุษย์อยู่มาประเมินตำแหน่ง. หลังจากนั้นภาพความร้อนที่มีมนุษย์จะนำไปลบกับภาพพื้นหลัง. ค่าคลื่นแทรกที่ปรากฏในภาพจะถูกทำให้เรียบโดยการกรองภาพเกาส์เซียน. ในภาพกรองเกาส์เซียน, จะสามารถหาบริเวณที่แน่นอนโดยการแปลงเป็นภาพความร้อนแบบไบนารี. ภาพความร้อนจะถูกแปลงเป็นภาพความร้อนแบบไบนารีโดยการเลือกค่าขอบเขตที่เหมาะสม. ค่าขอบเขตจะใช้แยกภาพเป็นสองบริเวณ



**FIGURE 19.** (a) Camera image (b) Sensor data (c) Interpolated image (d) Background subtracted image (e) Gaussian filter (f) Binary thermal image of a single person.

รูปที่ 19 (a) ภาพจากกล้อง (b) ข้อมูลเซนเซอร์ (c) ภาพ Interpolated (d) ภาพพื้นหลังถูกลบ

(e) ตัวกรองเกาส์ (f) ภาพความร้อนไบนารีของคนเดียว

ค่าอุณหภูมิในบริเวณที่มากกว่าขอบเขตจะมีค่าเป็น1ส่วนค่าที่น้อยกว่าจะมีค่าเป็น0.

จากข้างบนนี้เราจึงได้ค่าของจุดสนใจที่เราต้องการหลังจากได้ค่าขอบเขตของอุณหภูมิบริเวณจุดสนใจที่ตรวจได้  
ถูกนำเสนอโดยกรอบภาพเดิมที่อัลกอริธึมที่ใช้ถูกสร้างในแมทแลปแต่อัลกอริธึมได้เปลี่ยนมาใช้แบบเรียลไทม์โด  
ยผ่านการเชื่อมต่อGrid-EYEกับRaspberry Pi.

### A. ขั้นตอนการติดตั้งระบบสะสมข้อมูล

การทดลองนี้จัดทำในอาคาร.รูปแบบการติดตั้งถูกแสดงในรูปที่ 15.Grid-EYE มีขอบเขตภาพ 60องศา.  
ในภาพนี้ตัวเซ็นเซอร์ถูกวางในแนวนอนข้างบนเพดานสูงจากพื้น 2.8 เมตร และครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 9  
ตารางเมตร.พื้นที่ที่ตรวจสอบของGrid-EYEถูกแสดงในรูปที่ 15.กรอบสี่เหลี่ยมด้านนอกแสดงถึง  
ขอบเขตตรวจสอบ9ตารางเมตรและกรอบสี่เหลี่ยมด้านในแสดงพื้นที่2ตารางเมตร.ภาพความร้อนของห้องปลั  
วและภาพความร้อนที่ถูกประเมินตำแหน่งมีอยู่ในรูปที่ 16.

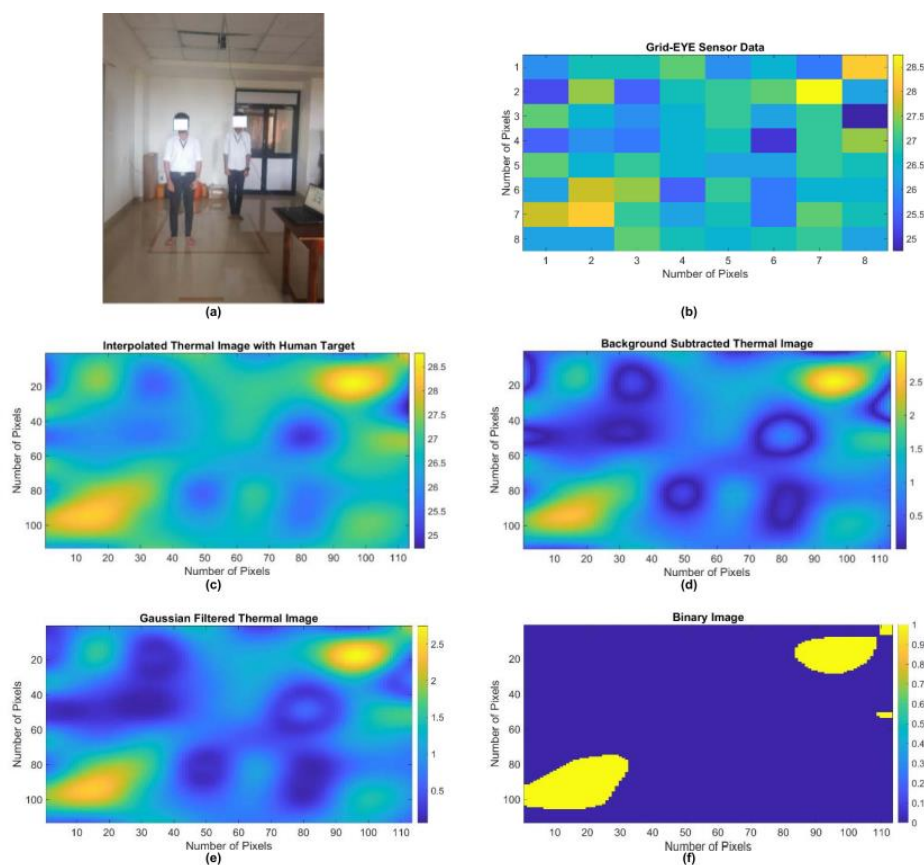


FIGURE 20. (a) Camera image (b) Sensor data (c) Interpolated image (d) Background subtracted image (e) Gaussian filter (f) Binary thermal image of a two person.

รูปที่ 20 (a) ภาพจากกล้อง (b) ข้อมูลเซนเซอร์ (c) ภาพ Interpolated (d) ภาพพื้นหลังถูกลบ

(e) ตัวกรองเกาส์ (f) ภาพความร้อนไบนารีของสองคน

## B.การเปรียบเทียบอัลกอริธึมการประมาณค่าแบบต่างๆ

การทดลองเริ่มด้วยการพิจารณาพิกเซล  $8 \times 8$  จากเซ็นเซอร์ความร้อน. ความชัดภาพความร้อนถูกเปลี่ยนขนาดเป็น  $100 \times 100$  พิกเซลโดยใช้ การประมาณค่าจากตำแหน่งใกล้เคียงที่สุด การประมาณค่าแบบเส้นคู่, Bicubic interpolation. ค่าความสามารถต่อไปนี้จะใช้เปรียบเทียบวิธีการต่างๆ

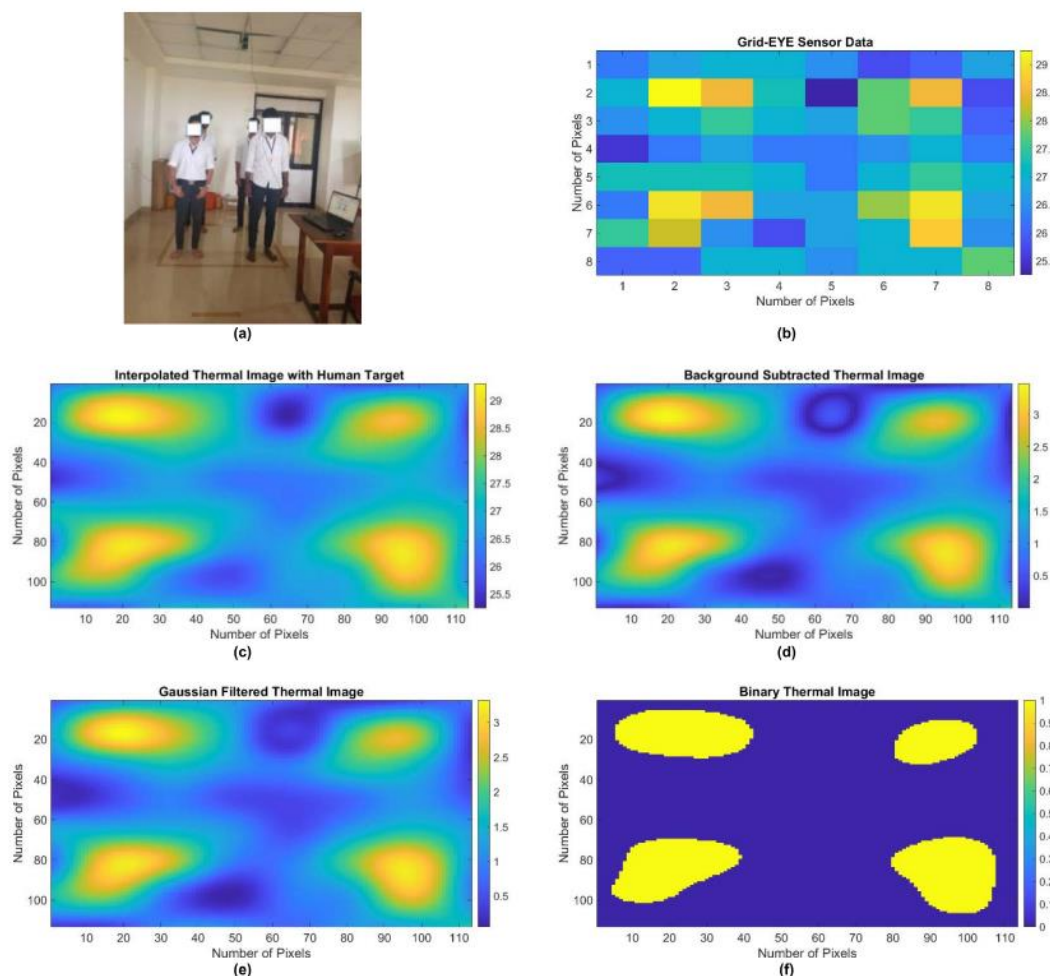
- 1) Mean Square Error (MSE)
- 2) Root Mean Square Error (RMSE)
- 3) Signal to Noise Ratio (SNR)
- 4) Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)
- 5) Similarity Index (SSIM)
- 6) Execution Time

จากตารางที่3จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของ การประมาณค่าแบบต่างๆส่งผลต่อคุณภาพของรูป. ยิ่ง SNR สูง, คุณภาพของรูปก็ยิ่งสูง, จากการสังเกตภาพความร้อน, ค่า SNR ในการประมาณค่าแบบ Bicubic มีค่าสูงกว่าการประมาณค่าแบบอื่นๆ. จากค่า SSIM, การประมาณค่าจากตำแหน่งใกล้เคียงที่สุดเหมือนกับภาพเดิม 39% เทียบกับการประมาณค่าแบบอื่นๆ.

ค่า PSNR ในการประมาณค่าแบบ Bicubic มีค่า 28 dB, และสูงกว่าการประมาณค่าแบบอื่นๆ. ค่า MAE และ MSE ในการประมาณค่าแบบ Bicubic มีค่าและน้อยกว่าการประมาณค่าแบบอื่นๆ จากการสังเกตประสิทธิภาพการทำงานของ การประมาณค่าแบบต่างๆ, การประมาณค่าแบบ Bicubic มีประสิทธิภาพการทำงานมากกว่าวิธีอื่นๆ.

การประมาณค่าจากตำแหน่งใกล้เคียงที่สุ่มนั้นเรียบง่าย, ใช้เวลาน้อย, และสามารถนำไปใช้งานได้ง่ายกว่าวิธีอื่น แต่การประมาณค่าแบบนี้จะทำให้เสียข้อมูลบริเวณขอบบางส่วน.

การประมาณค่าแบบเส้นให้คุณภาพดีกว่าการประมาณค่าจากตำแหน่งใกล้เคียงที่สุดและใช้เวลาน้อยกว่า Bicubic interpolation. Bicubic interpolation ใช้เวลานานที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาานกว่าภาพของ Bicubic interpolation มีความแม่นยำและคมชัดกว่าวิธีอื่นๆ ดังรูปที่ 17. จากการสังเกต, Bicubic interpolation, เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุด และเราจึงนำมันมาใช้ในการทดลอง.



**FIGURE 21.** (a) Camera image (b) Sensor data (c) Interpolated image (d) Background subtracted image (e) Gaussian filter (f) Binary thermal image of four persons.

รูปที่ 21 (a) ภาพจากกล้อง (b) ข้อมูลเซ็นเซอร์ (c) ภาพ Interpolated (d) ภาพลบพื้นหลัง (e) ตัวกรองเกาส์ (f) ภาพความร้อนแบบไบนารีของสี่ท่าน



### C. เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างวิธีการกรองแบบต่างๆ

หลังจากการประมาณค่า, การกรองภาพเพื่อลดคลื่นรบกวนและทำให้ภาพดูเรียบขึ้นวิธีการกรองแบบต่างๆที่นำมาใช้คือ การกรองภาพเฉลี่ย ตัวกรองสัญญาณมัลติฐาน การกรองภาพเกาส์เซียน. เกณฑ์ประสิทธิภาพต่างๆจะเหมือนข้างบนนำมาเปรียบเทียบวิธีการกรองต่างๆ. เมื่อใช้การกรองภาพเกาส์เซียน, ค่า MSE และ RMSE ของภาพความร่อนนั้นน้อยกว่าวิธีการอื่นๆดังตารางที่ 4. ค่า PSNR ของการกรองภาพเกาส์เซียนคือ 28dB, ซึ่งมากกว่าวิธีการอื่นๆ. เวลาการทำงานของ การกรองภาพเกาส์เซียนน้อยกว่าวิธีการกรองภาพเฉลี่ย.

จากการสังเกตค่าประสิทธิภาพ, การกรองภาพเกาส์เซียนมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการกรองอื่นๆและถูกเลือกมาใช้ในอัลกอริทึมตรวจจับ. ภาพแสดงการกรองแบบต่างๆดังรูปที่ 18.

ตารางที่ 3 ค่าประสิทธิภาพของการประเมินตำแหน่งแบบต่างๆ

**TABLE 3. Performance metrics for different interpolation techniques.**

Performance Metrics/ Interpolation Methods	Nearest Neighbor	Bilinear	Bicubic
MAE	4.8745	4.9347	4.5823
MSE	30.48390	28.9773	25.9361
RMSE	5.32849	5.3232	4.9986
SNR (dB)	34.0404	35.3925	34.7337
PSNR (dB)	27.3034	27.5236	28.0051
SSIM	0.3970	0.1197	0.0912
Execution Time (s)	0.000160	0.00018	0.00020

ตารางที่ 4 ค่าประสิทธิภาพของการกรองแบบต่างๆ

**TABLE 4. Performance metrics for different filters.**

Performance Metrics/ Filtering Methods	Mean	Median	Gaussian
MAE	4.5367	3.3417	4.3569
MSE	24.9739	23.7182	21.9198
SNR (dB)	36.5180	36.4138	36.0045
PSNR (dB)	28.1693	28.3933	28.5444
SSIM	0.0668	0.0644	0.05353
Execution Time (s)	0.00027	0.0049	0.00029

#### D. อุณหภูมิห้องกับขนาดสิ่งของ

การทดลองนี้ถูกจัดขึ้นในสองห้องเพื่อตรวจสอบว่าอุณหภูมิห้องมีผลต่อการเซ็นเซอร์ความร้อนหรือไม่

เราทำการทดลองโดยการตรวจจับคนในจุดต่างๆภายในพื้นที่ทดลองในแต่ละจุดจะทำการตรวจสอบลิบรอบและนำมาหาค่าเฉลี่ยของพิกเซลที่ทำงาน. ในตารางที่ 5 แสดงจำนวนพิกเซลที่ทำงาน ณ จุดต่างๆภายในพื้นที่ทดลอง.

จะสังเกตได้ว่าเมื่ออุณหภูมิห้องลดลงจำนวนพิกเซลที่ทำงานจะเพิ่มขึ้นถ้าบุคคลที่เข้ามาในห้องที่มีอุณหภูมิต่ำกว่านอกห้อง พิกเซลที่ทำงานในรูปภาพความร้อนจะมีมากขึ้น.

#### E. อัลกอริทึมตรวจสอบการใช้งานของพื้นที่

ภาพถ่ายจากกล้องและขั้นตอนการตรวจสอบคนหนึ่งคนแสดงในรูปที่ 19. ในภาพนี้คนยืนอยู่หนึ่งๆ. ภาพอื่นๆในรูปที่ 19 แสดงขั้นตอนการตรวจสอบของอัลกอริทึม บริเวณที่เป็นสีเหลืองในภาพความร้อนแบบไบนารีคือจุดที่ตรวจพบเป้าหมาย.

ภาพถ่ายจากกล้องและขั้นตอนการตรวจสอบคนสองคนแสดงในรูปที่ 20. สังเกตได้ว่าภาพความร้อนแบบไบนารีบริเวณสีเหลืองแสดงว่ามีมนุษย์สองคนอยู่ภายในพื้นที่ตรวจสอบดังรูปที่ 22. ภาพถ่ายจากกล้องและขั้นตอนการตรวจสอบคนสี่คนแสดงในรูปที่ 21. บริเวณสีเหลืองในภาพความร้อนแบบไบนารีแสดงว่ามีคนสี่คนในพื้นที่ตรวจสอบและถูกวาดรูปสี่เหลี่ยมทับไว้ดังรูปที่ 23.

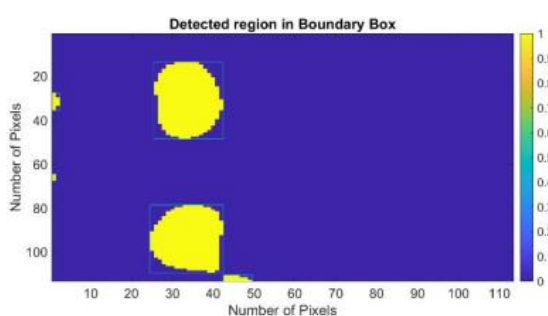


FIGURE 22. Detected two people in boundary box.

รูปที่ 22 ตรวจพบคนสองคนในกล่องขอบเขต

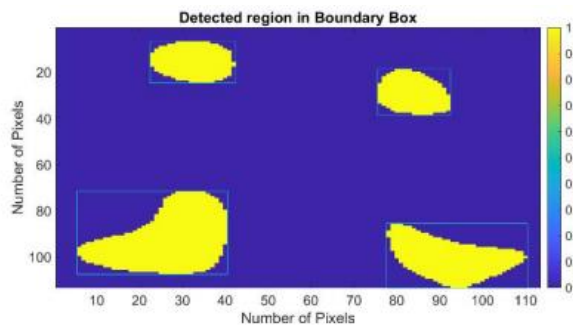


FIGURE 23. Detected four people in boundary box.

รูปที่ 23 ตรวจพบคนสี่คนในกล่องขอบเขต

## F.การดำเนินการแบบเรียลไทม์ของอัลกอริทึมตรวจสอบ

การดำเนินการแบบเรียลไทม์ทำงานโดย Raspberry pi ต่อกับ Grid-EYE การตรวจสอบคนหนึ่งคนแบบเรียลไทม์ภายในขอบเขตภาพของเซ็นเซอร์แสดงในรูปที่ 24. วิธีการประมาณค่าที่ใช้อยู่ในอัลกอริทึมนี้คือ Bicubic interpolation. มนุษย์ที่ตรวจเจอจะถูกกรอบสี่เหลี่ยมครอบไว้. ถ้ามีการขยับเขยื้อนภายในพื้นที่ที่ตรวจสอบ, มันก็สามารถแสดงกรอบสี่เหลี่ยมใหม่ได้ภายในเวลาเสี้ยววินาที. จุดสนใจหลายจุด (คนสามคน) แบบเรียลไทม์แสดงในรูปที่ 25. เวลาในการคำนวณของอัลกอริทึมตรวจสอบโดย Raspberry pi คือ 90ms. ค่าเวลาการคำนวณโดยใช้อุปกรณ์จำลองใน MATLAB คือ 10 วินาทีในคอมพิวเตอร์.

จะเห็นได้ว่าการดำเนินการแบบเรียลไทม์เร็วกว่าการคำนวณโดยใช้อุปกรณ์จำลองใน MATLAB. เนื่องจากการคำนวณเวลาของการดำเนินการแบบเรียลไทม์ (90ms) น้อยกว่าอัตราเฟรม (100ms) ของเซ็นเซอร์จึงสามารถตรวจสอบมนุษย์โดยที่ไม่สูญเสียข้อมูลได้.

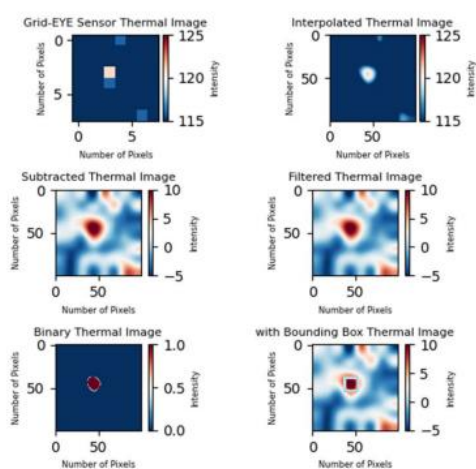


FIGURE 24. Single person detection.

รูปที่ 24 การตรวจจับบุคคลเดียว

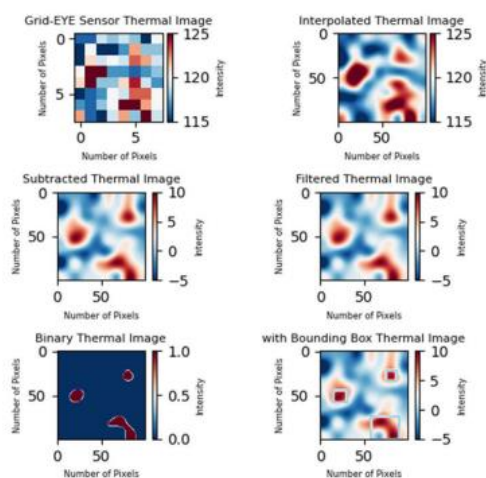


FIGURE 25. Multiple person detection.

รูปที่ 25 การตรวจจับบุคคลหลายคน



## บทที่5

### บทสรุปและการต่อยอด

เริ่มแรกนั้นบทวิทยานี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการตรวจสอบมนุษย์หลายคนโดยใช้Grid-EYE(AMG3388)ด้วยการคำนวณค่าการกระจายความร้อนที่ออกมาจากร่างกายภายในอาคารโดยใช้อุปกรณ์จำลองใน MATHLAB. ต่อมาบทวิทยได้กล่าวถึงการตรวจสอบมนุษย์หลายคนแบบเรียลไทม์ด้วยเซ็นเซอร์เดียวกัน. ด้วยเซ็นเซอร์คุณภาพต่ำ, เป้าหมายมนุษย์สามารถตรวจสอบได้ง่าย. ข้อได้เปรียบของเซ็นเซอร์ความร้อนที่มีต่อระบบตรวจสอบที่ใช้กล้องคือมีราคาถูกและไม่ได้รับผลกระทบจากสภาพพื้นที่ที่มีแสง. แทนที่จะใช้ระบบตรวจสอบที่ใช้กล้องที่มีราคาแพง, เซ็นเซอร์ความร้อนจึงถูกนำมาใช้. การดำเนินการแบบเรียลไทม์ของBicubic interpolation และการกรองภาพเกาส์เขียนถูกคำนวณใน Raspberry pi และเราพบว่าเวลาในการคำนวณนั้นน้อยกว่าอัตราเฟรมของเซ็นเซอร์. ซึ่งทำให้มันเป็นตัวเลือกที่ดีในการตรวจสอบแบบเรียลไทม์. อุณหภูมิภายในห้องส่งผลต่อเซ็นเซอร์ความร้อนเป็นอย่างมาก. งานวิจัยนี้สามารถต่อยอดได้โดยการทำให้อัลกอริทึมมีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อลดเวลาในการคำนวณทำให้ภาพชัดขึ้นและเพิ่มอัตราเฟรมเซ็นเซอร์. นอกจากนี้, ผลการทดลองที่ได้มายังเปิดประตูไปสู่การใช้เซ็นเซอร์มากกว่าหนึ่งตัวอีกด้วย.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Anand, C. Deb, K. Yan, J. Yang, D. Cheong, and C. Sekhar, “Occupancy-based energy consumption modelling using machine learning algorithms for institutional buildings,” *Energy Buildings*, vol. 252, Dec. 2021, Art. no. 111478, doi: [10.1016/j.enbuild.2021.111478](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111478).
- [2] P. Anand, D. Cheong, C. Sekhar, M. Santamouris, and S. Kondepudi, “Energy saving estimation for plug and lighting load using occupancy analysis,” *Renew. Energy*, vol. 143, pp. 1143–1161, Dec. 2019, doi: [10.1016/j.renene.2019.05.089](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.089).
- [3] P. Anand, D. Cheong, and C. Sekhar, “Computation of zone-level ventilation requirement based on actual occupancy, plug and lighting load information,” *Indoor Built Environ.*, vol. 29, no. 4, pp. 558–574, Apr. 2020, doi: [10.1177/1420326X19875802](https://doi.org/10.1177/1420326X19875802).
- [4] Z. Wang, Z. Yang, and T. Dong, “A review of wearable technologies for elderly care that can accurately track indoor position, recognize physical activities and monitor vital signs in real time,” *Sensors*, vol. 17, no. 2, p. 341, Feb. 2017, doi: [10.3390/s17020341](https://doi.org/10.3390/s17020341).
- [5] X. Luo, Q. Guan, H. Tan, L. Gao, Z. Wang, and X. Y. Luo, “Simultaneous indoor tracking and activity recognition using pyroelectric infrared sensors,” *Sensors*, vol. 17, no. 8, p. 1738, Apr. 2017, doi: [10.3390/s17081738](https://doi.org/10.3390/s17081738).
- [6] T. Miyazaki and Y. Kasama, “Multiple human tracking using binary infrared sensors,” *Sensors*, vol. 15, no. 6, pp. 13459–13476, Jun. 2015, doi: [10.3390/s150613459](https://doi.org/10.3390/s150613459).

ภาคผนวก ก  
บทความต้นฉบับ