

SAC-01-020

การพิสูจน์เชิงทดลองระบบภาพผีแบบคลาสสิกโดยใช้เลเซอร์ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร และระบบวิเคราะห์สหสัมพันธ์ด้วยกล้องสองตัว

Comprehensive Experimental Investigation of Classical Ghost Imaging Utilizing a 405 nm Laser Diode and Dual-Camera Correlation System

อรรถพล ศรีประดิษฐ์^{1*}

Auttapon Sripradit^{1*}

สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว

Department of Industrial Environmental Management,

Faculty of Science and Social Sciences,

Burapha University, SaKaeo Campus

Email: auttapon@go.buu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบ สร้าง และวิเคราะห์เชิงปริมาณของระบบภาพผีแบบคลาสสิก (Classical Ghost Imaging) โดยใช้เลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 405 nm เป็นแหล่งกำเนิดแสง ระบบนี้อาศัยหลักสหสัมพันธ์ทางสถิติอันดับสองในการกู้คืนโครงสร้างเชิงพื้นที่ของวัตถุ โดยไม่ใช้เลนส์ถ่ายภาพแบบดั้งเดิมลำแสง Gaussian ถูกแปลงเป็นลวดลายสเปกเกิลที่ซับซ้อนผ่านแผ่นกระจกฝ้าขัดละเอียด ก่อนแยกด้วยบีมสปลิตเตอร์ออกเป็นสองเส้นทางที่มีความยาวทางเดินแสงเท่ากัน เส้นทางวัตถุให้แสงสเปกเกิลมอดูเลตแอมพลิจูดผ่านฟอยล์อลูมิเนียมรูปตัวอักษร "F" ขนาด 1.5×1.5 ซม. แล้วบันทึกพลังงานรวมด้วยกล้องที่ทำหน้าที่เป็น Bucket Detector ส่วนเส้นทางอ้างอิงบันทึกโครงสร้างสเปกเกิลด้วยกล้องความละเอียดสูง โดยปราศจากวัตถุการทดลองเก็บข้อมูลภาพ 100–1,200 เฟรมเพื่อศึกษาพฤติกรรมการกู้คืนภาพ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สามารถกู้คืนภาพวัตถุได้คมชัด และค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) แปรผันตรงกับรากที่สองของจำนวนเฟรม ($\sqrt{N}$) สอดคล้องกับทฤษฎีแสงคลาสสิก งานวิจัยนี้จึงสนับสนุนแนวทางการประยุกต์ใช้ CGI ในการถ่ายภาพผ่านตัวกลางที่มีการกระเจิงแสงสูง

คำสำคัญ: การถ่ายภาพผี ความปั่นป่วน สหสัมพันธ์สเปกเกิล

Abstract

This research presents the design, construction, and quantitative analysis of a Classical Ghost Imaging (CGI) system utilizing a 405 nm laser diode as the light source. This system relies on second-order statistical correlation to reconstruct the spatial structure of the object without using conventional imaging lenses. The Gaussian beam is converted into a complex speckle pattern through a finely ground glass diffuser before being split by a beam splitter into two paths of equal optical path length. In the object path, the speckle light undergoes amplitude modulation through a 1.5×1.5 cm aluminum foil letter "F" mask, and the total energy is recorded by a camera acting as a Bucket Detector. Meanwhile, the reference path records the speckle structure using a high-resolution camera without the object. The experiment collected image data from 100 to 1,200 frames to study the image recovery behavior. The results show that the reconstructed object image is sharp, and the Signal-to-Noise Ratio (SNR) varies directly with the square root of the number of frames ($\sqrt{N}$), which is consistent with classical light theory. This research supports the guidelines for applying CGI to image through highly scattering media.

Keywords: Ghost imaging, Atmospheric turbulence, Speckle correlation

บทนำ

ระบบภาพผี (Ghost Imaging: GI) เป็นหนึ่งในนวัตกรรมทางทัศนศาสตร์ที่ปฏิวัติแนวคิดการถ่ายภาพดั้งเดิม (Conventional Imaging) โดยในระบบถ่ายภาพทั่วไป แสงจากแหล่งกำเนิดจะต้องตกกระทบวัตถุ สะท้อนผ่านระบบเลนส์รวมแสง เพื่อสร้างภาพลงบนระนาบของเซนเซอร์รับภาพที่มีพิกเซลจำนวนมาก (เช่น CCD หรือ CMOS) ซึ่งหมายความว่า ตัวตรวจจับแสงและวัตถุต้องอยู่บนแกนทัศนศาสตร์เดียวกัน และระบบต้องมีความละเอียดเชิงพื้นที่ในฝั่งผู้รับข้อมูล

อย่างไรก็ตาม ในปี ค.ศ. 1995 Pittman และคณะ ได้ประสบความสำเร็จในการนำเสนอระบบภาพผีเป็นครั้งแรก โดยอาศัยปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เรียกว่า "ความพัวพันทางควอนตัมของคูโฟตอน" (Quantum Entanglement) ซึ่งเกิดจากกระบวนการแปลงลดความถี่เชิงพาราเมตริกแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Parametric Down-Conversion: SPDC) คูโฟตอนที่พัวพันกันจะถูกแยกออกเป็นสองเส้นทาง โฟตอนตัวแรกวิ่งไปชนวัตถุและถูกตรวจจับด้วยเครื่องนับโฟตอนเดี่ยวที่ไม่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ (Bucket Detector) ขณะที่โฟตอนตัวที่สองวิ่งไปตกกระทบเครื่องตรวจจับที่มีพิกเซลละเอียดโดยไม่ผ่านวัตถุ ภาพของวัตถุจะปรากฏขึ้นก็ต่อเมื่อนำสัญญาณจากทั้งสองเครื่องมาคำนวณความสอดคล้องพร้อมกัน (Coincidence Counting) ปรากฏการณ์นี้สร้างความประหลาดใจให้กับวงการฟิสิกส์ในยุคนั้นเป็นอย่างมาก จนได้รับฉายาว่า "ภาพผี" (Ghost Image) เนื่องจากเครื่องตรวจจับที่เห็นวัตถุไม่มีสิทธิ์รับรู้รูปร่าง และเครื่องตรวจจับที่รับรู้รูปร่างก็ไม่เคยเห็นวัตถุ

ต่อมาในภายหลัง Shapiro (2008) และนักวิจัยท่านอื่น ๆ ได้พิสูจน์พบว่า ปรากฏการณ์ภาพผีไม่จำเป็นต้องจำกัดอยู่เพียงแค่คุณสมบัติทางควอนตัมเท่านั้น แต่สามารถเกิดขึ้นได้กับแหล่งกำเนิดแสงคลาสสิก (Classical Light) ที่มีความสอดคล้องเชิงสถิติอันดับสูง (Higher-order Statistical Coherence) เช่น แสงกึ่งความร้อน (Pseudo-thermal Light) ซึ่งสร้างขึ้นจากการนำลำแสงเลเซอร์ที่มีความสอดคล้องสูงมายิงผ่านตัวกลางสุ่มที่เคลื่อนไหว การค้นพบนี้นำไปสู่การพัฒนา "ระบบภาพผีแบบคลาสสิก" (Classical Ghost Imaging: CGI) ซึ่งลดความซับซ้อนและค่าใช้จ่ายของระบบลงอย่างมหาศาล และกลายเป็นรากฐานสำคัญของงานวิจัยฉบับนี้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ฟิสิกส์ของการเกิดลวดลายสเปกเกิล (Physics of Laser Speckle Generation)

เมื่อลำแสงเลเซอร์ซึ่งคลื่นมีความสอดคล้องเชิงพื้นที่และเชิงเวลาสูง (High Spatial and Temporal Coherence) เดินทางผ่านแผ่นกระจกฝ้า พื้นผิวของกระจกฝ้าซึ่งมีความขรุขระระดับไมโครเมตรที่สุ่มตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ จะทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนเฟสของคลื่นแสง (Phase Modulator) แสงเลเซอร์ที่ผ่านแต่ละบริเวณของกระจกฝ้าจะมีความต่างเฟส (Phase Difference) ที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงเมื่อลำแสงเหล่านี้เดินทางต่อไปในอวกาศและเกิดการซ้อนทับกัน (Superposition) บนระนาบตรวจจับ จะเกิดการแทรกสอดทั้งแบบเสริมกัน (Constructive Interference) และแบบหักล้างกัน (Destructive Interference) ปรากฏการณ์นี้ทำให้สนามไฟฟ้าของคลื่นแสงเกิดการมอดูเลตความเข้มแสงเชิงพื้นที่ กลายเป็นกลุ่มจุดสว่างและจุดมืดที่กระจายตัวอยู่อย่างสุ่ม ซึ่งเราเรียกว่า "ลวดลายสเปกเกิล" (Laser Speckle Pattern)

ขนาดเฉลี่ยของจุดสเปกเกิล (δx) บนระนาบตรวจจับสามารถคำนวณได้จากสูตรทางทัศนศาสตร์เชิงคลื่น:

$$\delta x \approx \frac{\lambda z}{D} \quad (1)$$

โดยที่:

λ คือ ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ ในการทดลองนี้คือ 405 nm

z คือ ระยะทางจากแผ่นกระจกฝ้าถึงระนาบเซนเซอร์ตรวจจับ

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนแผ่นดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser)

ลวดลายสเปกเกิลนี้มีความสำคัญยิ่งต่อระบบ CGI เนื่องจากมันทำหน้าที่เป็น "รหัสสุ่มเชิงพื้นที่" (Spatial Random Coding) หากขนาดของจุดสเปกเกิลเล็กกว่ารายละเอียดที่เล็กที่สุดของวัตถุเป้าหมาย ระบบจะสามารถกู้คืนภาพที่มีความละเอียดสูงได้

2. คณิตศาสตร์ระบบสหสัมพันธ์อันดับสอง (Mathematical Formulation of Second-order Correlation)

หัวใจหลักของการกู้คืนภาพในระบบ CGI คือ การคำนวณค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ผกผันเชิงสถิติ (Fluctuation Correlation) ระหว่างความเข้มแสงที่วัดได้จากกล้องทั้งสองตัว ให้ $R(x, y, t)$ เป็นความเข้มแสงเชิงพื้นที่ที่บันทึกโดยกล้องอ้างอิง (Camera 1) ณ ตำแหน่งพิกเซล (x, y) และเวลา t และให้ $B(t)$ เป็นค่าความเข้มแสงรวมที่บันทึกโดยกล้องฝั่งวัตถุ (Camera 2) ณ เวลา t

ค่า $B(t)$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของการอินทิเกรตความเข้มแสงหลังผ่านวัตถุได้ ดังนี้:

$$B(t) = \iint R(x, y, t) \cdot T(x, y) dx dy \quad (2)$$

โดยที่ $T(x, y)$ คือ ฟังก์ชันการส่องผ่านของวัตถุเป้าหมาย (Transmission Function) ซึ่งในกรณีของวัตถุแบบแอมพลิจูดขั้วคู่ (Binary Amplitude Mask) ค่า $T(x, y) = 1$ ในบริเวณที่แสงผ่านได้ และ $T(x, y) = 0$ ในบริเวณทึบแสง

การกู้คืนภาพ $G(x, y)$ ทำได้โดยการหาค่าคาดหวังเชิงสถิติของผลคูณระหว่างส่วนเบี่ยงเบนความเข้มแสง (Intensity Fluctuations):

$$\begin{aligned} \Delta R(x, y, t) &= R(x, y, t) - \langle R(x, y) \rangle \\ \Delta B(t) &= B(t) - \langle B \rangle \end{aligned} \quad (3)$$

สมการสหสัมพันธ์อันดับสองจึงเขียนได้เป็น:

$$G(x, y) = \langle \Delta B \cdot \Delta R(x, y) \rangle = \langle B \cdot R(x, y) \rangle - \langle B \rangle \langle R(x, y) \rangle \quad (4)$$

โดยที่สัญลักษณ์ $\langle \dots \rangle$ แทนการหาค่าเฉลี่ยเชิงเวลาตลอดระยะเวลาของการทดลอง (N เฟรม):

$$\begin{aligned} \langle B \rangle &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B(i) \\ \langle R(x, y) \rangle &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R(x, y, i) \end{aligned} \quad (5)$$

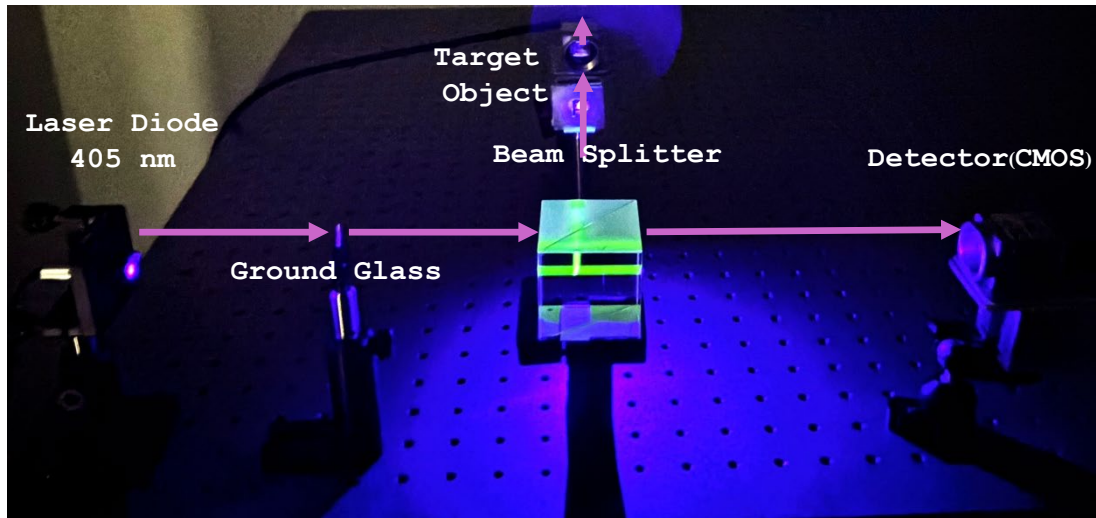
เมื่อจำนวนเฟรม N เข้าสู่ค่าอนันต์ ($N \rightarrow \infty$) ค่า $G(x, y)$ จะลู่เข้าหาภาพลักษณะที่แท้จริงของฟังก์ชันวัตถุ $T(x, y)$ โดยตรง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. แหล่งกำเนิดแสงและการสร้างสเปกเกิล

การทดลองนี้เลือกใช้เลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 405 nm กำลังขับ 5 mW เนื่องจากแสงความยาวคลื่นสั้นในย่านสีม่วงมีความถี่สูงและให้ขนาดจุดสเปกเกิลที่ละเอียดกว่าเมื่อเทียบกับเลเซอร์สีแดง (632.8 nm) ภายใต้ระยะทางอุปติงที่เท่ากัน ตัวเลเซอร์ติดตั้งอยู่บนชุดยึดที่มีการระบายความร้อนเพื่อป้องกันการเบี่ยงเบนของความยาวคลื่น (Wavelength Drift) จากความร้อนลำแสงเลเซอร์ จากนั้น พุ่งตรงเข้ากระทบแผ่นกระจกฝ้า (Ground Glass) ชนิดสุ่ม แผ่นกระจกฝ้าถูกยึดติดกับฐานแบบปรับองศา เพื่อ

ขยับตำแหน่งเชิงมุมของกระจกฝ้า หลังจากการบันทึกภาพในแต่ละเฟรม เพื่อให้มั่นใจว่า ลวดลายสเปกเกิลในแต่ละเฟรมมีความเป็นอิสระต่อกันโดยสมบูรณ์ (Statistically Independent) แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนผังการจัดวางอุปกรณ์ระบบภาพผีแบบคลาสสิก (Classical Ghost Imaging)

2. การออกแบบเส้นทางแสงและความเท่ากันของระยะทาง (Equidistant Optical Paths)

ลำแสงสเปกเกิลที่เกิดขึ้นจะพุ่งเข้าสู่คิวบ์ตัวแยกลำแสง (Beam Splitter Cube: BS) ขนาด 50.0 mm ซึ่งแบ่งกำลังแสงออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กันคือ 50% ทะลุผ่าน และ 50% สะท้อนฉากกลายเป็นสองเส้นทาง:

2.1 Reference Path (เส้นทางอ้างอิง) ลำแสงพุ่งจาก BS วิ่งตรงเข้าสู่เซนเซอร์ของกล้องตัวที่ 1 (Camera 1: High-Resolution Monochrome Camera) โดยไม่มีวัตถุใด ๆ กัน ข้อมูลภาพนี้คือ $R(x, y)$

2.2 Object Path (เส้นทางวัตถุ) ลำแสงพุ่งจาก BS ผ่านวัตถุเป้าหมาย (Target Object) แสงที่ทะลุผ่านรูฉลุของวัตถุจะแผ่ออกและถูกเก็บรวบรวมโดยกล้องตัวที่ 2 (Camera 2) ซึ่งในระบบซอฟต์แวร์จะตัดความสามารถเชิงพื้นที่ออกไป

เงื่อนไขวิกฤต (Critical Condition): เพื่อให้ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ทำงานได้อย่างถูกต้อง ระยะทางเชิงทัศนศาสตร์จากจุดกึ่งกลางของ BS ถึงผิวเซนเซอร์ของ Camera 1 (d_{REF}) และระยะทางจากจุดกึ่งกลางของ BS ผ่านวัตถุเป้าหมายถึงผิวเซนเซอร์ของ Camera 2 (d_{OBJ}) ต้องมีความยาวเท่ากันอย่างสิ้นเชิง โดยในการทดลองนี้กำหนดไว้ที่ 15.0 cm โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 0.5 mm หากระยะทางนี้ไม่เท่ากัน ลวดลายสเปกเกิลที่ตกกระทบบนกล้องทั้งสองจะไม่สอดคล้องกัน ส่งผลให้สัญญาณภาพฝัจมหายไปในสัญญาณรบกวน

3. การเตรียมวัตถุเป้าหมาย (Target Object Preparation)

วัตถุเป้าหมายถูกสร้างขึ้น โดยใช้แผ่นฟอยล์อลูมิเนียมความหนา 0.1 mm นำมาแปะบนโครงกระจกสไลด์และฉลุแผ่นฟอยล์ออกเป็นรูปตัวอักษร "F" มีความสูงของตัวอักษรเท่ากับ 15 mm และความกว้างของลายเส้นเท่ากับ 2.5 mm บริเวณที่เป็นฟอยล์อลูมิเนียมจะมีค่าการส่องผ่านแสง $T = 0$ (ทึบแสงโดยสมบูรณ์) และบริเวณที่ถูกฉลุออกจะมีค่าการส่องผ่านแสง $T = 1$ (โปร่งแสง) การเลือกใช้รูปทรงตัว "F" มีข้อดี คือ เป็นรูปทรงที่ไม่มีความสมมาตรทั้งในแนวตั้งและแนวนอน ทำให้สามารถตรวจสอบได้ง่ายว่าภาพที่กู้คืนมาได้เกิดการกลับด้าน (Inversion) หรือการบิดเบี้ยว

4. ระบบการบันทึกข้อมูลและอัลกอริทึมซอฟต์แวร์ (Data Acquisition and Software Algorithm)

4.1 การควบคุมกล้องและการประสานเวลา (Camera Synchronization)

กล้องทั้งสองตัวที่ใช้ในการทดลองเป็นกล้องประเภทอุตสาหกรรม (Industrial CMOS Sensor) ยี่ห้อ Basler โดยมีความละเอียดพิกเซลสูงสุด 1920×1200 พิกเซล เพื่อควบคุมให้กล้องทั้งสองตัวถ่ายภาพในจังหวะเวลาเดียวกัน (Microsecond Synchronization) ระบบใช้การกระตุ้นสัญญาณด้วยซอฟต์แวร์ไพลอน (pylon software) ของกล้อง Basler (Software Trigger) โดยส่งสัญญาณพัลส์จากคอมพิวเตอร์เข้าสู่พอร์ตกล้องทั้งสองพร้อมกัน ในการตั้งค่ากล้อง Gain (อัตราขยายสัญญาณ) ตั้งไว้ที่ระดับต่ำสุด (0

dB) เพื่อลดสัญญาณรบกวนความรื้อน (Dark Current Noise) Exposure Time (เวลาเปิดรับแสง) ตั้งไว้ที่ 10 ms ซึ่งจะเหมาะสมกับความเข้มแสงของเลเซอร์ 405 nm และป้องกันไม่ให้เกิดการอิ่มตัว (Saturation) Format บันทึกภาพในรูปแบบเกรย์สเกล 8 บิต (0 - 255)

4.2 สถาปัตยกรรมการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ (Computational Architecture)

ข้อมูลชุดภาพที่บันทึกได้จะถูกส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผลผ่านภาษา Python โดยมีขั้นตอนการทำงานของสคริปต์ประมวลผลดังต่อไปนี้

4.2.1 การอ่านข้อมูลและเตรียมพื้นที่หน่วยความจำ โหลดชุดภาพจาก Camera 1 และ Camera 2 เข้าสู่หน่วยความจำในรูปแบบของอาร์เรย์สามมิติ (3D NumPy Array) ขนาด $(N, \text{Height}, \text{Width})$

4.2.2 การจำลองเครื่องตรวจจับถังน้ำ (Bucket Detector Simulation) สำหรับภาพจาก Camera 2 ในเฟรมที่ i ระบบจะทำการยุบรวมข้อมูลพิกเซลทั้งหมดเชิงคณิตศาสตร์ผ่านฟังก์ชันการหาผลรวม

$$B(i) = \sum_{y=1}^{\text{Height}} \sum_{x=1}^{\text{Width}} I_{\text{Cam2}}(x, y, i)$$

(6)

กระบวนการนี้ทำให้กล่องตัวที่ 2 สูญเสียความละเอียดเชิงพื้นที่ไปโดยสิ้นเชิง เหลือเพียงอาร์เรย์หนึ่งมิติของค่าความเข้มรวม $[B(1), B(2), \dots, B(N)]$

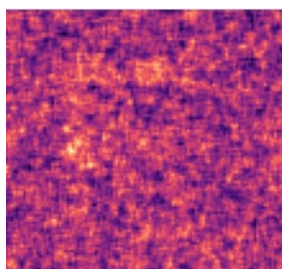
4.2.3 การคำนวณค่าเฉลี่ย คำนวณหาภาพเฉลี่ยของฝั่งอ้างอิง $\langle R(x, y) \rangle$ และค่าเฉลี่ยของฝั่งวัตถุ $\langle B \rangle$

4.2.4 การประมวลผลเมทริกซ์สหสัมพันธ์: วนลูปตามจำนวนเฟรม N เพื่อหาผลคูณไขว้และสะสมค่าลงในเมทริกซ์ผลลัพธ์

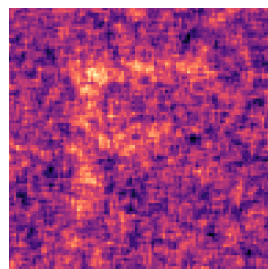
สรุปผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์ลักษณะของภาพที่กู้คืนมาได้

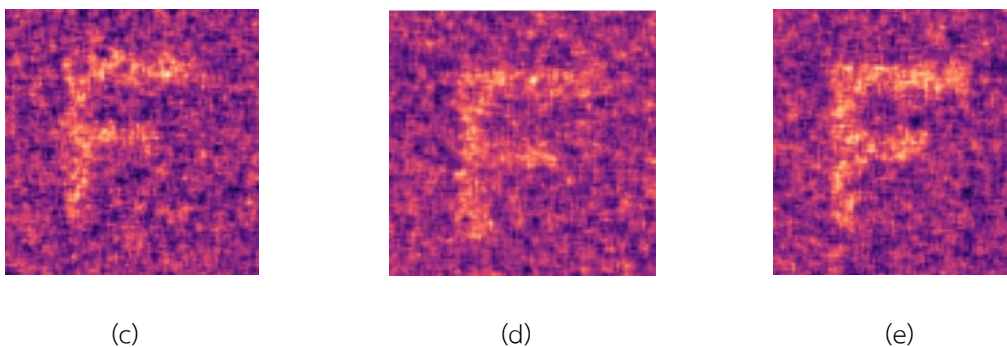
หลังจากการรันอัลกอริทึมกับชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง ระบบสามารถกู้คืนภาพตัวอักษร "F" ขึ้นมาได้อย่างชัดเจนบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ทั้ง ๆ ที่กล่องตัวที่ 1 ไม่เคยสัมผัสกับตัวอักษร "F" เลย และกล่องตัวที่ 2 ก็ถูกแปลงให้เป็นเซนเซอร์พิกเซลเดี่ยว ภาพที่ปรากฏขึ้นมาแสดงให้เห็นถึงขอบเขตที่ถูกต้องของตัวอักษร อย่างไรก็ตาม พื้นหลังของภาพไม่ได้เป็นสีดำสนิท แต่มีลักษณะเป็นสัญญาณรบกวนคล้ายเม็ดทราย (Background Fluctuations) ซึ่งเป็นพฤติกรรมธรรมชาติของระบบภาพบีบอัดแบบคลาสสิกที่เกิดจากขีดจำกัดของความถี่ในสเปกเกิล



(a)



(b)



ภาพที่ 2 ผลการกู้คืนภาพตัวอักษร "F" ด้วยระบบภาพผีแบบคลาสสิก (a)-(e) ที่จำนวนเฟรม
N = 100, 200, 400, 800, 1200 เฟรม ตามลำดับ

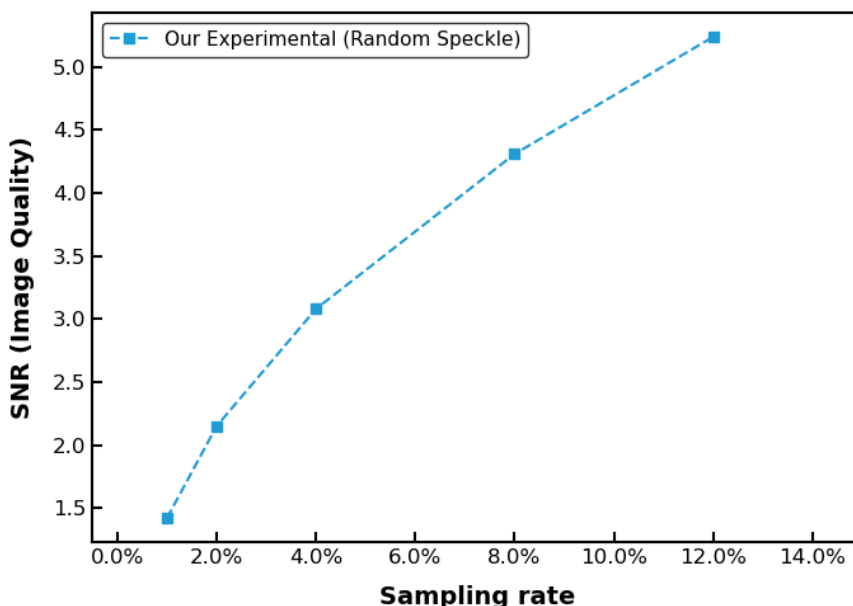
พื้นหลังสีเข้มแสดงบริเวณโปร่งใสที่แสงสามารถส่งผ่านได้ (transparent region) ในขณะที่บริเวณสีเหลือง-ส้มแสดงตำแหน่งของตัวอักษร "F" ซึ่งทำจากแผ่นอะลูมิเนียมทึบแสง (opaque aluminum foil) ที่ทำหน้าที่เป็นวัตถุในการทดลอง โดยค่าความเข้มของแต่ละพิกเซลในภาพที่สร้างขึ้นแปรผันตรงกับค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์อันดับสอง (second-order correlation function) ระหว่างรูปแบบสเปกเคิล (speckle patterns) ที่ฉายไปยังวัตถุและสัญญาณที่ตรวจวัดจากตัวตรวจจับแบบบั๊กเก็ต (bucket detector) ผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่า คุณภาพของภาพที่สร้างขึ้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนเฟรมที่ใช้ในการประมวลผล กล่าวคือ เมื่อจำนวนเฟรมเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio: SNR) จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้โครงสร้างของตัวอักษรปรากฏชัดเจนขึ้น ขอบวัตถุมีความคมชัดมากขึ้น และสัญญาณรบกวนพื้นหลังลดลงอย่างเห็นได้ชัด ความสัมพันธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการเชิงทฤษฎีของ Classical Ghost Imaging ซึ่งระบุว่า SNR มีแนวโน้มแปรผันตามรากที่สองของจำนวนเฟรม เนื่องจากการเพิ่มจำนวนการวัดช่วยลดผลของความผันผวนแบบสุ่มของรูปแบบสเปกเคิลผ่านกระบวนการเฉลี่ยเชิงสถิติ (Statistical Averaging) เมื่อใช้จำนวนเฟรมต่ำ เช่น 100–200 เฟรม ภาพที่สร้างขึ้นยังคงมีสัญญาณรบกวนในระดับสูง ส่งผลให้การแยกแยะรูปร่างของตัวอักษรทำได้ยาก อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มจำนวนเฟรมเป็น 400–800 เฟรม โครงสร้างของวัตถุเริ่มมีความต่อเนื่องและสามารถระบุรายละเอียดได้อย่างชัดเจน ขณะที่การใช้ 1,200 เฟรมให้ภาพที่มีคุณภาพดีที่สุด โดยมีค่า SNR สูงสุด และสัญญาณรบกวนต่ำที่สุดในชุดการทดลอง

2. การแปรผันจำนวนเฟรมข้อมูลต่อคุณภาพของภาพ

เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงปริมาณ งานวิจัยนี้ได้ทดลองแปรผันจำนวนเฟรมที่ใช้ในการคำนวณ (N) ตั้งแต่ 100 เฟรม ไปจนถึง 1,200 เฟรม และทำการวัดค่า อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio: SNR) ของภาพที่ได้ โดยกำหนดสูตรคำนวณ SNR ดังนี้:

$$SNR = \frac{\langle I_{\text{signal}} \rangle - \langle I_{\text{background}} \rangle}{\sigma_{\text{background}}} \quad (7)$$

โดยที่ $\langle I_{\text{signal}} \rangle$ คือ ค่าความสว่างเฉลี่ยในบริเวณที่เป็นตัวอักษร "F", $\langle I_{\text{background}} \rangle$ คือ ค่าความสว่างเฉลี่ยในบริเวณพื้นหลัง และ $\sigma_{\text{background}}$ คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นหลัง (ซึ่งแสดงถึงปริมาณ Noise) แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling rate) กับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของภาพที่ได้จากการทดลอง โดยใช้ลวดลายแสงสุ่มแบบสเปกเกิลคลาสสิก (Random Speckle) ณ ช่วงการสุ่มระดับต่ำ (1.0%–12.0%)

จากกราฟ พบว่า ค่า Signal-to-Noise Ratio (SNR) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อจำนวนเฟรม (Number of Frames, N) เพิ่มขึ้น โดย SNR เพิ่มขึ้นจาก 1.42 เมื่อใช้ 100 เฟรม เป็น 5.24 เมื่อใช้ 1,200 เฟรม แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มจำนวนเฟรมช่วยปรับปรุงคุณภาพของภาพที่สร้างขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นของ SNR เกิดจากการที่ระบบมีข้อมูลการวัด (measurements) มากขึ้น ทำให้การสุ่มของสเปกเคิล (Random Speckle Fluctuations) และสัญญาณรบกวนเฉลี่ยลดลงในกระบวนการสร้างภาพ ส่งผลให้สัญญาณของวัตถุเด่นชัดขึ้น เมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวน ดังนั้น การเพิ่มจำนวนเฟรมจึงช่วยเพิ่มความแม่นยำในการสร้างภาพและปรับปรุงความสามารถในการตรวจจับรายละเอียดของวัตถุ อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มของ SNR มีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนเฟรมมีค่ามากขึ้น (Diminishing Returns) กล่าวคือ แม้ว่า การเพิ่มเฟรมจาก 100 เป็น 400 จะช่วยเพิ่ม SNR ได้อย่างชัดเจน แต่การเพิ่มจาก 800 เป็น 1,200 เฟรม ให้การปรับปรุงที่น้อยลง เมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการประมวลผลที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น การเลือกจำนวนเฟรมที่เหมาะสมจึงเป็นการ (Trade-off) ระหว่างคุณภาพของภาพและประสิทธิภาพของระบบ

ตารางที่ 1

ผลกระทบของจำนวนเฟรมข้อมูลต่อค่า SNR และความคมชัดของภาพ

การทดลอง ที่	จำนวนเฟรม (N)	ค่า SNR ที่วัด ได้	ระยะเวลา ประมวลผล (วินาที)	คุณภาพทัศนศาสตร์ของภาพ
1	100	1.42	0.12	ภาพเบลอมาก มีสัญญาณรบกวนหนาแน่น แทบไม่เห็นรูปทรง
2	200	2.15	0.25	เริ่มเห็นเค้าโครงรูปตัว F สัญญาณรบกวนยังสูง
3	400	3.08	0.48	รูปทรงตัว F ชัดเจน สามารถแยกแยะขอบเขตได้
4	800	4.31	0.95	ภาพมีความคมชัดสูง สัญญาณรบกวนลดลงอย่างมาก
5	1200	5.24	1.41	ภาพคมชัดที่สุด ขอบของตัวอักษรเรียบและเด่นชัด

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 2 เมื่อนำค่า SNR มาพล็อตเทียบกับจำนวนเฟรม N พบว่า กราฟมีลักษณะโค้งเข้าตามฟังก์ชันรากที่สอง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีทางสถิติที่ระบุว่า $SNR \propto \sqrt{N}$ หมายความว่า การเพิ่มจำนวนเฟรมขึ้น 4 เท่า จะส่งผลให้ภาพมีความคมชัดขึ้นประมาณ 2 เท่า การทดลองนี้พิสูจน์ให้เห็นว่า หากต้องการภาพที่มีคุณภาพสูง เพื่อการนำไปใช้งานจริง ควรใช้จำนวน

เฟรมไม่ต่ำกว่า 800 เฟรมขึ้นไป ผลการทดลองสามารถยืนยันหลักการทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันสหสัมพันธ์อันดับสองได้ โดยระบบสามารถสร้างภาพวัตถุเป้าหมายตัวอักษร "F" ขึ้นมาใหม่ได้จากเครื่องตรวจจับที่ไม่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ ซึ่งคุณภาพความคมชัดของภาพแปรผันตรงกับค่า $SNR \propto \sqrt{N}$

เอกสารอ้างอิง

- Bromberg, Y., Katz, O., & Silberberg, Y. (2009). Ghost imaging with a single detector. *Physical Review A*, 79(5), Article 053840.
- Katz, O., Bromberg, Y., & Silberberg, Y. (2009). Compressive ghost imaging. *Applied Physics Letters*, 95(13), Article 131110.
- Pittman, T. B., Shih, Y. H., Strekalov, D. V., & Sergienko, A. V. (1995). Optical imaging by means of two-photon entanglement. *Physical Review A*, 52(5), Article R3429.
- Shapiro, J. H. (2008). Computational ghost imaging. *Physical Review A*, 78(6), Article 061802.
- Zhang, D., Zu, Y. X., Wang, J. H., & Al., E. (2024). High-resolution classical ghost imaging through atmospheric turbulence. *Journal of Optics*, 26(2), Article 025401.