

การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมบนผิวหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ของบริษัทกรณีศึกษาด้วย เทคนิคการประมวลผลภาพ

THE CONTAMINATION DETECTION ON AIR BEARING SURFACE OF CASE STUDY COMPANY BY MACHINE VISION TECHNIQUE

ปัญญา สำราญหันต์^{1*} ณภพ ชัยสุวรรณ² และประจักษ์ พรหมงาม³

Panya Samranhan^{1*} Napop Saisuwan² and Prachak Promngam⁵

^{1, 2} คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

* Corresponding author E-mail : panya.su@bsru.ac.th

Received : 19 February 2021

Revised : 05 June 2021

Accepted : 15 June 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาการตรวจสอบอัตโนมัติสำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมบนผิวหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ด้วยเทคนิคการประมวลผลจากภาพถ่ายของบริษัทกรณีศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือส่วนแรกเริ่มจากการศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณลักษณะของภาพถ่ายสำหรับเป็นภาพต้นแบบ ส่วนที่สองเป็นการพัฒนาขั้นตอนการตรวจสอบบนผิวหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ด้วยโปรแกรมการประมวลผลจากภาพถ่าย และส่วนสุดท้ายเป็นการประเมินประสิทธิภาพระบบการวัดระหว่างระบบการประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับ การตรวจสอบผลของพนักงานที่เชี่ยวชาญ ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์มีลักษณะคุณภาพ 2 ลักษณะ จำนวน 300 ตัวอย่างได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่มีระดับตามเกณฑ์มาตรฐาน 150 ตัวอย่าง และระดับที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน 150 ตัวอย่าง ผลจากการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพการตรวจสอบด้วยพนักงานมีความแม่นยำ ร้อยละ 98 และการประมวลผลภาพมีความแม่นยำ ร้อยละ 89 และเมื่อนำผลการตรวจสอบของพนักงานและเครื่องจักรมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน มีผลการตรวจสอบได้ตรงตามมาตรฐานที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และในงานวิจัยครั้งนี้ยังพบว่าคุณสมบัติ Kappa ของพนักงานและการประมวลผลภาพเท่ากับ 0.83 กล่าวได้ว่าผลการตรวจสอบของพนักงานและการประมวลผลภาพมีความสอดคล้องกันมาก นอกจากนั้นความสามารถของผลการตรวจสอบจากการประมวลผลภาพในการแยกชิ้นงานเสียออกจากชิ้นงานดี พบว่าคุณสมบัติ Kappa มีค่าเท่ากับ 0.75 สรุปได้ว่าผลการตรวจสอบด้วยการประมวลผลภาพของงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับมาตรฐานในระดับดีมาก

คำสำคัญ: การตรวจจับสิ่งแปลกปลอม/ หน้าหัวอ่านฮาร์ดดิสก์/ เทคนิคการประมวลผลจากภาพถ่าย

ABSTRACT

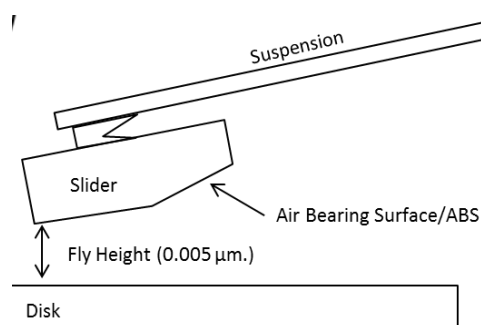
The objective of this research was to study and development of auto inspection for contamination detection on the air bearing surface by machine vision technique a sample company. This research was divided into three parts. The first part started from the study of how to improve the image characteristics for the prototype. The second part was to the development of air bearing surface inspection step with machine vision software. Finally, it was to measurement system

performance evaluation between the machine vision system compare with expert inspection. The products quality image had two characteristics, from 300 examples can be subdivided into 150 examples in standard level and 150 examples in defective. The results showed that the efficiency of the inspector was 98 % accurate and machine vision was 89 % accurate, results from inspector and machine vision were compared with standard values. There are inspection results in standards with 0.05 significance. Moreover, in this research, the Kappa coefficient of inspector and machine vision was 0.83, It can be said that the results of an inspection by the inspector and the machine vision are very consistent. In addition, the ability of the inspection results from machine vision to separate the defective part from the good part was found that the Kappa coefficient is 0.75. It can be concluded that the machine vision inspection results of this research consistency with the standard at a very well level.

Keywords: Contamination Detection/ Air Bearing Surface/ Machine Vision Technique

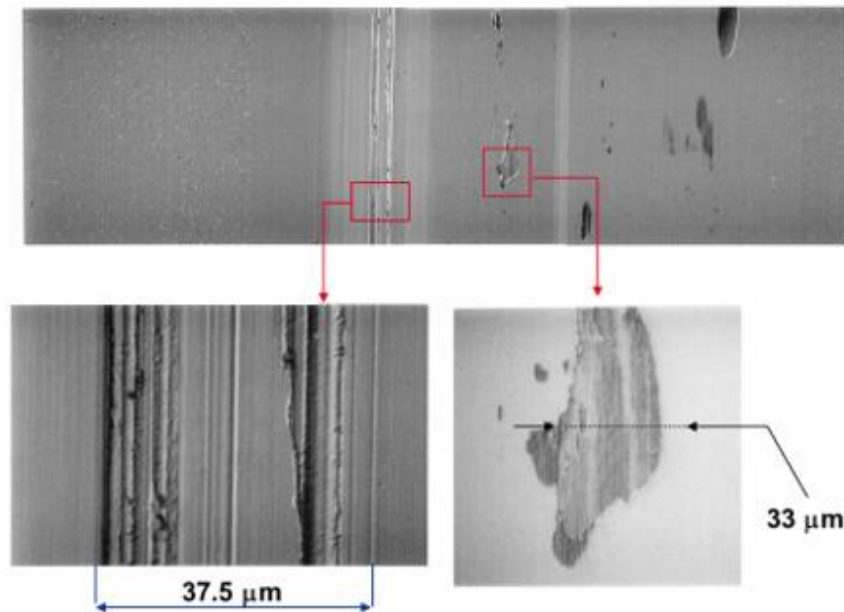
1. บทนำ

การควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นอุตสาหกรรมที่ต้องการควบคุมในเรื่องความสะอาด ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่จะเข้ามาสัมผัสกับชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก ซึ่งสิ่งแปลกปลอมเหล่านั้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ที่ผลิตต่ำลง สิ่งแปลกปลอมเหล่านั้นจะส่งผลความเสียหายต่อหน้าที่หลักของสินค้าอย่างมากถ้าเป็นสินค้าประเภทฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากตามหลักการทำงานที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ คือการอ่านและเขียนข้อมูลจากหัวอ่านลงบนแผ่นดิสก์ ด้วยหัวอ่าน Slider หรือเรียกอีกอย่างว่า Air Bearing Surface (ABS) [1] ซึ่งเป็นชิ้นส่วน magnetic มีหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าเพื่อเขียนและอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ แต่ต้องยกตัวสูงอยู่บนแผ่นดิสก์ประมาณ 5 nm. เพื่อให้อ่านและเขียนได้เร็วขึ้น และเพื่อควบคุมการยกตัวของหัว Slider จึงมีการออกแบบร่องที่ด้านหน้าของหัวอ่าน(Air Bearing Surface; ABS) เพื่อให้หัวอ่านเกิดการยกตัวขณะทำการอ่านหรือเขียนข้อมูล ที่เรียกว่า Fly Height และสิ่งสำคัญของระดับ Fly Height คือถ้าหากมีระดับ Fly Height ที่ต่ำจะทำให้ฮาร์ดดิสก์มีความสามารถในการอ่านที่เร็วขึ้น [2] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กลไกการทำงานระหว่าง ABS และ Disk

จากรูปที่ 1 ระยะของการยกตัวระหว่าง Slider และ disk ที่ลดลงมีข้อดีที่จะช่วยให้การอ่านข้อมูลได้รวดเร็วขึ้น แต่ก็มีความเสี่ยงต่อความเสียหายประเภทรอยขีดข่วนของหน้าของหัวอ่านและแผ่นดิสก์ ถ้าหากมีเศษหรือสิ่งแปลกปลอม(Contamination) มาแทรกระหว่างหน้าสัมผัสของหัวอ่านและแผ่นดิสก์ และจะส่งผลกระทบต่อความเสียหายของข้อมูลในที่สุด ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2 ต่อไปนี้



รูปที่ 2 ความเสียหายที่เกิดจากการเสียดสีบนแผ่นดิสก์

ลักษณะของสิ่งแปลกปลอมหรือ Contamination เกิดมาจากเศษวัสดุมีแหล่งที่มาจากสภาพแวดล้อมทั้งภายนอก และภายในกระบวนการผลิต ในปัจจุบันบริษัทตัวอย่างมีการควบคุมคุณภาพด้วยการมุ่งเน้นในการควบคุมสิ่งแปลกปลอม เช่นการตรวจสอบชิ้นงานด้วยพนักงานทั้งก่อนเข้ากระบวนการ และการตรวจสอบสินค้าสำเร็จรูป ซึ่งการตรวจสอบชิ้นส่วนในฮาร์ดดิสก์ เป็นชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กมากจึงต้องใช้กล้องขยายขนาด 20 เท่า กรณีตรวจสอบแบบหยาบ และกรณีตรวจสอบแบบละเอียดใช้กล้องกำลังขยายขนาด 200 เท่าในการตรวจสอบ

ถึงแม้ว่าระดับการควบคุมสิ่งแปลกปลอมในปัจจุบันด้วยพนักงาน มีข้อดีที่มีความยืดหยุ่นสามารถตัดสินใจได้หลายลักษณะ แต่ก็จะมีข้อจำกัดด้านเวลาและความต่อเนื่องในการทำงาน[3] อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนอกเหนือจากการตรวจสอบคุณภาพด้วยพนักงานแล้ว บริษัทมีแผนปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เป็นแบบอัตโนมัติ แต่เนื่องจากการตรวจสอบคุณภาพในกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติไม่สามารถตรวจสอบคุณภาพด้วยพนักงานได้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจสอบคุณภาพจากภาพถ่าย เข้ามาช่วยพนักงานตรวจสอบจึงเป็นที่มาของการพัฒนาการตรวจสอบแบบอัตโนมัติในครั้งนี้ โดยจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบด้วยการประมวลผลภาพมีเทคนิคที่นิยมอยู่ 2 รูปแบบ คือการเรียนรู้เชิงลึกของเครื่องจักรและการจดจำและเปรียบเทียบกับภาพต้นแบบ แต่ละเทคนิคในการประมวลผลภาพมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และความพร้อมของข้อมูล และอุปกรณ์ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้เทคนิคการเปรียบเทียบกับภาพต้นแบบ เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของจำนวนข้อมูล จึงไม่เหมาะที่จะใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกที่ต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากในการจดจำและทดสอบด้วยฮาร์ดแวร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะพัฒนารูปแบบการตรวจสอบด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพในการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมเพื่อหาคำตอบจากคำถามงานวิจัยที่ว่า

1. เครื่องตรวจสอบคุณภาพอัตโนมัติมีความสามารถในการตรวจสอบที่แตกต่างจากพนักงานอย่างไร
2. เครื่องตรวจสอบคุณภาพอัตโนมัติมีความสามารถในการตรวจสอบที่แตกต่างจากมาตรฐานอย่างไร

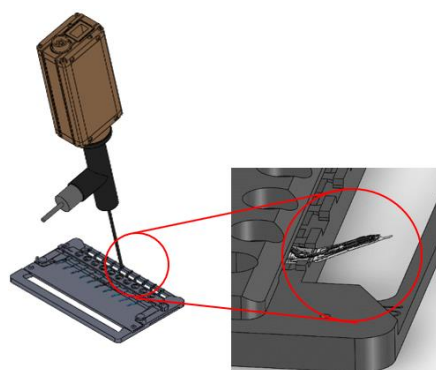
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาขั้นตอนการตรวจสอบชิ้นงานด้วยโปรแกรมการประมวลผลจากภาพถ่าย และประเมินประสิทธิภาพระบบการวัดระหว่างการประมวลผลจากภาพถ่ายกับการตรวจสอบของพนักงาน และเปรียบเทียบกับระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์

3. การดำเนินการวิจัย

3.1 ที่มาของภาพถ่าย

ภาพถ่ายมาจากกล้องถ่ายภาพ รีโซลูชัน เท่ากับ $0.84\ \mu\text{m}$. แบบแสงช่วยสีขาว โดยกล้องถ่ายภาพจะถูกติดตั้งบนระบบการทำงานจริงแสดงดังรูปที่ 3 และถ่ายภาพในขณะที่หัวอ่านฮาร์ดดิสก์มีการเคลื่อนที่เสมือนเป็นการทำงานจริง การถ่ายภาพจะเป็นแบบอัตโนมัติควบคุมด้วยเซนเซอร์ในการตรวจจับเมื่อชิ้นงานเลื่อนเข้ามาในตำแหน่งที่กำหนด ชิ้นงานจะหยุดชั่วขณะเพื่อให้กล้องสามารถจับภาพได้ ภาพมีขนาดเท่ากับ $2,464 \times 2,056$ พิกเซล มีขนาดความจุ 4.83 MB โดยจะบันทึกภาพลงใน Server ในรูปแบบนามสกุลชื่อ .bmp มีระบบสำรองข้อมูลที่แยกประเภทของภาพไว้ในแฟ้มข้อมูล จำนวน 2 Folder ชื่อ GOOD (ของดี) และ Defect (ของเสีย) และให้ผู้เชี่ยวชาญทำการทวนสอบความถูกต้องของภาพทั้งหมดด้วยการตรวจสอบผ่านกล้องกำลังขยาย 200X ซึ่งโครงสร้างระบบการถ่ายภาพมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 ตำแหน่งการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่าง

การปรับลักษณะภาพ และการลดขนาดพื้นที่สำหรับการตรวจสอบเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการประมวลผล ด้วยโปรแกรมตกแต่งภาพถ่าย ใช้คอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i7-3537U CPU @ 2.00GHz RAM 8.00 GB ,64-bit และทำการปรับลดขนาดภาพจากขนาด $2,464 \times 2,056$ พิกเซล คงเหลือ $1,000 \times 1,000$ พิกเซล มีขนาดความจุที่ลดลงจาก 4.83 MB คงเหลือ 977 KB

3.2 จำนวนภาพชิ้นงาน

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้คัดเลือกภาพโดยผู้เชี่ยวชาญที่ได้รับการฝึกอบรมและผ่านการทดสอบให้เป็นบุคคลต้นแบบในการตัดสินใจแยกสินค้าดีและเสียของบริษัทกรณีศึกษา เพื่อนำภาพมาวิเคราะห์ ดังนี้

3.2.1 ภาพต้นแบบเพื่อใช้ศึกษาองค์ประกอบ และคุณภาพสมบัติต่าง ๆ ของภาพ เพื่อใช้กำหนดเงื่อนไขการทำงานของโปรแกรม โดยใช้ภาพที่มีลักษณะของดี และของเสีย จำนวนอย่างละ 1 ภาพ

3.2.2 ภาพตัวอย่างสำหรับทดสอบและประเมินประสิทธิภาพ จำนวน 300 ภาพ คือภาพสินค้าดี 150 ภาพ และสินค้าเสียจำนวน 150 ภาพ โดยภาพที่เป็นสินค้าเสียจะแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ รูปแบบละ 50 ภาพ ที่มีคุณลักษณะของภาพดังนี้ มีสิ่งแปลกปลอมขนาดใหญ่และมีสีเข้มบนพื้นผิวที่มองเห็นได้ชัดเจน, มีสิ่งแปลกปลอม ขนาด

<http://jeet.siamtechu.net>

เล็ก มีสีอ่อนบนพื้นผิวที่มองเห็นได้ชัดเจน และมีสิ่งแปลกปลอม ที่อยู่บนขอบรอยต่อซึ่งมองเห็นได้ไม่ชัดเจน ซึ่งงานวิจัยของ [4] ใช้ขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมจำนวน 200 ภาพ ในการเปรียบเทียบวิธีการประมวลผลภาพ และได้ผลดีมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบโดยเฉลี่ยร้อยละ 96.5 ถึง 100

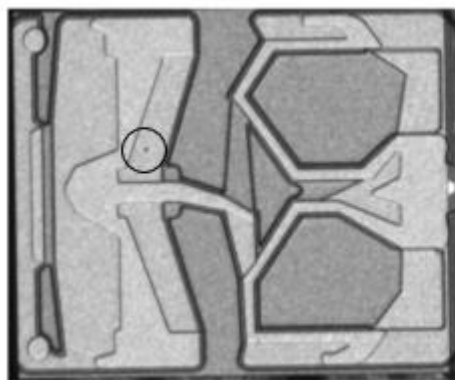
3.3 การเปรียบเทียบรูปแบบคุณลักษณะของภาพ

ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบตำแหน่งของสิ่งแปลกปลอมด้วยสายตาในเบื้องต้นเพื่อเตรียมภาพของเสียหลังจากการปรับคุณลักษณะของภาพ และนำไปให้เครื่องจักรแยกประเภทต่อไป โดยภาพตัวอย่างจะถูกปรับระดับสีเป็นแบบ Gray Scale จำนวน 12 รูปแบบ รูปแบบละ 150 ภาพ และคำนวณประสิทธิภาพความสามารถในการระบุตำแหน่งสิ่งแปลกปลอมของทั้ง 12 รูปแบบที่ได้ ต้องตรงกับภาพต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งหลังจากปรับลักษณะโครงสร้างของภาพ ด้วยวิธีต่าง ๆ จำนวน 12 วิธี พบว่าวิธีการกัดกร่อนภาพ (Erode) แบบพื้นขาว ขอบดำ มีความสามารถในการระบุรอยตำหนิได้จำนวน 143 ภาพ จากภาพต้นแบบจำนวน 150 ภาพ ซึ่งถูกต้องมากที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีปรับลักษณะรูปร่างหรือโครงสร้างของภาพด้วยวิธีอื่น สามารถหาประสิทธิภาพการตรวจจับรอยตำหนิได้ตั้งสมการที่ 1 และมีผลแต่ละวิธีดังตารางที่ 1 ต่อไปนี้

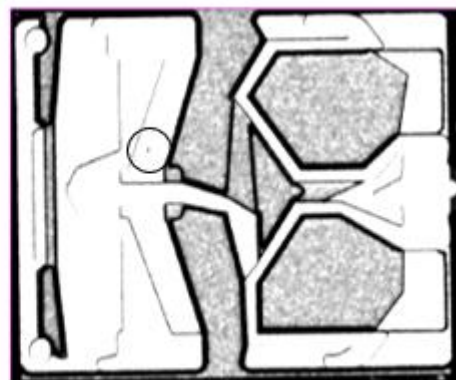
$$\text{ประสิทธิภาพการตรวจจับรอยตำหนิ} = \frac{\text{จำนวนรอยตำหนิที่ระบุถูกต้อง}}{\text{จำนวนภาพต้นแบบ}} \times 100 \quad (1)$$

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการตรวจจับรอยตำหนิ

ลักษณะรูปร่างหรือโครงสร้างของภาพ	ประสิทธิภาพการตรวจจับรอยตำหนิ (ร้อยละ)	
	พื้นขาว ขอบดำ	พื้นดำ ขอบขาว
การขยายภาพ (Dilate)	70.00	68.00
การกัดกร่อนภาพ (Erode)	95.33	90.67
โอเพอเรชันการ Close	84.00	82.00
โอเพอเรชันการ Open	89.33	87.33
Auto Median	85.33	85.33
ไม่กำหนดรูปแบบของภาพ	88.00	87.33



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ตัวอย่างการตรวจสอบประสิทธิภาพการบ่งชี้ตำแหน่งรอยตำหนิของภาพพื้นขาว ขอบดำ

จากรูปที่ 4 เป็นตัวอย่างการปรับลักษณะรูปร่างหรือโครงสร้างของภาพด้วยวิธีการกัดกร่อนภาพ (Erode) แบบพื้นขาว ขอบดำ (ก) ตำแหน่งรอยตำหนิจากการปรับคุณลักษณะของภาพ และ (ข) ตำแหน่งรอยตำหนิจากภาพต้นแบบ

4. การออกแบบขั้นตอนการตรวจสอบชิ้นงานด้วยโปรแกรมการตรวจสอบอัตโนมัติ

โครงสร้างของโมเดลการจำแนกและระบุตำแหน่งของภาพชิ้นส่วนที่เป็นของดี และเป็นของเสีย การออกแบบโปรแกรมจะเริ่มต้นจากการนำภาพของเสียต้นแบบมาศึกษาคุณลักษณะของพื้นหลัก และตำแหน่งพื้นผิว โดยเริ่มจากการดึงภาพเข้าสู่โมเดล และปรับคุณลักษณะของภาพด้วยชุดคำสั่งช่วยในการมองเห็น และกำหนดฟังก์ชันในการตัดสินใจจากตำแหน่งของรอยตำหนิที่ตรวจพบว่าเป็นรอยตำหนิตรงตามภาพมาตรฐานหรือไม่ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. Read Image File เป็นขั้นตอนอ่านไฟล์รูปภาพที่ต้องการนำมาใช้เพื่อกำหนดวิธีการตรวจสอบ จากไฟล์ภาพที่เก็บเก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลในเครื่องคอมพิวเตอร์

2. Vision Assistance ทำการวิเคราะห์ภาพและปรับปรุงคุณภาพของภาพ สร้างลำดับของฟังก์ชันการประมวลผลสำหรับการตรวจสอบ เช่นการปรับระดับสี หรือกำหนดตำแหน่งของภาพพื้นหลังและรอบตำหนิในไม่ความเด่นชัดขึ้นสำหรับการประมวลผล มีขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของภาพถ่ายดังต่อไปนี้

2.1 Brightness เป็นการปรับคุณภาพความคมชัดของภาพด้วยการปรับค่า คือความสว่าง คอนทราสต์ และแกมมาของภาพ สามารถพิจารณาผลได้จากภาพ 5(ค)

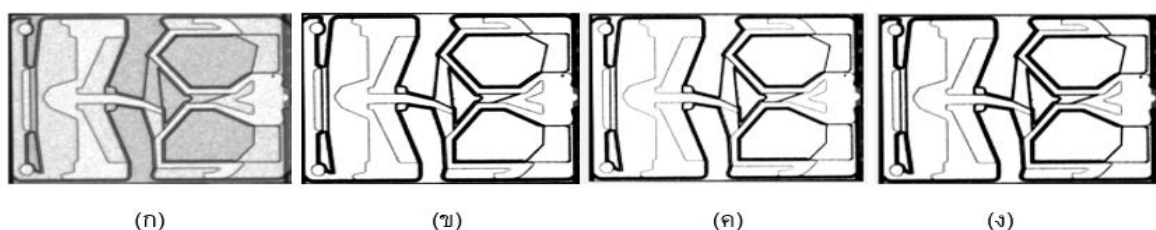
2.1.1 การปรับความสว่างของภาพ โดยความสว่างจะแสดงเป็นระดับสีเทา มีศูนย์กลางอยู่ที่ 128 ค่าที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ภาพมีความสว่างขึ้น(สูงสุดคือ 255) และค่าที่ต่ำกว่าจะทำให้ภาพมืดลง(ลดลงเหลือ 0)

2.1.2 ค่าคอนทราสต์ของภาพแสดงเป็นมุม ค่า 45° ระบุว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงกันข้าม ค่าที่สูงขึ้นจะเพิ่มความเปรียบต่าง(สูงสุด 89°) และค่าที่ต่ำกว่าจะลดความเปรียบต่าง(ลงถึง 1°)

2.1.3 ค่าแกมมาที่ใช้ในการแก้ไขแกมมา ค่าสัมประสิทธิ์แกมมายิ่งสูงการแก้ไขความเข้มก็จะยิ่งมากขึ้น มีค่าตั้งแต่ 0.1-10

2.2 ภายใต้สัณฐานวิทยาสีเทา (Gray Morphology) มีผลต่อโครงสร้างของวัตถุในภาพระดับสีเทา คุณสมบัตินี้ใช้ฟังก์ชันสำหรับงานต่าง ๆ เช่นการขยายหรือลดวัตถุ วัตถุ ปิดอนุภาค หรือการปรับขอบเขตให้เรียบซึ่งเป็นที่คุณดำเนินการเพื่อกำหนดวัตถุและเตรียมภาพสำหรับการกำหนดเกณฑ์และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ซึ่งงานวิจัยครั้งนี้ได้ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ Gray Morphology 5 วิธี ซึ่งพบว่า Erode มีประสิทธิภาพสูงสุด ด้วยหลักการกัดเซาะและลดความสว่างของพิกเซลที่ล้อมรอบด้วยเพื่อนบ้านด้วยความเข้มต่ำกว่าเพื่อให้ระดับสีมีความโดดเด่นมากกว่าพิกเซลใกล้เคียง สามารถพิจารณาเพิ่มเติมได้จากภาพ 5(ง)

โดยในขั้นตอนการทำ Vision Assistance ได้คัดเลือกภาพชิ้นงานเสียสำหรับปรับลักษณะของภาพด้วยการลดสัญญาณรบกวนและคงไว้เพียงขอบเส้น และรอยตำหนิของชิ้นงานเพื่อเป็นการเตรียมภาพก่อนนำไประบุตำแหน่งรอยตำหนิ โดยมีลักษณะของภาพที่ผ่านการปรับปรุงดังต่อไปนี้



รูปที่ 5 การปรับภาพด้วยคำสั่ง Vision Assistance

<http://jeet.siamtechu.net>

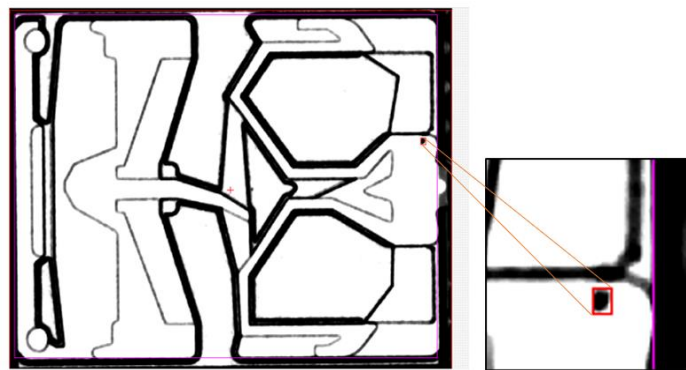
จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงภาพด้วยคำสั่ง Vision Assistance จะช่วยในการลดจำนวนระดับสี และช่วยสร้างความเด่นชัดของพื้นหลังและรอยตำหนิให้แยกจากกันเพื่อช่วยในการประมวลผลภาพของโปรแกรม โดยภาพที่ 5 (ก) และ 5 (ข) เป็นการเปรียบเทียบภาพก่อนและหลังจากปรับปรุง ซึ่งจะพบว่าภาพหลังปรับปรุงมีความคมชัดและมีระดับสีเป็นแบบไบนารีที่จะทำให้การตัดสินใจได้ง่ายขึ้น และภาพที่ 5 (ค) และ 5 (ง) เป็นการเปรียบเทียบภาพจากการปรับปรุง ดังนั้น ภาพ 5 (ค) เป็นการปรับความคมชัดของภาพด้วยการลดสัญญาณรบกวนออกไป และภาพที่ 5 (ง) เป็นการปรับระดับสีแบบไบนารี

4. Defect Objects เป็นขั้นตอนการตรวจจับวัตถุโดยใช้การกำหนดเกณฑ์การวิเคราะห์อนุภาคแบบไบนารีเพื่อค้นหาคุณสมบัติของพื้นที่ที่ตรงกับเกณฑ์เฉพาะในรูปภาพ

4.1 Main การกำหนดบริเวณที่สนใจสำหรับการตรวจสอบโดยอ้างอิงจาก Map Defects

4.2 Threshold การแบ่งภาพออกเป็นพื้นที่อนุภาคซึ่งมีวัตถุที่อยู่ระหว่างการตรวจสอบและขอบเขตพื้นหลังตามความเข้มของพิกเซลภายในภาพไบนารี เพื่อใช้ในการตรวจจับวัตถุที่มีค่าที่กำหนดโดยให้ตรวจจับวัตถุที่เป็นสีเข้ม

4.3 การกำหนดขอบเขตการตรวจสอบ โดยตั้งค่าขนาดพิกเซลต่ำสุด 10 พิกเซล และสูงสุด 500 พิกเซล โดยไม่กำหนดขอบเขตจำนวนวัตถุที่ตรวจพบ



รูปที่ 6 ผลจากการตรวจสอบรอยตำหนิ

จากรูปที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบการแสดงผลจากการตรวจสอบรอยตำหนิของการระบุสถานะจากการตรวจสอบได้ถูกต้องตามตำแหน่งสิ่งแปลกปลอมบนชิ้นงาน ระบบจะระบุว่าเป็นชิ้นงานเสียหรือ Fail ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการแสดงผลสถานะนี้จะมีประโยชน์ในการนำไปใช้ในการสั่งงานชุดอุปกรณ์ควบคุมเพื่อคัดแยกสินค้าที่เป็นของเสียออกจากกระบวนการผลิตซึ่งจะเป็นงานวิจัยในครั้งต่อไป

5. ผลของการวิจัย

ความสามารถของการตรวจสอบคุณภาพด้วยเครื่องจักรและพนักงานในการตรวจสอบซ้ำจำนวน 3 รอบของชิ้นงานตัวอย่างเดิมที่เป็นชิ้นงานดี จำนวน 150 ภาพ และชิ้นงานเสีย จำนวน 150 ภาพ และสุ่มตัวอย่างแบบอิสระเพื่อไม่ให้พนักงานหรือเครื่องจักรสามารถตัดสินใจจากการจดจำชิ้นงานเดิมได้ รวมการตรวจสอบจำนวน 900 ครั้ง ($150 \times 2 \times 3 = 900$) พบว่าพนักงานตรวจสอบสินค้าจริงที่เป็นของดี โดยตัดสินใจว่าเป็นของดี จำนวน 450 ครั้ง และตัดสินใจว่าเป็นของเสีย จำนวน 0 ครั้ง และตรวจสอบสินค้าจริงที่เป็นของเสีย โดยตัดสินใจว่าเป็นของดี จำนวน 111 ครั้ง แต่ตัดสินใจว่าเป็นของเสีย จำนวน 339 ครั้ง และการตรวจสอบของเครื่องจักรตรวจสอบสินค้าจริงที่เป็นของดี โดย

<http://jeet.siamtechu.net>

ตัดสินใจว่าเป็นของดี จำนวน 450 ครั้ง และตัดสินใจว่าเป็นของเสีย จำนวน 0 ครั้ง และทำการตรวจสอบสินค้าจริงที่เป็นของเสีย โดยตัดสินใจว่าเป็นของดี จำนวน 33 ครั้ง แต่ตัดสินใจว่าเป็นของเสีย จำนวน 417 ครั้ง ซึ่งสาเหตุที่พนักงานตัดสินใจจากสินค้าจริงที่เป็นของเสีย และตัดสินใจว่าเป็นของดีมากกว่าขนาดของตำหนิมีขนาดเล็ก และมีระดับความเข้มของสีน้อยจึงทำให้ผ่านการสังเกตของพนักงานไปได้ โดยใช้ค่าจากตารางการกระจายจำแนก (Classification distribution table) หรือเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) [4] ดังนี้

ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบชิ้นงานเดิมจำนวน 150 ภาพ ทำซ้ำ 3 ครั้ง ด้วยพนักงาน

		ผลจากการทำนายของโมเดล(ภาพ)	
		ไม่ผ่านมาตรฐาน	ผ่านมาตรฐาน
ผลลัพธ์จริง	ไม่ผ่านมาตรฐาน	339 (TN)	111 (FP)
	ผ่านมาตรฐาน	0 (FN)	450 (TP)

จากตารางที่ 2 สามารถนำข้อมูลผลการตรวจสอบมาประเมินประสิทธิภาพ [5] ได้ดังต่อไปนี้

ค่าความแม่นยำของพนักงาน (Accuracy) กรณีตรวจสอบซ้ำชิ้นงานเดิม

$$\begin{aligned}
 \text{Accuracy} &= \frac{450 + 339}{450 + 111 + 339} \\
 &= 0.88
 \end{aligned} \tag{2}$$

ค่าของโมเดลที่ทำนายได้จากพนักงานที่ถูกตัดจากระดับคุณภาพ (Precision)

$$\begin{aligned}
 \text{Precision} &= \frac{450}{450 + 111} \\
 &= 0.80
 \end{aligned} \tag{3}$$

ค่าของโมเดลที่ทำนายได้ (Recall)

$$\begin{aligned}
 \text{Recall} &= \frac{450}{450 + 0} \\
 &= 1.0
 \end{aligned} \tag{4}$$

ค่าเปรียบเทียบระหว่างค่า Precision และค่า Recall ของแต่ละกลุ่มเป้าหมาย

$$\begin{aligned}
 F1 &= \frac{2 \times (1 \times 0.80)}{(1 + 0.80)} \\
 &= 0.89
 \end{aligned} \tag{5}$$

ตารางที่ 3 ผลการตรวจสอบชิ้นงานเดิมจำนวน 150 ภาพ ทำซ้ำ 3 ครั้ง ด้วยเครื่องจักร

		ผลจากการทำนายของโมเดล(ภาพ)	
		ไม่ผ่านมาตรฐาน	ผ่านมาตรฐาน
ผลลัพธ์จริง	ไม่ผ่านมาตรฐาน	417 (TN)	33 (FP)
	ผ่านมาตรฐาน	0 (FN)	450 (TP)

ค่าความแม่นยำของเครื่องจักร (Accuracy) กรณีตรวจสอบซ้ำชิ้นงานเดิม

$$\begin{aligned} \text{Accuracy} &= \frac{450 + 417}{450 + 33 + 417} \\ &= 0.96 \end{aligned} \quad (6)$$

ค่าของโมเดลที่ทำนายได้จากพนักงานที่ถูกต้องจากระดับคุณภาพ (Precision)

$$\begin{aligned} \text{Precision} &= \frac{450}{450 + 33} \\ &= 0.93 \end{aligned} \quad (7)$$

ค่าของโมเดลที่ทำนายได้ (Recall)

$$\begin{aligned} \text{Recall} &= \frac{450}{450 + 0} \\ &= 1.0 \end{aligned} \quad (8)$$

ค่าเปรียบเทียบระหว่างค่า Precision และค่า Recall ของแต่ละกลุ่มเป้าหมาย

$$\begin{aligned} F1 &= \frac{2 \times (1 \times 0.93)}{(1 + 0.93)} \\ &= 0.96 \end{aligned} \quad (9)$$

จากการตรวจสอบประสิทธิภาพการระบุรอยตำหนิของพนักงานผ่านกล้องขยาย และการตรวจสอบด้วยเครื่องจักรผ่านการประมวลผลภาพถ่าย ของชิ้นงานเดิมซ้ำ 3 รอบ [6] พบว่าความแม่นยำหรือประสิทธิภาพจากการตรวจสอบของเครื่องจักรมีสูงกว่าการตรวจสอบด้วยพนักงาน กล่าวคือการตรวจสอบด้วยพนักงานมีความแม่นยำ (Accuracy) ร้อยละ 89 แต่การตรวจสอบด้วยเครื่องจักรมีความแม่นยำ (Accuracy) ร้อยละ 96 โดยผลการทดสอบพบว่า เมื่อพนักงานมีการตรวจสอบซ้ำมีโอกาสดังกล่าวที่ตัดสินใจผิดพลาดได้มากกว่าการตรวจสอบด้วยเครื่องจักร หรือกล่าวได้อีกว่าเครื่องจักรมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบซ้ำมากกว่าพนักงานที่มีความแปรปรวนในการตัดสินใจสูง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ [7] ที่ต้องมีการทดสอบซ้ำของสิ่งตัวอย่างเพื่อทดสอบความแม่นยำในการตัดสินใจ [8] แต่เนื่องจากยังมีงานวิจัยส่วนน้อยที่ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจสอบระหว่างพนักงานและเครื่องจักร ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงทำการใช้วิธีตามกรอบการประเมินผลระบบการวัดแบบข้อมูลนับของเทคนิคแมชชีนวิชชั่น

<http://jeet.siamtechu.net>

สำหรับการตรวจจับสิ่งแปลกปลอมบนหน้าหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ [9,10] โดยแยกเป็นการประเมินผลระบบการตรวจสอบในระยะสั้น ด้วยความมีประสิทธิภาพของการตรวจสอบ และการประเมินผลระยะยาวด้วยสมรรถนะของระบบวัด

จากสมการที่ 10 และ 11 สามารถประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบซ้ำ หรือรีพีทเทเบิลิตีของพนักงาน และเครื่องจักร โดยการประเมินความสามารถในการตรวจสอบได้ผลเหมือนกันโดยไม่สนใจว่าผลการตรวจสอบจะถูกต้องหรือไม่ มีผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

$$\% \text{ รีพีทเทเบิลิตีของพนักงาน} = \frac{282}{300} \times 100\% \quad (10)$$

$$= 94.00 \%$$

$$\% \text{ รีพีทเทเบิลิตีของเครื่องจักร} = \frac{300}{300} \times 100\% \quad (11)$$

$$= 100 \%$$

จากสมการที่ 12 และ 13 การประเมินผล % ความไม่ไปอัสของพนักงานตรวจสอบ และเครื่องจักรตรวจสอบ โดยการพิจารณาความสามารถในการตรวจสอบผลที่เหมือนกันและถูกต้องตามคุณภาพที่แท้จริงของชิ้นงานตัวอย่าง

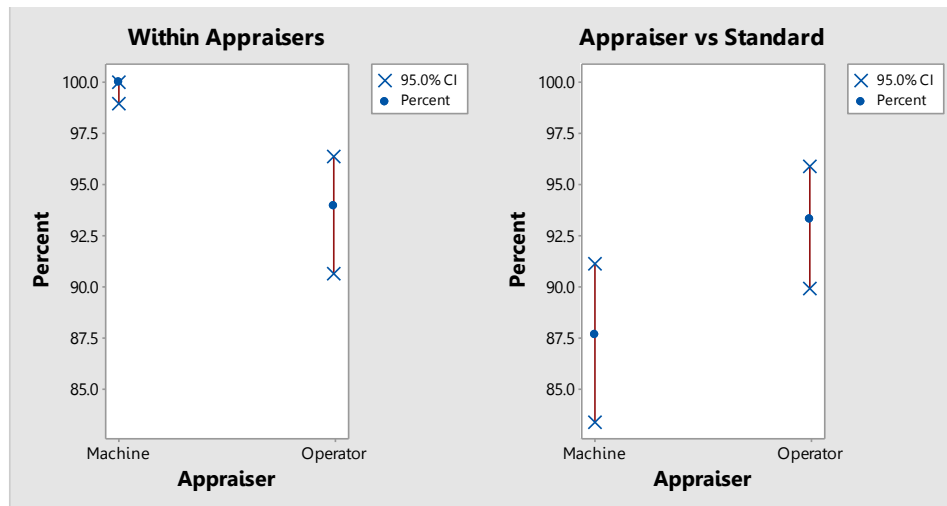
$$\% \text{ ความไม่ไปอัสของเครื่องจักรตรวจสอบ} = \frac{280}{300} \times 100\% \quad (12)$$

$$= 93.33 \%$$

$$\% \text{ ความไม่ไปอัสของพนักงานตรวจสอบ} = \frac{263}{300} \times 100\% \quad (13)$$

$$= 87.67 \%$$

จากการเปรียบเทียบ % รีพีทเทเบิลิตี และ % ความไม่ไปอัสระหว่างพนักงานและเครื่องจักร พบว่าผลการตรวจสอบด้วยเครื่องจักรมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบซ้ำมากกว่าพนักงาน โดยการพิจารณาจาก % รีพีทเทเบิลิตีของพนักงานมีประสิทธิภาพการตรวจสอบร้อยละ 94 และเครื่องจักรมีประสิทธิภาพการตรวจสอบร้อยละ 100 และเมื่อนำความถูกต้องตามระดับคุณภาพสินค้าที่เป็นจริงมาพิจารณาร่วมด้วยแล้ว พบว่า การตรวจสอบด้วยพนักงานมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบมากกว่าเครื่องจักรโดยพิจารณาจาก % ความไม่ไปอัสของพนักงานมีประสิทธิภาพร้อยละ 93.33 และเครื่องจักรมีประสิทธิภาพร้อยละ 87.67 หรือกล่าวได้ว่าเมื่อมีการตรวจสอบสินค้าซ้ำในชิ้นเดิม พนักงานจะมีโอกาสในการตัดสินใจที่ผิดพลาดมากกว่าเครื่องจักรเนื่องจากมีความเที่ยงตรงต่อผลในการตรวจสอบ แต่เมื่อนำระดับคุณภาพที่แท้จริงเข้ามาร่วมพิจารณาการตรวจสอบด้วยพนักงานจะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า



รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลการตรวจสอบระหว่างพนักงานและเครื่องจักร

รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลการตรวจสอบระหว่างพนักงานและเครื่องจักร หรือ Within Appraiser พบว่า ผลการตรวจสอบของพนักงานและเครื่องจักรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วงความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 เนื่องจากในช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของพนักงานมีความสามารถในการตรวจสอบอยู่ในช่วงร้อยละ 99.01 ถึง 100 และเครื่องจักรมีความสามารถในการตรวจสอบอยู่ในช่วงร้อยละ 90.68 ถึง 96.41 และเมื่อนำผลการตรวจสอบของพนักงานและเครื่องจักรมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน หรือ Appraiser vs Standard พบว่าการตรวจสอบด้วยพนักงานและเครื่องจักรมีผลการตรวจสอบได้ตรงตามมาตรฐานของสินค้าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ .05 เนื่องจากพนักงานมีความสามารถในการตรวจสอบเทียบกับมาตรฐานอยู่ในช่วงร้อยละ 89.89 ถึง 95.88 และเครื่องจักรมีความสามารถในการตรวจสอบเทียบกับมาตรฐานอยู่ในช่วงร้อยละ 83.40 ถึง 91.17 ถึงแม้ว่าค่าเฉลี่ยในการตรวจสอบของพนักงานมีความถูกต้องร้อยละ 93.33 เมื่อเทียบกับมาตรฐาน ซึ่งสูงกว่าการตรวจสอบด้วยเครื่องจักรที่มีค่าร้อยละ 87.67 ซึ่งกล่าวได้ว่าหากต้องการผลการตรวจสอบตามมาตรฐานสินค้าโดยไม่ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของผลการตรวจสอบ พนักงานและเครื่องจักรสามารถปฏิบัติงานทดแทนกันได้

การวิเคราะห์ผลการตรวจสอบด้วย Kappa เพื่อวัดถึงระดับของความสัมพันธ์ระหว่างพนักงานทั้งสองที่สามารถตรวจสอบได้ผลเหมือนกัน หรือเป็นการตรวจสอบความเห็นพ้องกันหรือไม่เท่านั้น ด้วยการทดสอบสมมุติฐานความมีประสิทธิผลของพนักงานและเครื่องจักร โดยในขั้นตอนนี้จะเปรียบเทียบการตรวจสอบด้วยเครื่องจักรเสมือนเป็นพนักงานคนที่ 2 ด้วยสมมุติฐานงานวิจัยดังนี้

H_0 : พนักงานทดสอบไม่มีผลต่อค่าวัดจากระบบการตรวจสอบ

H_1 : พนักงานทดสอบมีผลต่อค่าวัดจากระบบการตรวจสอบ

จากรูปที่ 77 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ Kappa ของพนักงานและเครื่องจักรมีค่าเท่ากับ 0.83 และการพิจารณาว่าเครื่องจักรมีความสามารถในการแยกชิ้นงานเสียออกจากชิ้นงานดี พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ Kappa มีค่าเท่ากับ 0.75

6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาการตรวจสอบสิ่งแปลกปลอมบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ด้วยโปรแกรมการประมวลผลจากภาพถ่าย และประเมินประสิทธิภาพระบบการวัดระหว่างระบบการประมวลผลจากภาพถ่ายที่พัฒนาขึ้นกับการตรวจสอบผลของพนักงานผู้เชี่ยวชาญ พบว่า ประสิทธิภาพการประมวลผลจากภาพถ่ายทั้งหมด 300 ภาพ แบ่งเป็นภาพชิ้นงานดี จำนวน 150 ภาพ และภาพชิ้นงานเสียจำนวน 150 ภาพ จากการประเมินด้วยเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) หรือตารางการกระจายจำแนก (Classification distribution table) [4] พบว่าความแม่นยำหรือประสิทธิภาพจากการตรวจสอบของพนักงานผ่านกล้องขยาย สูงกว่าการตรวจสอบด้วยการประมวลผลภาพ กล่าวคือการตรวจสอบด้วยพนักงานมีความแม่นยำ (Accuracy) ร้อยละ 98 แต่การตรวจสอบด้วยการประมวลผลภาพมีความแม่นยำ (Accuracy) ร้อยละ 89 แต่เนื่องจากการตรวจสอบโดยพนักงานมีความผิดพลาดจากการตรวจสอบซ้ำเนื่องจากความเมื่อยล้า และเพื่อเป็นการพิสูจน์สมมุติฐานดังกล่าว ในงานวิจัยนี้จึงทำการเก็บข้อมูลเพิ่มการทดสอบซ้ำจำนวน 3 รอบ จากชิ้นงานตัวอย่างเดิมที่ และทำการสุ่มตัวอย่างแบบอิสระเพื่อไม่ให้พนักงานหรือการประมวลผลภาพสามารถตัดสินใจจากการจดจำชิ้นงานเดิมได้ พบว่าเมื่อนำผลการตรวจสอบของพนักงานและการประมวลผลภาพมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน มีผลการตรวจสอบได้ตรงตามมาตรฐานที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ .05 ถึงแม้ว่าค่าเฉลี่ยในการตรวจสอบของพนักงานจะมีความถูกต้องร้อยละ 93.33 เมื่อเทียบกับมาตรฐาน ซึ่งสูงกว่าการตรวจสอบด้วยการประมวลผลภาพที่มีค่าร้อยละ 87.67 ก็ตาม แต่ประสิทธิภาพการตรวจสอบของการประมวลผลภาพมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับผลการวิจัยของ [11] ที่ใช้โปรแกรมการประมวลผลภาพในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ และพบว่าผลจากการทดสอบระบบการตรวจสอบด้วยการประมวลผลภาพมีความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 97.67 และในงานวิจัยครั้งนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ Kappa ของพนักงานและการประมวลผลภาพเท่ากับ 0.83 หมายถึงผลการตรวจสอบของพนักงานและการประมวลผลภาพมีความสอดคล้องกันมาก และการตรวจสอบความสามารถของการประมวลผลภาพในการแยกชิ้นงานเสียออกจากชิ้นงานดี พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ Kappa มีค่าเท่ากับ 0.75 หมายถึงผลการตรวจสอบด้วยการประมวลผลภาพมีความสอดคล้องกับมาตรฐานในระดับดีมาก [12]

7. ข้อเสนอแนะ

จากหลักการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม และค่าไบอัส หากผลการตรวจสอบมีความแม่นยำในระดับสูง จะช่วยให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพผลการตรวจสอบให้มีประสิทธิภาพได้งานขึ้น หลังจากมีการลดความไบอัสแล้ว และการประเมินประสิทธิภาพของระบบการวัดด้วยการตรวจสอบซ้ำของงานวิจัยนี้พบว่าความผันแปรในการตัดสินใจของพนักงานมีโอกาสตัดสินใจไม่เหมือนเดิม สูงกว่าการตรวจสอบด้วยการประมวลผลภาพดังนั้นในการพัฒนาการตรวจสอบด้วยระบบการประมวลผลภาพจึงควรมีการประเมินการตรวจสอบซ้ำของระบบการประมวลผลภาพตามแนวทางของงานวิจัยนี้ ซึ่งจะช่วยให้การตัดสินใจในการนำระบบการประมวลผลภาพมาใช้ได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ประจำปีงบประมาณ 2563

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kunakornvong P, Sooraksa P. Machine vision for defect detection on the air bearing surface. In Proceedings - 2016 IEEE International Symposium on Computer, Consumer and Control, IS3C 2016. IEEE; 2016. p. 37–40.
- [2] Zhang S, Tyndall G, Suk M. Air bearing surface designs for less humidity sensitivity. IEEE Transactions on Magnetics. 2008;44(11):3653-3655.
- [3] Malamas EN, Petrakis EGM, Zervakis M, Petit L, Legat JD. A survey on industrial vision systems, applications and tools. Image Vision Computer. 2003;12(2):171–88.
- [4] นวพร ธารสาร. การพัฒนาระบบประมวลผลภาพสำหรับการตรวจสอบเส้นดําในการผลิตกั๊กแช่แข็ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2561.
- [5] Nakharacruangsak S, Choonprawat S. An Applied Local Binary Pattern by Hyperbolic Secant for Edge Detection of Images and applied to Images Retrieval. Journal of Energy and Environment Technology. 2018;5(1):1–10.
- [6] Van Wieringen WN, De Mast J. Measurement system analysis for binary data. Technometrics. 2008;50(4):468–478.
- [7] สมบูรณ์ ถามูลตรี และสุรพันธ์ เอื้อไพบูรณ์. การพัฒนาระบบตรวจสอบอัตโนมัติด้วยวิธีการประมวลผลภาพบนคอมพิวเตอร์สำหรับระบุตำแหน่งจุดบกพร่องที่ถูกต้องบนหัวอ่านข้อมูล. วารสารปัญญาทัศน์. 2554;2(2):19–27.
- [8] Nia VP, Asgharian M. and Basetto S. A Formal Test for Binary R & R Measurement Systems. In JSMP Proceedings 2013; p. 2865–2872.
- [9] Satorres S, Gomez J, Gamez J, Sanchez A. A Machine Vision for Automated Headlamp Lens Inspection. Vision Sensors Edge Detect. 2010;(August). [Internet]. Available from: https://cdn.intechopen.com/pdfs/11881/InTech-A_machine_vision_for_automated_headlamp_lens_inspection.pdf
- [10] ปัญญา สํารายทัศน์ นภพ ชัยสุวรรณ และบุริม นิลแบน. กรอบการประเมินผลระบบการวัดแบบข้อมูลนับของเทคนิคแมชชีนวิชันสำหรับ การตรวจจับสิ่งแปลกปลอมบนหน้าหัวอ่านฮาร์ดดิสก์. วารสารวิชาการเทคโนโลยี พลังงาน และสิ่งแวดล้อม. 2563;7(2):51–8.
- [11] จิตติมา วะกุล. การพัฒนาเครื่องตรวจสอบเชิงมองเห็นแบบอัตโนมัติสำหรับกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2553.
- [12] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. การวิเคราะห์ระบบการวัด(MSA) ประมวลผลด้วย MINITAB. 4th ed. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2547.