



อัลกอริทึมสำหรับตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ ธนภูมิ เฟื่องเพียร* ไพศาล มุณีสว่าง และ สุชาติ แย้มเม่น

An Algorithm for Detection of Solder Balls on HGA

Thanapoom Fuangpian*, Paisarn Muneesawang and Suchart Yammen

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จังหวัดพิจิตร

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok Province.

*Corresponding Author. E-mail address: mashimaro_peco@hotmail.com (T. Fuangpian)

Received 30 May 2011; accepted 31 August 2011

บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้การตรวจจับจุดบกพร่องบนพื้นผิวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ผ่านการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลนำมาประยุกต์ใช้สำหรับตรวจจับแทนการตรวจจับด้วยสายตาของมนุษย์ งานวิจัยนี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์อัตโนมัติ ทั้ง 2 กรณี คือ เม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์หายไปและเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ใหม่ ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 3 วิธี ดังนี้ วิธีการจัดกลุ่มด้วยเทคนิคเคมัน วิธีการตัดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซีและวิธีการคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิต ขั้นตอนแรกทำการเลือกบริเวณที่สนใจและตัดภาพย่อยเฉพาะบริเวณเม็ดตะกั่วจากภาพสีหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ ต่อมาวิธีการจัดกลุ่มด้วยเทคนิคเคมันประมวลผลด้วยภาพย่อยที่เป็นภาพสีถัดมาวิธีการตัดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซีประมวลผลด้วยภาพย่อยที่เป็นภาพระดับเทาที่ได้มาจากการปรับปรุงภาพย่อยที่เป็นภาพสี หลังจากนั้นวิธีการคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิตประมวลผลด้วยภาพย่อยขาวดำที่ได้มาจากการปรับปรุงภาพย่อยที่เป็นภาพสี สุดท้ายนำภาพย่อยที่ผ่านกระบวนการทั้ง 3 วิธีดังกล่าวแล้วทำการทรานส์โพสและรวมด้วยวิธีเมตริกซ์เพื่อบ่งบอกจุดบกพร่องเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ จากผลงานวิจัยนี้ทดลองกับภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ทั้งหมด 591 ภาพตัวอย่าง พบว่าวิธีการจัดกลุ่มด้วยเทคนิคเคมันเหมาะสมกับการตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์หายไปและเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ใหม่มากที่สุด

คำสำคัญ: การตรวจจับเม็ดตะกั่ว การประมวลผลภาพ หัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ การจัดกลุ่มด้วยเคมัน

Abstract

At present, the digital image processing has been applied for defect detection on the surface of a hard disk drive in stead of visual detection. This study is presented how to use an algorithm for detection of solder balls on head gimbals assembly (HGA) automatically in both cases: the missing solder balls on HGA and the solder balls burning on HGA. The experiment is all done in 3 methods: the method of clustering by K-mean technique, the method of appropriately thresholding by Otsu, and the method of geometric feature extraction. The first method is done by choosing the interesting area and cropping only the part around the solder balls from HGA color image. Then the second method, the method of clustering by K-mean, is processed with the cropped color image. Next, the appropriately thresholding by Otsu processes the cropped gray image which is derived from the cropped color image improved. After that, the geometric feature extraction processes the cropped binary image derived from the cropped color image improved. Finally, the processed images from 3 methods above are transposed and combined by matrix method to indicate the solder balls on HGA. The results of this study tested with all 591 HGA sample images are found that the method of grouping by K-mean is the most appropriate method to detect missing solder balls on HGA and solder balls burning on HGA.

Keywords: Detection of Solder Balls, Image Processing, Head Gimbals Assembly, K-means

บทนำ

ฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้จัดเก็บข้อมูลระบบดิจิทัลสำหรับคอมพิวเตอร์ที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก ซึ่งฐานการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใหญ่ที่สุดในโลกอยู่ที่ประเทศไทยสามารถสร้างรายได้ติด 1 ใน 10 ของประเทศทุกปี แม้ว่าการะบวนการผลิตตั้งอยู่ในประเทศไทย แต่การวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีนั้นมีศูนย์กลางอยู่ที่ต่างประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่นที่เป็นเจ้าของอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขั้นสูง เมื่อเกิดปัญหาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ก่อให้เกิดความน่าเชื่อถือ รัฐบาลจึง

กำหนดนโยบายพัฒนาระดับประเทศ โดยมอบหมายให้สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NECTEC) เข้ามาดูแลโครงการนี้ หนึ่งในผู้นำการออกแบบการผลิตและจำหน่ายฮาร์ดดิสก์ บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ตั้งอยู่ในนครอุตสาหกรรมบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ได้ร่วมกับสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติเพื่อยกระดับคุณภาพและประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ในสายการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเฉพาะการตรวจจับจุดบกพร่องบนพื้นผิวผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากเครื่องเชื่อมแผงวงจรไฟฟ้าที่ชื่อว่า “Solder Jet Bond” (SJB) กรณีที่งานวิจัยนี้ได้รับปัญหาโจทย์จากบริษัทฯ เป็นกรณีการตรวจจับจุดบกพร่อง

เม็ดตะกั่ว (Solder Balls) บนแผงวงจรไฟฟ้าขนาดเล็กของชิ้นส่วนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ (Head Gimbals Assembly: HGA) 2 กรณี คือ กรณีเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์หายไปและกรณีเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ใหม่โดยเม็ดตะกั่วมีหน้าที่สำคัญเป็นตัวประสานวงจรไฟฟ้าของแผงวงจรไฟฟ้าบนฮาร์ดดิสก์ให้ครบวงจรทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้น หากมีเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไม่สมบูรณ์ประกอบเป็นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะส่งผลให้ฮาร์ดดิสก์ชิ้นนั้นไม่สามารถอ่านและเขียนข้อมูลแบบดิจิทัลลงในแผ่นดิสก์ได้ ก่อให้เกิดความน่าเชื่อถือลดน้อยลง

โดยปัจจุบันนี้บริษัทฯ ได้ใช้วิธีตรวจจับจุดบกพร่องของชิ้นส่วนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ด้วยสายตาของเจ้าหน้าที่แผนกควบคุมคุณภาพฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเจ้าหน้าที่ทำการตรวจจับจุดบกพร่องของเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์โดยส่องดูชิ้นส่วนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ผ่านกล้องไมโครสโคป กำลังขยายสูง 10-15 เท่า ภายในห้องปลอดฝุ่น (Clean Room) เพื่อขยายขนาดหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ให้มีขนาดใหญ่พอสำหรับตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไม่สมบูรณ์ออกจากเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์สมบูรณ์ได้ชัดเจน หลังจากนั้นนำหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่ไม่สมบูรณ์ส่งกลับไปยังแผนกประกอบหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์เพื่อทำการแก้ไขและปรับปรุงหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ เมื่อทำการแก้ไขและปรับปรุงหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์เสร็จแล้วนำกลับมาให้เจ้าหน้าที่แผนกควบคุมคุณภาพฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตรวจจับจุดบกพร่องซ้ำ ซึ่งดำเนินการขั้นตอนดังกล่าวซ้ำจนกว่าได้หัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่สมบูรณ์สุดท้ายนำหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่สมบูรณ์เข้าสู่ขั้นตอนการประกอบเป็นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และจำหน่ายต่อไป ดังนั้นด้วยอัตราการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 120,000 ชิ้นต่อวัน ซึ่งมีจำนวนชิ้นส่วนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่รอการตรวจจับจุดบกพร่องเป็นปริมาณมาก เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนเจ้าหน้าที่แผนกควบคุมคุณภาพฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำให้การตรวจจับจุดบกพร่องบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์เกิดความผิดพลาดของมนุษย์ เนื่องจากความเหนื่อยล้าทางสายตาของเจ้าหน้าที่ทำงานเป็นระยะเวลานานหรือผลกระทบทางด้านอารมณ์ที่ตึงเครียดไม่เหมือนกัน ทำให้เกิดฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่สมบูรณ์หลุดออกสู่ตลาดส่งผลต่อความน่าเชื่อถือและสร้างมูลค่าความเสียหายกับภาคอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้นักวิจัยนี้มีความตั้งใจแก้ไขปัญหานี้ โดยมีแนวคิดนำวิธีการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลเข้ามาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ด้วยการประมวลผลภาพทางคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดเวลาและความผิดพลาดในกระบวนการตรวจจับจุดบกพร่องในสายการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ในรายงานการศึกษาวิจัยอื่นนั้นได้มีการนำเสนอวิธีการค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยวิธี ดังนี้ จากบทความชื่อ “Automatic thresholding for defect detection” (Hui-Fuang, 2004) ได้นำเสนอการตรวจสอบข้อบกพร่องโดย

ใช้เทคนิคค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยวิธีโอซีกับภาพฮิสโตแกรมการกระจายแบบคู่ (Bimodal) และการกระจายแบบเดียว (Unimodal) บทความนี้ได้ปรับปรุงวิธีโอซีสำหรับการเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทั้งสองการกระจายทั้งแบบคู่และแบบเดียว นอกจากนี้ยังทดสอบประสิทธิภาพของวิธีที่ปรับปรุงกับข้อบกพร่องทั่วไปด้วยและบทความชื่อ “Real-time rail head surface defect detection: A geometrical approach” (Lin et al., 2009) นำเสนอการตรวจหาจุดบกพร่องบนรางรถไฟ โดยใช้เทคนิคทางสถิติจากฮิสโตแกรมและการกำหนดค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมแบบปรับตัวได้ สามารถตรวจหาจุดบกพร่องบนพื้นผิวรางรถไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี แต่ผลกระทบของเสียงยังคงมีความจำเป็นต้องศึกษาต่อไป

นอกจากนี้ในรายงานการศึกษาวิจัยอื่นนั้นได้มีการนำเสนอวิธีการคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิตจากบทความชื่อ “A system for automated BGA inspection” (Wen-Yen et al., 2004) ได้นำเสนอระบบตรวจสอบจุดบกพร่องของเม็ดตะกั่ววงตัวแบบอาร์เรย์ (Ball Grid Array (BGA)) 6 กรณี ดังนี้ เม็ดตะกั่วหายไป (Missing Ball), เม็ดตะกั่วใหญ่กว่าปกติ (Extra Ball), ขนาดเม็ดตะกั่วใหญ่กว่าสองเท่าของค่าเฉลี่ย (Bridging), เม็ดตะกั่วอยู่นอกเขตพื้นที่จำกัด (Oversize), เม็ดตะกั่วอยู่นอกเขตพื้นที่จำกัด (Undersize), และจุดศูนย์กลางเม็ดตะกั่วผิดตำแหน่ง (Offset) ซึ่งขั้นตอนของระบบตรวจสอบใช้ขนาดพื้นที่ (Area), จุดศูนย์กลางร่วมกัน (Coordinate of the Centroid) และรูปทรงกลม (Sphere) เป็นเครื่องมือตรวจสอบประเภทจุดบกพร่อง ซึ่งการทดลองที่ได้สามารถค้นหาและตรวจสอบได้จริงและบทความชื่อ “A machine vision system of ball grid array inspection on RT-Linux OS” (Xia et al., 2004) ได้ศึกษาการตรวจสอบคุณภาพของเม็ดตะกั่วจากความสูงและขนาด โดยใช้วิธีวิเคราะห์ทางเรขาคณิต (Geometrical) จำแนกประเภทข้อบกพร่องได้ดังนี้ ขนาดใหญ่เกิน (Oversize), ผิดตำแหน่ง (Offset), ช่องว่าง (Pitch), ขนาดเล็กเกิน (Undersize), หายไป (Missing) และ รูปร่างผิดปกติ (Deformation) ขั้นตอนวิธีการดังกล่าวได้นำมาใช้บนระบบปฏิบัติการ Linux พัฒนาความเร็วให้สูงขึ้นเพื่อให้เป็นระบบการตรวจสอบแบบเวลาจริงรวมทั้งบทความชื่อ “Analysis Ball Grid Array defects by using new image technique” (Sanguannam et al., 2008) ได้นำเสนอเทคนิคการประมวลผลภาพเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพเม็ดตะกั่วอาร์เรย์ (Ball Grid Array (BGA)) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วิธีพื้นที่ (Area), เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) และเส้นรอบรูป (Perimeter) ซึ่งหากมีข้อบกพร่องทำให้ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือและคุณภาพของสินค้า ซึ่งสามารถตรวจพบข้อบกพร่องต่างๆ ได้ 100% ส่งผลให้คุณภาพสินค้ามีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น สุดท้ายบทความชื่อ “Printed circuit board defect detection using mathematical morphology and MATLAB

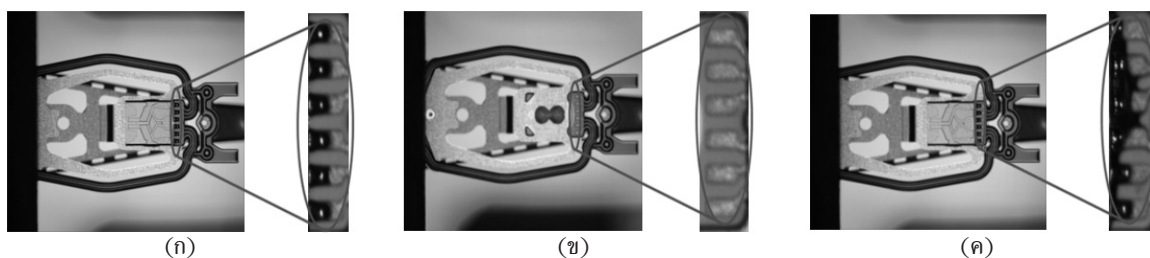
image processing tools” (Putera et al., 2010) ได้นำเสนอวิธีตรวจสอบข้อบกพร่องบนชิ้นส่วนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Board) เพื่อวิเคราะห์และจัดประเภทข้อบกพร่อง โดยใช้วิธีประมวลผลภาพโดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างหรือโครงสร้างของรูปภาพและใช้ภาพแม่แบบต้นฉบับ (Template) ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถแบ่งประเภทข้อบกพร่องได้ทั้งหมด 14 ประเภทและกรณีที่น่ามาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย คือ ช่องหายไป (Missing Hole) เพราะมีลักษณะรูปร่างกลมและมีขนาดเล็กคล้ายกับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์

จากการศึกษาบทความ “Learning vector quantization neural networks for LED wafer defect inspection” (Chuan-Yu et al., 2007) นำเสนอวิธีตรวจสอบจุดบกพร่องของหลอดไฟโดยใช้วิธีจัดกลุ่มด้วยเคมีนเพื่อแยกองค์ประกอบของภาพหลอดไฟและทำการหาแยกบริเวณของหลอดไฟออกจากพื้นหลังโดยใช้วิธีค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซีสุดท้ายดึงองค์ประกอบตามลักษณะเด่นของภาพด้วยรูปเรขาคณิต คือ รูปวงกลมมาประยุกต์ใช้รวมด้วย จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนตัดสินใจด้วยการตรวจจับโครงข่ายประสาทเทียมและการเรียนรู้จำเพื่อตัดสินใจภาพหลอดไฟไม่มีจุดบกพร่องและภาพหลอดไฟมีจุดบกพร่องออกจากกัน

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาวิธีการตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์โดยแบ่งอัตโนมัติโดยประยุกต์ใช้เทคนิคทางด้านการประมวลผลภาพประกอบด้วยการจัดกลุ่มด้วยเคมีน ขั้นตอนแรกทำการเลือกบริเวณที่สนใจและตัดภาพย่อยเฉพาะบริเวณเม็ดตะกั่วจากภาพสัหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ ต่อมาวิธีการจัดกลุ่มด้วยเทคนิคเคมีนประมวลผลด้วยภาพย่อยที่เป็นภาพสี สุดท้ายนำภาพย่อยที่ผ่านกระบวนการจัดกลุ่มด้วยเคมีนดังกล่าวแล้วทำการทรานส์โพสและรวมด้วยวิธีเมตริกซ์เพื่อบ่งบอกจุดบกพร่องเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซีและวิธีการคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิตสามารถตรวจจับจุดบกพร่องได้อย่างละเอียดความถูกต้องที่สูงและเวลาในการประมวลผลภาพรวดเร็วกว่าบทความดังกล่าวด้วย

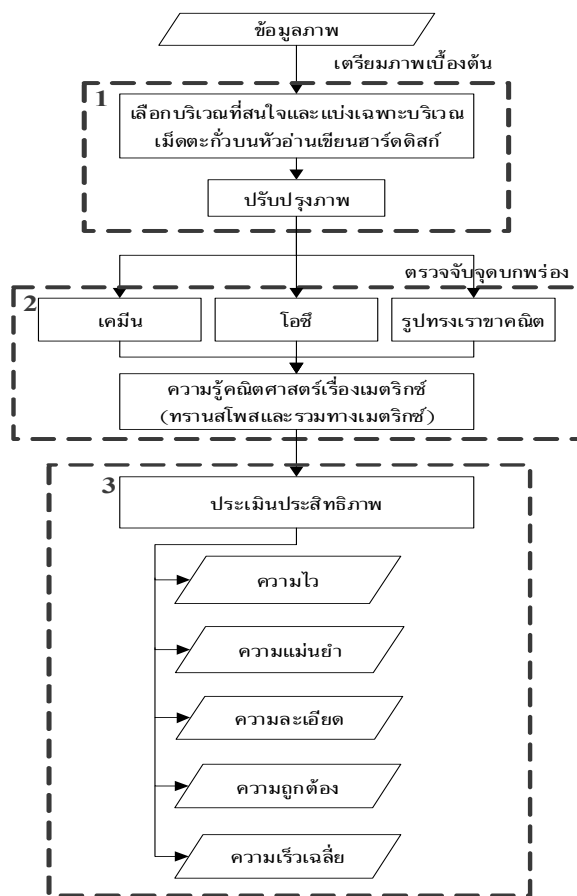
วิธีการและทฤษฎี

วิธีการของอัลกอริทึมสำหรับตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ โดยมีลำดับขั้นตอนกระบวนการ



รูปที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในงานวิจัย (ก) ภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์สมบูรณ์ (ข) ภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์หายไป (ค) ภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ใหม่

ทั้งหมด 3 กระบวนการ (รูปที่ 1) ดังต่อไปนี้ (1) กระบวนการเตรียมภาพเบื้องต้น (2) กระบวนการตรวจจับจุดบกพร่อง (3) กระบวนการประเมินประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 ลำดับขั้นตอนของอัลกอริทึมสำหรับตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์อัตโนมัติ

ข้อมูลภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ทั้งหมดได้จากการถ่ายภาพจากมุมกล้องด้านบนของกล้องกำลังขยายสูงขนาด 2400x2000 พิกเซล จำนวน 591 ภาพ แบ่งเป็นภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์สมบูรณ์ ภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์หายไปและภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ใหม่ (รูปที่ 2(ก), 2(ข) และ 2(ค) ตามลำดับ) มาเก็บไว้ที่คอมพิวเตอร์เพื่อรอทำการประมวลผลภาพตามลำดับขั้นตอนต่อไป ดังนี้

(1) กระบวนการเตรียมภาพเบื้องต้น

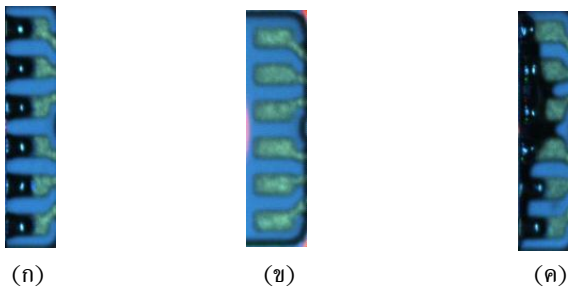
กระบวนการนี้เป็นขั้นตอนแยกบริเวณที่สนใจออกจากพื้นหลังถือว่ากระบวนการนี้เป็นพื้นฐานการประมวลผลภาพที่นำไปสู่การตัดสินใจในกระบวนการสุดท้ายต่อไป โดยเลือกเฉพาะบริเวณเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์แบบฮาร์ดไดรฟ์ เริ่มจากนำภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ขนาด 2400x2000 พิกเซล ดังรูปที่ 2 ทั้งหมด 591 รูป มาเข้ากระบวนการเตรียมภาพเบื้องต้นใช้วิธีสหสัมพันธ์แบบไขว้ (Cross Correlation) ขั้นตอนแรกพิจารณาภาพต้นฉบับ ($w(x, y)$) ขนาด $K \times L$ ซึ่งอยู่ภายในรูปภาพที่สนใจ ($f(x, y)$) ขนาด $M \times N$ โดยที่ $K \leq M$ และ $L \leq N$ เพื่อหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างภาพต้นฉบับกับรูปภาพที่สนใจที่จุด (i, j) โดยเริ่มต้นที่มุมบนซ้ายของรูปภาพที่สนใจ f ทำการเลื่อนภาพต้นฉบับ w ไปจนครบทุกพิกเซลของภาพ ค่าสหสัมพันธ์ที่มากที่สุดสามารถบ่งบอกว่าตำแหน่งนั้นคือตำแหน่งที่ตรงกันมากที่สุดระหว่าง w และ f สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (1)

$$C(i, j) = \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{K-1} w(x, y) f(x+i, y+j) \quad (1)$$

โดยที่ $C(i, j)$ = ค่าผลรวมของพื้นที่ในภาพของ w และ f ที่ทับซ้อนกัน

$$i = 0, 1, \dots, M-1, \quad j = 0, 1, \dots, N-1$$

ภาพที่ได้ออกมาเป็นภาพย่อยเฉพาะบริเวณเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ขนาด 400x20 พิกเซล ดังตัวอย่างภาพย่อยเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์สมบูรณ์ ภาพย่อยเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์หายไปและภาพย่อยเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ใหม่ (รูปที่ 3(ก), 3(ข) และ 3(ค) ตามลำดับ)



รูปที่ 3 ตัวอย่างภาพย่อยที่ผ่านกระบวนการเตรียมภาพเบื้องต้น
(ก) ภาพย่อยเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์สมบูรณ์
(ข) ภาพย่อยเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์หายไป
(ค) ภาพย่อยเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ใหม่

ต่อไปเป็นขั้นตอนการปรับปรุงภาพให้เหมาะกับงานวิจัยนี้ โดยใช้วิธีทำการปรับค่าความเข้มภาพสีของโดเมนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ ซึ่งส่งผลลดขั้นตอนของกระบวนการจัดกลุ่มด้วยเคมีน สามารถจัดกลุ่มองค์ประกอบของภาพย่อยบริเวณเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ (รูปที่ 4)

โดย $T[...]$ เป็นฟังก์ชันการปรับค่าความเข้มภาพสีของโดเมนภาพ $f(x, y)$ ในพื้นที่รอบจุดพิกเซล (x, y) ซึ่งได้ภาพผลลัพธ์ออกมาเป็นภาพ $g(x, y)$ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2)

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (2)$$

เมื่อ $f(x, y)$ คือ ภาพต้นฉบับ

$g(x, y)$ คือ ภาพผลลัพธ์ที่ได้

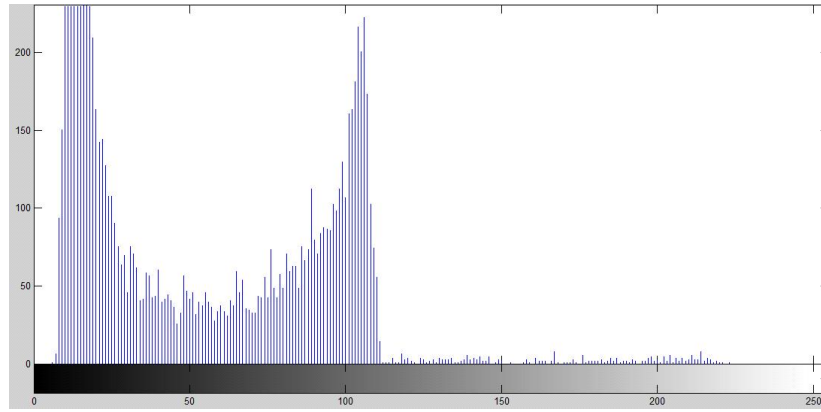
$T[...]$ คือ ฟังก์ชันที่ถูกกำหนดในพื้นที่รอบจุดพิกเซล

(2) กระบวนการตรวจจับจุดบกพร่อง

กระบวนการนี้เป็นขั้นตอนการแยกบริเวณเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ออกจากพื้นหลังของภาพย่อยบริเวณเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ด้วยอัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมีนเปรียบเทียบกับวิธีค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซีและวิธีคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิต

(2.1) อัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมีน เป็นขั้นตอนการแยกภาพย่อยบริเวณเม็ดตะกั่วออกจากพื้นหลังของภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์อย่างชัดเจน ซึ่งอัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมีนนี้ใช้องค์ประกอบของสีในการแยกภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ออกจากพื้นหลังของภาพย่อยบริเวณเม็ดตะกั่ว โดยขั้นตอนแรกทำการแปลงจากภาพย่อยสีบริเวณเม็ดตะกั่ว ซึ่งประกอบด้วยแม่สี 3 สี คือ สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน (Red-Green-Blue: RGB) ไปเป็นภาพย่อยระดับเทาบริเวณเม็ดตะกั่ว (Gray Image) ซึ่งมีระดับสีตั้งแต่สีขาวและสีเทาไปจนถึงสีดำ ต่อจากนั้นนำภาพย่อยระดับเทาบริเวณเม็ดตะกั่วไปเขียนกราฟฮิสโตแกรม (รูปที่ 4) เพื่อดูการจับกลุ่มข้อมูลแท่งฮิสโตแกรมซึ่งแกนนอนของกราฟฮิสโตแกรมซึ่งเป็นความเข้มระดับเทาที่มีค่าตั้งแต่ 0-255 และแกนตั้งของกราฟฮิสโตแกรมแสดงค่าของความเข้มระดับเทาของแต่ละข้อมูลแท่งฮิสโตแกรม หลังจากนั้นทำการเลือกจำนวนกลุ่มข้อมูลแท่งฮิสโตแกรมที่เหมาะสมไปใช้ในการแบ่งกลุ่มข้อมูลภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ด้วยอัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมีนต่อไป

จากการเขียนกราฟฮิสโตแกรมเห็นได้ว่าแท่งฮิสโตแกรมมีการจับกลุ่มกันทั้งหมด 3 กลุ่ม ซึ่งมีลักษณะกราฟฮิสโตแกรมใกล้เคียงกันทั้งหมดทุกภาพ ทำให้เลือกจำนวนการจัดกลุ่มข้อมูลภาพย่อยบริเวณเม็ดตะกั่วด้วยเคมีนที่เหมาะสม คือ 3 กลุ่ม ($k=3$) หลังจากได้จำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมแล้วทำการแปลงภาพย่อยระดับเทาบริเวณเม็ดตะกั่วกลับมาเป็นภาพย่อยสีบริเวณเม็ดตะกั่วเพื่อจัดกลุ่มด้วยเคมีนต่อไป อัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมีนที่นำมาประยุกต์กับการจัดกลุ่มข้อมูลภาพย่อยบริเวณเม็ดตะกั่ว (รูปที่ 5 (ก)) สามารถเขียนได้ตามสมการที่ (3)



รูปที่ 4 ตัวอย่างกราฟฮิสโตแกรมจากภาพย่อยเม็ดตะกั่ว

$$J = \sum_{i=1}^k \sum_{j=S_i} \|x_j - z_i\|^2 \quad (3)$$

เมื่อ J คือ ผลรวมของผลต่างระหว่างจุดศูนย์กลางของข้อมูลในกลุ่มยกกำลังสอง

k คือ จำนวนกลุ่มทั้งหมด

S_i คือ เซตของข้อมูลกลุ่มที่ i เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, k$

X_j คือ ข้อมูลที่เป็นสมาชิกของเซต S_i

Z_i คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทุกตัวในกลุ่ม

(2.2) วิธีค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซี เป็นการนำค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้เพื่อแยกส่วนบริเวณเม็ดตะกั่วออกจากพื้นหลัง (รูปที่ 5 ข) หลักการต้องทำให้ฮิสโตแกรมทั้งสองกลุ่มมีการกระจายตัวน้อยที่สุด เริ่มจากคำนวณฮิสโตแกรมและแยกกลุ่มของพิกเซลออกเป็นสองกลุ่มโดยใช้ค่าขีดแบ่งและหาค่าความเข้มแสงเฉลี่ยของพิกเซลทั้งสองกลุ่ม หลังจากนั้นหาค่ากำลังสองของผลต่างค่าเฉลี่ยของทั้งสองบริเวณและนำค่าที่ได้คูณด้วยผลคูณระหว่างจำนวนพิกเซลของทั้งสองบริเวณสุดท้ายเลือกค่าขีดแบ่งที่มีค่ามากที่สุดตามสมการที่ (4)

$$\sigma^2_{Between} = n_D(T)n_B(T)[\mu_D(T) - \mu_B(T)]^2 \quad (4)$$

เมื่อ $\sigma^2_{Between}$ คือ ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม

$n_D(T)$ คือ จำนวนพิกเซลทั้งหมดของบริเวณด้านมืด

$n_B(T)$ คือ จำนวนพิกเซลทั้งหมดของบริเวณด้านสว่าง

$\mu_D(T)$ คือ ค่าเฉลี่ยฮิสโตแกรมของบริเวณด้านมืด

$\mu_B(T)$ คือ ค่าเฉลี่ยฮิสโตแกรมของบริเวณด้านสว่าง

(2.3) วิธีคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิต เป็นการเลือกคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิตเป็นวิธีที่นำมาประยุกต์ใช้กับการตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ซึ่งนำรูปเรขาคณิต คือ รูปวงกลมมาใช้กับงานวิจัยนี้ โดยเริ่มจากแปลงภาพย่อยสีบริเวณเม็ดตะกั่วเป็นภาพย่อยขาวดำบริเวณเม็ดตะกั่ว แล้วทำการเลือกพิกเซลสีขาวที่จับตัว

กันเป็นลักษณะทรงกลมไว้ ส่วนพิกเซลสีขาวที่ไม่มีลักษณะคล้ายทรงกลมให้เป็นพิกเซลสีดำตามภาพพื้นหลัง สุดท้ายได้ภาพย่อยเม็ดตะกั่วที่เป็นส่วนของวงกลมออกมา (รูปที่ 5 ค) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (5)

$$C = 4\pi \times \frac{A_S}{P_S^2} \quad (5)$$

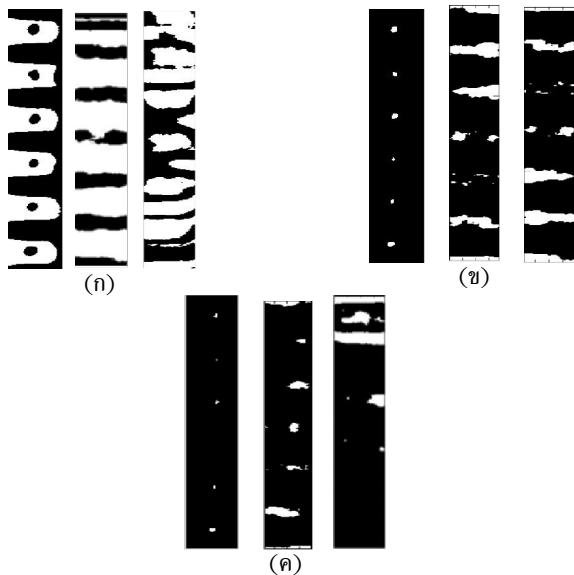
เมื่อ A_S คือ พื้นที่ของเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์

P_S คือ ขอบเขตพื้นหลังของภาพย่อย

C คือ พื้นที่วงกลมของเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์

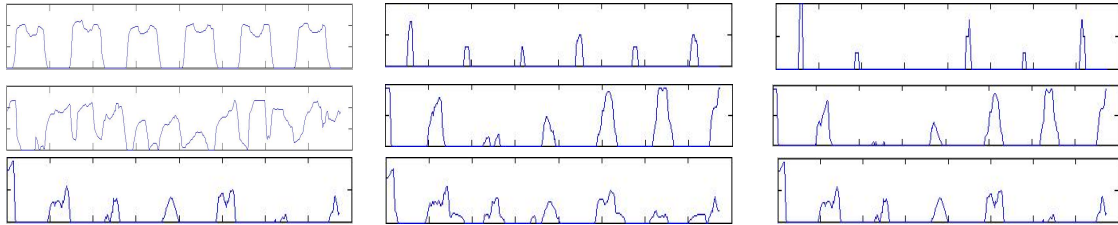
โดย G_S เป็นเวกเตอร์ของพื้นที่วงกลม ซึ่งหาได้จากสมการที่ (6)

$$G_S = [P_S, A_S, C]^T \quad (6)$$



รูปที่ 5 ตัวอย่างภาพย่อยเม็ดตะกั่วที่ผ่านกระบวนการตรวจจับจุดบกพร่อง (ก) วิธีการจัดกลุ่มด้วยเทคนิคเคมัน (ข) วิธีค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซี (ค) วิธีคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิต

ขั้นตอนตรวจจับภาพเมื่อดึงตัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์เพื่อแยกภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์สมบูรณ์ออกจากภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไม่สมบูรณ์ด้วยการนับจำนวนวงปิดของกราฟ เริ่มจากหมุนภาพย่อยบริเวณเมื่อดึงตัวจากภาพแนวตั้งขนาด 400x20 พิกเซลเป็นภาพแนวนอนขนาด 20x400 พิกเซล ด้วยการคำนวณเมตริกซ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีทรานสโพส หลังจากนั้นทำการรวมทางเมตริกซ์ (Sum of Matrix) โดยรวมพิกเซลในแต่ละหลักของเมตริกซ์ เริ่มจากรวมพิกเซลในหลักที่ 1 ของเมตริกซ์



รูปที่ 6 ตัวอย่างภาพย่อยเมื่อดึงตัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่ผ่านการรวมการตรวจจับจุดบกพร่อง (ก) วิธีการจัดกลุ่มด้วยเทคนิคเคมีน (ข) วิธีค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซี (ค) วิธีคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิต

สุดท้ายทำการตัดสินใจด้วยวิธีการนับจำนวนวงปิดของกราฟการรวมทางเมตริกซ์ โดยที่จำนวนวงปิดของกราฟการรวมทางเมตริกซ์เท่ากับ 6 วงปิด แสดงว่าเป็นหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่สมบูรณ์ หากมีจำนวนวงปิดของกราฟการรวมทางเมตริกซ์ไม่เท่ากับ 6 วงปิด ถือว่าเป็นหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่ไม่สมบูรณ์ต้องส่งกลับไปรีไซเคิลเพื่อให้เจ้าหน้าที่แผนกผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ได้ทำการแก้ไขและปรับปรุงหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ เมื่อทำการแก้ไขและปรับปรุงหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์เสร็จแล้วนำกลับมาให้ตรวจจับเมื่อดึงตัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ซ้ำจนกว่าจะได้หัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่สมบูรณ์

(3) กระบวนการประเมินประสิทธิภาพ

ผลการทดลองวิธีการตรวจจับเมื่อดึงตัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์จำนวน 591 ภาพ โดยทำการเปรียบเทียบอัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมีนกับวิธีการค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยวิธีโอซีและวิธีคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิตเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับเมื่อดึงตัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ ซึ่งใช้ตัววัดประสิทธิภาพทั้งหมด 5 ค่า (ตารางที่ 1) ดังนี้

ความไว (Sensitivity) คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่สมบูรณ์ซึ่งถูกตรวจสอบได้ถูกต้องกับผลรวมจำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่สมบูรณ์ทั้งหมด โดยมีนิยามตามสมการที่ (7)

$$\text{ความไว} = \frac{TT}{TT + TF} \times 100 \quad (7)$$

โดยที่ TT คือ จำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์สมบูรณ์ซึ่งตรวจสอบถูกต้อง

TF คือ จำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์สมบูรณ์ซึ่งตรวจสอบไม่ถูกต้อง

ความละเอียด (Specification) คือ อัตราส่วนระหว่าง

ข้อมูลภาพย่อยบริเวณเมื่อดึงตัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์แล้วทำการเก็บค่าไวจนกระทั่งครบ 400 หลักและทำการเขียนกราฟของการรวมทางเมตริกซ์เพื่อสะดวกและง่ายต่อการตรวจจับภาพเมื่อดึงตัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ ซึ่งแต่ละหลักของเมตริกซ์ข้อมูลภาพเมื่อดึงตัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่ตรวจจับได้มีค่าเมื่อพิกเซลของหลักของเมตริกซ์นั้นเป็นสีขาวซึ่งมีค่าเป็น 1 ส่วนหลักของเมตริกซ์ที่มีพิกเซลเป็นสีดำมีค่าเป็น 0 (รูปที่ 6)

จำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งถูกตรวจสอบได้ถูกต้องกับผลรวมจำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่ไม่สมบูรณ์ทั้งหมด โดยมีนิยามตามสมการที่ (8)

$$\text{ความละเอียด} = \frac{FT}{FT + FF} \times 100 \quad (8)$$

โดยที่ FT คือ จำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไม่สมบูรณ์ซึ่งตรวจสอบถูกต้อง

FF คือ จำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไม่สมบูรณ์ซึ่งตรวจสอบไม่ถูกต้อง

ความแม่นยำ (Precision) คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่สมบูรณ์ซึ่งตรวจสอบได้ถูกต้องกับผลรวมจำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ซึ่งถูกตรวจสอบว่าถูกต้องทั้งหมด โดยมีนิยามตามสมการที่ (9)

$$\text{ความแม่นยำ} = \frac{TT}{TT + FF} \times 100 \quad (9)$$

โดยที่ TT คือ จำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไม่สมบูรณ์ซึ่งตรวจสอบถูกต้อง

FF คือ จำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไม่สมบูรณ์ซึ่งตรวจสอบไม่ถูกต้อง

ความถูกต้อง (Accuracy) คือ อัตราส่วนของจำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ ซึ่งตรวจสอบได้ถูกต้องกับจำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ที่นำมาตรวจสอบทั้งหมด โดยมีนิยามตามสมการที่ (10)

$$\text{ความถูกต้อง} = \frac{SS}{ST} \times 100 \quad (10)$$

โดยที่ SS คือ จำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ซึ่งตรวจสอบถูกต้อง

ST คือ จำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ทั้งหมด

ความเร็วเฉลี่ย (Average speed) คือ อัตราส่วนของเวลาในการประมวลผลภาพทั้งหมดกับจำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ทั้งหมด โดยนิยามตามสมการที่ (11)

$$\text{ความเร็วเฉลี่ย} = \frac{WT}{ST} \quad (11)$$

โดยที่ หน่วยเป็นวินาที

WT คือ เวลาในการประมวลผลภาพทั้งหมด

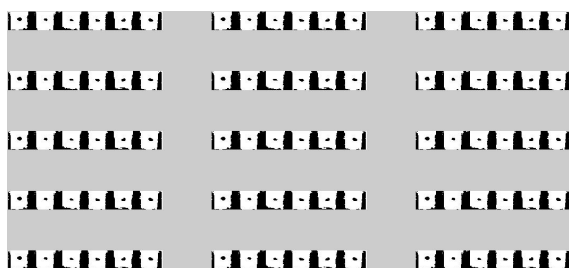
ST คือ จำนวนภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ทั้งหมด

ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้วยตัวประเมินประสิทธิภาพทั้ง 5 ค่า

ประเมินประสิทธิภาพ	วิธีการตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์		
	จัดกลุ่มด้วยเทคนิคเคมัน	ค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมโอซี	คุณลักษณะเด่นรูปเรขาคณิต
ความไว	99.83	64.61	40.21
ความละเอียด	88.89	88.89	88.89
ความแม่นยำ	99.83	99.73	99.83
ความถูกต้อง	99.66	64.97	41.12
ความเร็วเฉลี่ย (วินาที)	0.08	0.14	0.18

อภิปรายผลการทดลอง

จากตาราง 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพการตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ เห็นว่าอัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมันสามารถตรวจจับภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ถูกต้อง 589 ภาพ ผิด 2 ภาพ (รูปที่ 7) ได้ร้อยละความถูกต้องเท่ากับ 99.66, ความไวเท่ากับ 99.83, ความละเอียดเท่ากับ 88.89 และ ความแม่นยำเท่ากับ 99.83 ส่วนวิธีการค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซีสามารถตรวจจับภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ถูกต้อง 384 ภาพ ผิด 207 ภาพ ทำให้ได้ร้อยละความถูกต้องเท่ากับ 64.97, ความไวเท่ากับ 64.61, ความละเอียดเท่ากับ 88.89 และความแม่นยำเท่ากับ 99.73 สุดท้ายวิธีคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิตสามารถตรวจจับภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ถูกต้อง 242 ภาพ ผิด 349 ภาพ ได้ร้อยละความถูกต้องเท่ากับ 41.12, ความไวเท่ากับ 40.21, ความละเอียดเท่ากับ 88.89 และความแม่นยำเท่ากับ 99.83



รูปที่ 7 ตัวอย่างภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ผลการทดลองด้วยอัลกอริทึมจัดกลุ่มด้วยเคมัน 15 รูป

หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบความเร็วการประมวลผลภาพของการตรวจจับภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์เพื่อทราบเวลาประมวลผลภาพทั้งหมดและความเร็วประมวลผลภาพเฉลี่ยต่อภาพระหว่างอัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยวิธีเคมันกับวิธีการค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซีและวิธีคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิต จากผล

การทดลองกับภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ทั้งหมด 591 ภาพแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมการตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์เฉพาะอัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมันสามารถตรวจจับภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ใช้เวลาประมวลผลภาพทั้งหมด 47.56 วินาทีทำให้ความเร็วประมวลผลภาพเฉลี่ยต่อภาพเท่ากับ 0.08 วินาที ส่วนวิธีการค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซีตรวจจับภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ใช้เวลาประมวลผลภาพทั้งหมด 81.90 วินาทีทำให้ความเร็วประมวลผลภาพเฉลี่ยต่อภาพเท่ากับ 0.14 วินาที สุดท้ายวิธีคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิตตรวจจับภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ใช้เวลาประมวลผลภาพทั้งหมด 106.38 วินาทีทำให้ความเร็วประมวลผลภาพเฉลี่ยต่อภาพเท่ากับ 0.18 วินาที

สรุปผลการศึกษา

อัลกอริทึมสำหรับตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนโดยใช้อัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมัน ขั้นตอนแรกทำการเลือกบริเวณที่สนใจและตัดภาพย่อยเฉพาะบริเวณเม็ดตะกั่วจากภาพสืหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ ต่อมาอัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมันประมวลผลด้วยภาพย่อยสี่บริเวณเม็ดตะกั่ว สุดท้ายนำภาพย่อยบริเวณเม็ดตะกั่วที่ผ่านอัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมันดังกล่าวแล้วทำการทราสโฟรมและรวมด้วยวิธีเมตริกซ์เพื่อบ่งบอกจุดบกพร่องเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์จากภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ทั้งหมด 591 ภาพ แบ่งเป็นภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์สมบูรณ์ ภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์หายไปและภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ใหม่ จากการทดลองอัลกอริทึมจัดกลุ่มด้วยเคมันสามารถตรวจจับภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ถูกต้อง 589 ภาพ ผิด 2 ภาพ ได้ร้อยละความถูกต้องเท่ากับ 98.81, ความไวเท่ากับ 99.83, ความละเอียดเท่ากับ 88.89 ความแม่นยำเท่ากับ 99.83 และเวลาในการประมวลผลภาพทั้งหมด 47.56 วินาทีทำให้ความเร็วประมวลผลภาพเฉลี่ยต่อภาพเท่ากับ 0.08 วินาที

ส่วนวิธีการค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซีตรวจจับเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ถูกต้อง 386 ภาพ ผิด 205 ภาพ ด้ร้อยละความถูกต้องเท่ากับ 65.31, ความไวเท่ากับ 64.61, ความละเอียดเท่ากับ 88.89 ความแม่นยำเท่ากับ 99.73 และเวลาในการประมวลผลภาพทั้งหมด 81.80 วินาทีทำให้ความเร็วประมวลผลภาพเฉลี่ยต่อภาพเท่ากับ 0.14 วินาทีสุดท้ายวิธีคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิตสามารถตรวจจับภาพเม็ดตะกั่วบนหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ถูกต้อง 242 ภาพ ผิด 349 ภาพ ด้ร้อยละความถูกต้องเท่ากับ 41.12, ความไวเท่ากับ 40.21, ความละเอียดเท่ากับ 88.89 ความแม่นยำเท่ากับ 99.83 และเวลาในการประมวลผลภาพทั้งหมด 106.38 วินาทีทำให้ความเร็วประมวลผลภาพเฉลี่ยต่อภาพเท่ากับ 0.18 วินาทีแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมีนมีประสิทธิภาพความถูกต้อง ความไว ความละเอียดและความแม่นยำสูงกว่าวิธีการค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซีและวิธีคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิต รวมทั้งใช้เวลาในการประมวลผลภาพน้อยกว่าวิธีการค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมด้วยโอซีและวิธีคุณลักษณะเด่นด้วยรูปเรขาคณิต ทำให้อัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมีนเหมาะสมกับการตรวจจับภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์มากที่สุด ทั้งนี้ความถูกต้อง ความไว ความละเอียดและความแม่นยำของการตรวจจับภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ขึ้นอยู่กับความคมชัดของภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์และองค์ประกอบที่ได้จากการถ่ายภาพจากกล้องคุณภาพสูงเป็นสำคัญเพราะคุณภาพของภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ส่งผลต่อการประมวลผลภาพด้วยอัลกอริทึมการจัดกลุ่มด้วยเคมีนเป็นอย่างมาก

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไตร์ฟ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นและศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ขอขอบคุณทีมงานวิจัยที่ช่วยเก็บรวบรวมข้อมูลภาพหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ทั้งหมด คุณเจ้เต็ด เนียมสุวรรณ คุณวันชัย เศษกลาง และคุณนพรัตน์ ตรีรัตนวงศ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด รวมทั้งขอบคุณกำลังใจจากครอบครัวและเพื่อนๆ ทุกคน

เอกสารอ้างอิง

Alasdair Mcanddrew. *Introduction to digital image processing with matlab*. Thomson.

Al Mamun, A., G., & Bi, C. (2007). *Hard disk drive : mechatronics and control*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Chemaly, E & Vision. (1989). *Feature inspection using normalized cross correlation and mathematical morphology*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers.

Chuan-Yu, C., Chin-Huang, C., Chun-Hsi, L., & Mu Der, J. (2007, 5-7 Sept. 2007). *Learning Vector Quantization Neural Networks for LED Wafer Defect Inspection*. Paper presented at the Innovative Computing, Information and Control, 2007. ICICIC' 07. Second International Conference on.

Haed disk drive. (2011). Retrieved March 21, 2010, from <http://www.ireference.ca/search/Hard%20disk%20drive/>

Hui-Fuang, N. (2004, 18-20 Dec. 2004). *Automatic thresholding for defect detection*. Paper presented at the Image and Graphics, 2004. Proceedings. Third International Conference on.

Lin, J., Luo, S., Li, Q., Zhang, H., & Ren, S. (2009, 5-8 July 2009). *Real-time rail head surface defect detection: A geometrical approach*. Paper presented at the Industrial Electronics, 2009. ISIE 2009. IEEE International Symposium on.

Milan Sonka, Vaclav Hlavac & Roger Boyle. (2008). *Image Processing, Analysis, and Machine Vision, International Student Edition*. Thomson.

Moon, T. K., & Stirling, W. C. (2000). *Mathematical methods and algorithms for signal processing*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

P.Soiile. (2003). *Morphological Image Analysis Principles and Applications*. Springer.

Putera, S. H. I., & Ibrahim, Z. (22-24 June 2010). *Printed circuit board defect detection using mathematical morphology and MATLAB image processing tools*. Paper presented at the Education Technology and Computer (ICETC), 2010 2nd International Conference on.

Rafael C. Gonzalez & Richard. (2002). *Digital Image Processing*. Prentice-Hall.

Sa-nguannam, A., & Srinonchat, J. (2008, 26-29 Oct. 2008). *Analysis Ball Grid Array defects by using new image technique*. Paper presented at the Signal Processing, 2008. ICSP 2008. 9th International Conference on.

Vaseghi, S. V. (2000). *Advanced digital signal processing and noise reduction*. Chichester; New York: John Wiley.

Wen-Yen, W., & Chih-Chung, C. (2004, 2004). *A system for automated BGA inspection*. Paper presented at the Cybernetics and Intelligent Systems, 2004 IEEE Conference on.

Xia, N., Cao, Q., Fu, Z., & Jey, L. (2004, Apr. 27-30, 2004). *A machine vision system of ball grid array inspection on RT-Linux OS*. Paper presented at the Business of Electronic Product Reliability and Liability, 2004 International Conference on.