

ระบบวิชันสำหรับการอ่านเลขซีเรียลบนสไลด์เตอร์บาร์ในฮาร์ดดิสก์ และบาร์โค้ดบนตัวยึดจับ

Vision System for Reading Serial Numbers of Hard Disk Drive Slider Bar and Barcode on Its Fixture

บีอิง แซ่อัง^{1*} และ วุฒิพงษ์ คำวิลัยศักดิ์²

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
บางมด ทุ่งครุ 10140

²ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
บางมด ทุ่งครุ 10140

Bee-ing Sae-ang¹ and Wuttipong Kumwilaisak²

¹Electrical and Computer, Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, Thung Khru,
Bangkok, 10140, Thailand

²Electronics and Telecommunication, Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod,
Thung Khru, Bangkok, 10140, Thailand

*Corresponding Author E-mail: beeying.s@gmail.com

Received: Mar 09, 2023; Revised: Aug 10, 2023; Accepted: Aug 18, 2023

บทคัดย่อ

การตรวจสอบย้อนกลับชิ้นงานเป็นส่วนสำคัญที่จำเป็นในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมยุคใหม่ รวมถึงในอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ หัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์เป็นส่วนสำคัญที่กำหนดสมรรถนะการอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ และมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนและมากขึ้นตอน ตั้งแต่การทำให้แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์เปลี่ยนผ่านไปเป็นแท่งสไลด์เตอร์และกลายเป็นหัวอ่านในขั้นตอนสุดท้าย ส่งผลอย่างยิ่งให้ต้องมีการตรวจสอบย้อนกลับชิ้นงานเพื่อให้สามารถระบุตัวลูกบิดเครื่องจักรและกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับฮาร์ดดิสก์แต่ละตัว งานวิจัยนี้เรามุ่งเน้นในการอ่านเลขซีเรียลของหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์และบาร์โค้ดบนตัวยึดจับ ก่อนที่จะถูกส่งเข้ากระบวนการจัด ความท้าทายในงานนี้อยู่ที่ตัวเลขซีเรียลมีขนาดเล็กประมาณ 18×30 ไมครอน และการสะท้อนแสงที่ต่ำส่งผลต่อความคมชัดของมัน งานวิจัยนี้จึงต้องออกแบบระบบรับภาพที่เหมาะสม นอกจากนี้ข้อจำกัดของระบบรับภาพกำลังขยายสูงคือระยะชัดลึกที่จำกัดทำให้ไม่สามารถครอบคลุมความผันแปรของระยะวัตถุของสไลด์เตอร์ซึ่งกำหนดโดยพิกัดที่ข้อมรับได้ของตัวยึดจับ เราจึงได้ออกแบบระบบทางแสงที่สามารถปรับตัวเองได้โดยอัตโนมัติโดยใช้เลนส์ของเหลวร่วมกับอัลกอริทึมการประมวลผลภาพที่ประเมินและปรับระยะโฟกัส ซึ่งระบบของเราจะต้องถูกนำไปติดตั้งกับเครื่องจักรที่มีอยู่แล้ว และมีพื้นที่ติดตั้งจำกัด เราจึงต้องออกแบบชิ้นส่วนเป็นการเฉพาะ ทำให้สามารถจัดการกับข้อจำกัดที่ได้กล่าวมาข้างต้น ระบบนี้ได้รับการทดสอบในกระบวนการผลิตจริงและมีความแม่นยำในการอ่านเลขซีเรียลได้ 98% และบาร์โค้ด 90% โดยข้อผิดพลาดส่วนใหญ่ของการอ่านบาร์โค้ดมาจากคุณภาพของตัวมันที่ผ่านการใช้งานและทำความสะอาดซ้ำๆ ในกระบวนการผลิต

คำสำคัญ: ระบบแมชชีนวิชัน, การประมวลผลภาพ, การปรับโฟกัสอัตโนมัติ, เลนส์ของเหลว

Abstract

Part traceability is one of the inevitable requirements in most modern manufacturing processes. In a hard disk drive (HDD), magnetic head dictates the performance of read/write operations. A number of manufacturing processes are involved to transform a wafer disc to slider bars and finally gliding sliders of the head. In this work, we concentrate on reading serial numbers of slider bar and its attached fixture prior to a bar-lapping process. Since the serial numbers on a bar are in the scale of 18x30 microns and their reflectance nature is rather poor, special optics and lighting components are required. As nature of high optical magnification with limited depth of focus (DOF), conventional image acquisition system can not cover the bar attachment position variation due to wide tolerance of the slider bar fixture. We proposed a serial number reading system using autofocus module to cope with it. Liquid lens and image processing algorithms are introduced to evaluate and adjust the focus automatically. Since our system has to be augmented to an existing machine, footprint is also another main concern. We therefore designed a special rig so the system meets all the fore-mentioned requirements. The system was tested in the production line and had 98% and 90% accuracy for serial number and barcode decoding, respectively. The main cause of barcode reading inaccuracy was from many cycles of the fixture reuse and cleaning in the production line.

Keywords: Machine vision system, Image processing, Autofocus, Liquid Lens

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ มีการนำเอาระบบวิชั่นเข้ามาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย[1],[2] เนื่องจากมีความแม่นยำ รวดเร็ว และติดตามข้อมูลล่างจากข้อมูลที่เป็นในรูปแบบดิจิทัล จึงสามารถทำให้ผู้ผลิตเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ช่วยเพิ่มกำลังผลิต ลดต้นทุนค่าเสียโอกาสจากการผลิตที่ส่งมอบได้เร็วขึ้น และด้วยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตสามารถติดตามได้ เป็นผลให้เกิดการแก้ไขปรับปรุงให้ดีขึ้นได้เรื่อยๆ เพิ่มขีดจำกัดในการแข่งขัน

เนื่องจากการผลิตฮาร์ดดิสก์ คอนข้างมีกระบวนการที่ซับซ้อน มีชิ้นส่วนทั้งวงจรอิเล็กทรอนิกส์และอื่น ๆ มากมาย ที่มีขนาดเล็กและมีความท้าทาย จึงมีหลายงานวิจัยพยายามที่จะพัฒนาระบบวิชั่นเพื่อมาใช้กับฮาร์ดดิสก์ ยกตัวอย่างเช่น การนำระบบวิชั่นมาจัดตำแหน่งสายเคเบิลแบบยืดหยุ่น (flex cable) บนแขนยึดจับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Head suspension)[3] ซึ่งได้นำเอาวิธีประมวลผลภาพมาหาตำแหน่งของสายเคเบิลแบบยืดหยุ่นกับแผ่นบัคกรี โดยการคำนวณหาลักษณะรูปร่างของวัตถุที่ต้องการจากขอบของวัตถุ หรือการนำเอาระบบวิชั่นไปตรวจสอบคุณภาพของอุปกรณ์ Piezoelectric actuator ที่ควบคุมการอ่านเขียนของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์[4] โดยใช้เทคนิคของการแยกส่วนของสีเข้มที่เป็นรอยร้าวออกจากพื้น

หลังที่เป็นตัวอุปกรณ์ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานในการอ่านเขียน นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ตรวจสอบคุณภาพรอยเชื่อมในกระบวนการ Head Gimbal Assembly[5] ที่เป็นการเชื่อมต่อหัวอ่านเขียนเข้ากับแขนยึดจับ โดยการใช้อัลกอริทึมประมวลผลภาพคำนวณค่าพีเออร์ออกมา 8 ค่า แล้วนำไปคัดแยกโดยการใช้ Bayesian Network

สำหรับงานวิจัยพัฒนาระบบวิชั่นเพื่อนำไปใช้งานกับหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ ซึ่งเป็นอีกหนึ่งชิ้นส่วนหลักได้แก่ การพัฒนาอัลกอริทึมประมวลผลภาพในการตรวจสอบคุณภาพของ Pole tip[6] ซึ่งเป็นบริเวณสำคัญที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ ในงานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการตรวจจับการกักร้อนที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีที่นำเอาอัลกอริทึมประมวลผลภาพมาเปรียบเทียบรูปร่างที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการกักร้อน และการพัฒนาอัลกอริทึมการปรับโฟกัสอัตโนมัติสำหรับอ่านหมายเลขซีเรียล[7] ที่นำเอาเทคนิคการทำ image matching ในภาพเบลอ และการวัดค่าคะแนนความชัดของภาพ เพื่อปรับระยะ โฟกัสให้สามารถให้ภาพที่คมชัด แม้ว่าวัตถุจะอยู่นอกระยะ โฟกัสของระบบรับภาพ

ในระบบรับภาพที่มีกำลังขยายสูง ระยะชัดลึกของระบบเหล่านี้มักจะน้อย ไม่ครอบคลุมกับช่วงระยะวัตถุที่

สามารถเปลี่ยนแปลงได้ จึงต้องมีระบบปรับโฟกัสแบบอัตโนมัติ และมีสูตรวัดความคมชัดที่เหมาะสมในแต่ละจุดประสงค์ของงาน ในงานวิจัยของการสังเกตพฤติกรรมของเมล็ดพืช[8] ได้ใช้ Normalized variance ในการวัดความคมชัดของภาพ แล้วก็พยายามโมเดลค่าความคมชัดเป็นกราฟรูปลิ่มเพื่อทำนายระยะโฟกัสได้แม่นยำ นอกจากนี้การโมเดลกราฟของค่าความคมชัดแล้ว ในงานวิจัยสำหรับการปรับระยะโฟกัสด้วยระบบมอเตอร์[9] ได้ใช้เทคนิค Fibonacci search เพื่อหาระยะโฟกัส ในงานของการระบุตำแหน่งเซลล์[10] ได้ใช้เทคนิค Sum-Modulus-Difference (SMD) เพื่อวัดความคมชัดของภาพ และสำหรับการหาระยะโฟกัสนั้น ได้ใช้การหาโฟกัสแบบหยابก่อน จากนั้นจึงหาระยะโฟกัสแบบละเอียดเพื่อที่จะเพิ่มความเร็วในการหาระยะโฟกัส และสุดท้าย ในงานถ่ายภาพเกสรดอกไม้ที่มีขนาดเล็กมากด้วยกล้องไมโครสโคป[11] ในงานนี้ได้ใช้สองเลนส์ที่มีกำลังขยายต่ำและสูง เลนส์กำลังขยายต่ำใช้เพื่อจับภาพกว้างๆ แล้วใช้เลนส์กำลังขยายสูงในการระบุตำแหน่งของเกสรดอกไม้แบบละเอียดอีกที

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งไปที่กระบวนการที่นำเอาสไลด์เดอร์บาร์ ที่ประกอบด้วยตัวสไลด์เดอร์ หรือหัวอ่านฮาร์ดดิสก์หลายๆตัวมาเรียงต่อกันเป็นแนวยาว ส่งเข้าสู่กระบวนการจัดก่อนที่จะถูกตัดเป็นชิ้นเล็กๆแล้วประกอบเข้าเป็นฮาร์ดดิสก์ต่อไป เนื่องจากสไลด์เดอร์บาร์เล็กและบอบบางมาก จึงต้องถูกติดกับตัวยึดจับ ในปัจจุบัน การติดกับตัวยึดจับจะถูกส่งไต่กล้องกำลังขยายสูง เพื่อติดตามว่าสไลด์เดอร์บาร์เลขซีเรียลอะไร ถูกติดกับตัวยึดจับตัวไหน เพราะการติดตามเลขซีเรียลบนตัวยึดจะไม่ต้องการกล้องกำลังขยายสูงจับ และจะอ่านจะง่ายกว่าไปอ่านเลขซีเรียลบนสไลด์เดอร์บาร์โดยตรง ในการนำเอาระบบแมชชีนวิชั่นมาใช้ในขั้นตอนนี้ จะทำให้ลดเวลาลงได้มาก และลดการใช้แรงคนนำชิ้นงานไปส่งไต่กล้องไมโครสโคปที่อยู่ยากกว่ามาก

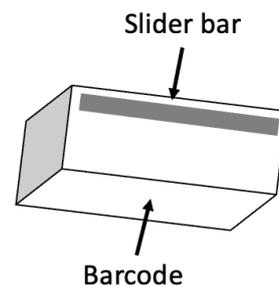
เรานำเสนอระบบที่มีขนาดเล็ก โดยการนำเอา Liquid Lens ที่สามารถปรับระยะโฟกัสได้ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าชุดมอเตอร์ปรับระยะโฟกัสมาก และได้ออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์ให้ประหยัดพื้นที่ลง สำหรับในส่วนของซอฟต์แวร์นั้น เพื่อให้ได้ภาพที่เหมาะสมในการอ่านเลขซีเรียลจึงมี

การคำนวณค่าความคมชัดจากบริเวณตัวอักษร ในการอ่านบาร์โค้ดที่มีความจางหรือพื้นหลังสีไม่เรียบ ก็ได้ขั้นตอนนี้การปรับภาพให้ดีขึ้นเพื่อสามารถอ่านบาร์โค้ดได้มากขึ้น รายละเอียดต่างๆถูกแบ่งเป็นหัวข้อตามนี้ ในหัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และระบบรับภาพ หัวข้อที่ 3 จะแสดงรายละเอียดของซอฟต์แวร์อ่านเลขซีเรียล หัวข้อที่ 4 แสดงวิธีการประมวลผลภาพเพื่ออ่านบาร์โค้ด และหัวข้อที่ 5 และ 6 แสดงรายละเอียดของผลการทดลองและสรุปตามลำดับ

2. การออกแบบอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์

สไลด์เดอร์บาร์ หรือหัวอ่านเขียนจำนวนหนึ่งที่ถูกเรียกเป็นแท่งยาวและยังไม่ถูกตัดเป็นชิ้นเล็ก ซึ่งจะมีขนาดไม่ใหญ่ จึงจำเป็นต้องถูกยึดติดกับอุปกรณ์ยึดจับ(รูปที่ 1) สำหรับการนำไปเข้าเครื่องจักรเพื่อกระบวนการจัดต่อไป ระบบแมชชีนวิชั่นที่ออกแบบนี้ จะต้องสามารถอ่านเลขซีเรียลบนสไลด์เดอร์บาร์และตัวยึดจับในเวลาเดียวกัน

สไลด์เดอร์บาร์ เนื่องจากมีขนาดเล็กมาก จึงต้องมีอุปกรณ์ยึดจับก่อนที่จะถูกส่งไปในกระบวนการถัดไป ซึ่งจะถูกแปะติดกับตัวยึดจับในตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 1 และหัวลูกศรแสดงทิศทางของกล้องจะต้องส่องลงมาจากทิศทางข้างบนและข้างล่าง และทั้งสองอย่างนั้นต้องการระบบรับภาพที่กำลังขยายไม่เท่ากัน



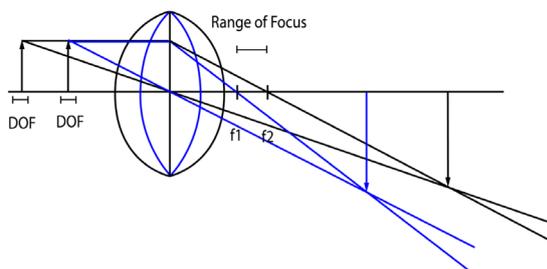
รูปที่ 1 ตำแหน่งของสไลด์เดอร์และบาร์โค้ดบนตัวยึดจับ

การออกแบบอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์สามารถแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนของอุปกรณ์รับภาพและส่วนของชุดตัวยึดอุปกรณ์รับภาพ

2.1 อุปกรณ์ระบบรับภาพ

การอ่านบาร์โค้ดนั้นสามารถใช้อุปกรณ์ทั่วไปได้ เพียงแต่ต้องมีขอบเขตของภาพ (Field of View) ครอบคลุม บาร์โค้ด และในงานวิจัยนี้ก็ได้เลือกใช้กล้อง Basler acA1300-30gm ขนาด 1 ล้านพิกเซล เลนส์ VS-MC15 กำลังขยาย 0.03x และไฟ Bar light (Red) VL-B05015R สำหรับสไลด์นั้น เนื่องจากสไลด์เดอร์มีขนาดเล็ก และมีขนาดของตัวอักษรประมาณ 18×30 ไมครอน จึงต้องเลือกใช้กล้องและเลนส์กำลังขยายสูง มีขอบเขตของภาพไม่ต่ำกว่า ได้ภาพที่มีตัวอักษรอยู่ที่กว้างไม่ต่ำกว่า 15 พิกเซล ยาวไม่ต่ำกว่า 20 พิกเซล.

เนื่องจากเลนส์ที่มีกำลังขยายสูงจะมีระยะชัดลึก (Depth of Field) ที่ต่ำมาก ซึ่งเลนส์ที่จะนำมาทดสอบที่กำลังขยาย 3x, 4x, 2Hx และ 4Hx มีค่า DOF เพียง 220, 140, 150 และ 100 ไมครอนตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าระดับความแปรผันของความสูงที่เป็นไปได้ของสไลด์เดอร์บาร์ที่จะถูกติดบนตัวยึดจับ ที่ต้องสามารถครอบคลุมระยะทั้งหมด 344.5 ไมครอน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบประโฟกัสอัตโนมัติที่จะสามารถปรับโฟกัสให้เหมาะสมกับแต่ละระยะ แต่เนื่องจากพื้นที่จำกัด จึงไม่สามารถใช้ระบบปรับโฟกัสที่เป็นแบบเมคคานิกส์ได้ ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกใช้ Liquid lens ต่อเพิ่มเติมจากเลนส์กำลังขยายสูงตัวเดิม ที่ปรับระยะโฟกัสจากการปรับรูปร่างของเลนส์ ดังรูปที่ 2

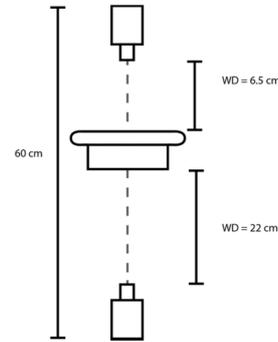


รูปที่ 2 ตำแหน่งระยะโฟกัสที่แตกต่างกันตามรูปร่างของเลนส์

2.2 ชุดตัวยึดอุปกรณ์รับภาพ

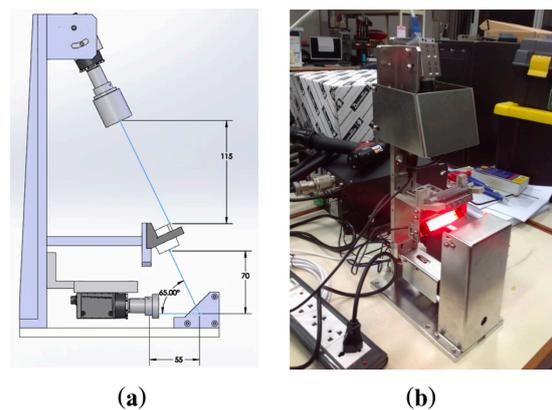
เนื่องจากพื้นที่สำหรับการติดตั้งเครื่องมีขนาด กว้างxยาว x สูง เท่ากับ $17 \times 22 \times 50$ cm กล้องสำหรับอ่านเลขซีเรียลต้องการระยะภาพที่ 6.5 cm และกล้องสำหรับอ่านบาร์โค้ด

ต้องการระยะภาพอยู่ที่ 22 cm ซึ่งเมื่อนำระยะทั้งหมดของกล้องทั้งสองตัวรวมขนาดของกล้องมารวมกัน จะได้ระยะ 60 cm ซึ่งเกินจากความสูงที่กำหนดไว้ดังรูปที่ 3 เราจึงนำเอาระยะมาใช้ เพื่อหักเส้นทางของแสง และลดความสูงลงจนสามารถติดตั้งเครื่องเข้าไปภายในระยะที่จำกัดได้



รูปที่ 3 แสดงระยะความสูงของกล้องทั้งสองตัวรวมกัน

จากแผนภาพในรูปที่ 4(a) เราสามารถวางแผ่นกระจกไว้ข้างหน้ากล้องเพื่อหักทิศทางของแสง แล้วกล้องจับภาพของบาร์โค้ดผ่านกระจกแทนที่จะจับภาพของบาร์โค้ดโดยตรง โดยวางกระจกในมุม 65° และระยะผลรวมทั้งหมดของทางเดินแสงที่ถูกหักทิศทาง จะต้องเท่ากับ 22 cm และชุดยึดจับที่ทำออกมาจริงแสดงไว้ในรูปที่ 4(b)



รูปที่ 4 ชุดยึดจับอุปกรณ์รับภาพ (a) ภาพแบบร่างของชุดยึดจับอุปกรณ์รับภาพ (b) ชุดยึดจับอุปกรณ์รับภาพที่สร้างตามแบบ

3. การอ่านรหัสบนสไลด์เดอร์

เนื่องจากระยะชัดลึกของเลนส์มีจำกัด และนำเอา Liquid Lens มาใช้เพื่อที่จะปรับระยะโฟกัส เราจึงต้องมีอัล

กอธิทิมในการระบุตำแหน่งที่ต้องการโฟกัส ซึ่งก็คือบริเวณตัวอักษร และคำนวณค่าความคมชัดเพื่อส่งสัญญาณ ไปปรับ Liquid Lens ให้มีทางยาวโฟกัสที่เหมาะสม

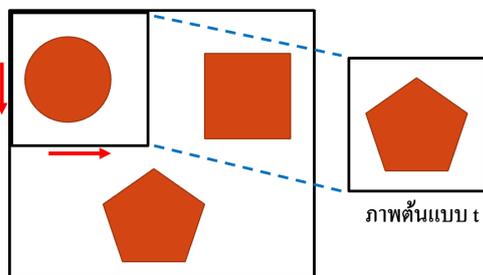
3.1 การหาตำแหน่งสไลด์เตอร์ในภาพ

เนื่องจากชิ้นงานที่มาปรากฏได้กล้องจะไม่ได้อยู่ที่เดิมทุกครั้ง จึงต้องมีอัลกอธิทิมในการระบุตำแหน่งของชิ้นงานภายในภาพ ตอนแรก ภาพที่มาปรากฏจะยังเบลอ เพราะไม่ได้อยู่ในโฟกัส ในการหาตำแหน่งของชิ้นงานนั้น เราจำเป็นต้องมีภาพต้นแบบ ซึ่งเป็นภาพของชิ้นงานที่ต้องการจะหา และภาพที่มีชิ้นงานวางอยู่ ณ ตำแหน่งใดๆ ในภาพ โดยทั่วไปนั้น จะเริ่มต้นจากตัดส่วนหนึ่งของภาพที่มีชิ้นงานอยู่ให้มีขนาดเท่ากับภาพต้นแบบ เพื่อเทียบความเหมือนกัน ภาพใหญ่จะถูกตัดให้มีขนาดเท่ากับภาพต้นแบบ โดยการเปลี่ยนตำแหน่งไปเรื่อยๆ เพื่อนำมาเทียบกับภาพต้นแบบ ดังที่แสดงในรูปที่ 5 และ ณ ตำแหน่งที่มีคะแนนความคล้ายกับภาพต้นแบบที่สุด จะเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้ เราใช้วิธี Normalized Cross Correlation (NCC) เพื่อคำนวณค่าคะแนนความคล้าย หากมีภาพต้นแบบ t มีขนาด $L \times K$ เราสามารถคำนวณค่า NCC ที่ระหว่างภาพต้นแบบ t และภาพที่ต้องการหาตำแหน่ง f โดยที่ถูกตัดภาพให้มีขนาด $L \times K$ ที่พิกเซล (i, j) ได้จากสมการที่ (1)

$$NCC(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{x,y} \frac{1}{\sigma_f \sigma_t} (f(x, y) - \mu_f) (t(x, y) - \mu_t) \quad (1)$$

โดยที่ μ_f และ μ_t คือค่าเฉลี่ยของความเข้มแสงของภาพที่ต้องการหาชิ้นงานและภาพต้นฉบับ



รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างภาพต้นแบบและภาพที่ต้องการหาชิ้นงาน

เมื่อทราบตำแหน่งของชิ้นงานในภาพแล้ว จึงสามารถดีกรอบบริเวณตัวอักษรเพื่ออ่านซีเรียลได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 6 และเนื่องจากยังเป็นภาพที่เบลอ จึงจำเป็นต้องปรับความคมชัดของภาพเพื่อส่งสัญญาณกลับไปให้ Liquid Lens เพื่อปรับระยะโฟกัส ในที่นี้เราวัดความคมชัดของภาพจากบริเวณของตัวอักษรเป็นหลัก หรือบริเวณที่ถูกรอบในรูปที่ 6



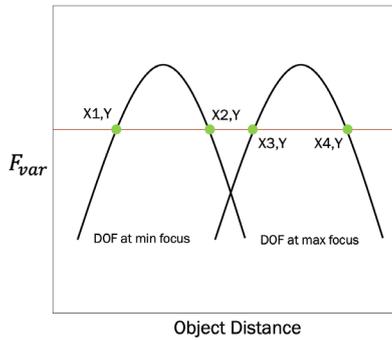
รูปที่ 6 ภาพส่วนหนึ่งของสไลด์เตอร์ และบริเวณตัวอักษรที่ต้องการอ่าน

3.2 การปรับโฟกัสอัตโนมัติ

เมื่อได้บริเวณของตัวอักษรแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการวัดคะแนนความคมชัด (F_{var}) ของภาพในบริเวณตัวอักษร โดยการคำนวณค่าความแปรปรวนของค่าความเข้มแสงในบริเวณนั้น ดังสมการที่ (2)

$$F_{var} = \frac{1}{N-1} \sum_x \sum_y (I(x, y) - \mu)^2 \quad (2)$$

หากค่า F_{var} มาก ความคมชัดของภาพบริเวณนั้นก็ยิ่งมาก ซึ่งค่า F_{var} นี้ สามารถนำมาวัดระยะชัดทั้งหมด (Range of Focus: ROF) ของระบบได้ด้วย โดยการคิดล้องกับแกนมอเตอร์ที่สามารถเลื่อนล้องขึ้นลงได้ แล้วปรับให้ Liquid Lens มีระยะทางยาวโฟกัสสั้นที่สุดและยาวที่สุด แล้ววัดระยะที่ยังสามารถเลื่อนล้องแล้วให้ภาพที่มีค่า S.D. มากระดับหนึ่งได้ จากรูปที่ 7 หากเราปรับค่าระยะทางยาวโฟกัสสั้นที่สุด ระบบก็จะให้ภาพชัดที่ระยะหนึ่ง และมีระยะชัดลึกที่ระยะนั้นเท่ากับ $X2 - X1$ ในทางกลับกัน หากเราปรับค่าระยะทางยาวโฟกัสยาวที่สุด ระบบก็จะให้ภาพที่ชัดเพียงพอในช่วงระยะ $X4 - X3$ ดังนั้นค่าระยะชัดทั้งหมดของระบบ (ROF) จึงเท่ากับ $X4 - X1$



รูปที่ 7 ค่า S.D. เมื่อปรับ Liquid Lens ไปที่ระยะทางยาว โฟกัสที่สั้นที่สุดและยาวที่สุด

สำหรับการปรับ Liquid Lens เพื่อให้ได้ระยะโฟกัสที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Golden section search อัลกอริทึมจะคำนวณหาตำแหน่งระยะวัตถุที่ให้ค่า F_{var} สูงที่สุด โดยมีการปรับไปที่ระยะต่างๆแล้วคำนวณค่า F_{var} อย่างมีแบบแผน ซึ่งจะแสดงขั้นตอนทั้งหมดใน pseudo-code ดังอัลกอริทึม 1

อัลกอริทึม 1: Golden Section Search based Autofocus

Input: x_l = ค่าระยะวัตถุที่ต่ำที่สุด

Input: x_u = ค่าระยะวัตถุที่สูงที่สุด

Input: \mathcal{E} = ระยะความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

Output: x^* = ระยะโฟกัสที่เหมาะสม

$r = 0.61803$

$x_1 = x_l + r * (x_u - x_l)$

$x_2 = x_u - r * (x_u - x_l)$

$y_1 \leftarrow \text{FocusMeasure}(x_1)$

$y_2 \leftarrow \text{FocusMeasure}(x_2)$

while $|x_u - x_l| \geq \mathcal{E}$ do

if $y_1 > y_2$ then $x_l = x_2$

$x_2 = x_1$

$x_1 = x_l + r * (x_u - x_l)$

$y_2 = y_1$

$y_1 \leftarrow \text{FocusMeasure}(x_1)$

else

$x_u = x_1$

$x_1 = x_2$

$x_2 = x_u - r * (x_u - x_l)$

$y_1 = y_2$

$y_2 \leftarrow \text{FocusMeasure}(x_2)$

end if

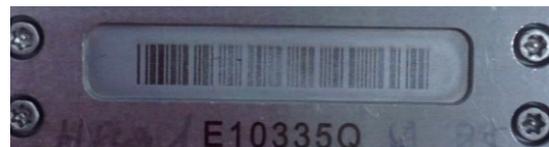
end while

$x^* = (x_u + x_l)/2$

ในที่นี้ ฟังก์ชัน FocusMeasure ก็คือการคำนวณหาค่า F_{var} ที่ถูกกล่าวมาแล้วในช่วงต้น หลังจากที่ได้ภาพที่คมชัดเพียงพอแล้ว เราใช้โปรแกรม Halcon เวอร์ชัน 11 ในการอ่านตัวอักษร ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่เหมาะสมกับการใช้อ่านตัวอักษรที่มีฟอนต์ในเชิงอุตสาหกรรม

4. การอ่านบาร์โค้ดบนตัวยึดจับ

เนื่องจากสไลด์เดอริบาร์มีขนาดเล็ก หากต้องการติดตามชิ้นงานในการเข้ากระบวนการถัดไป จะเป็นการง่ายกว่ามากที่จะอ่านบาร์โค้ดที่อยู่บนตัวยึดจับ เพราะอุปกรณ์รับภาพไม่จำเป็นต้องมีกำลังขยายสูง ฉะนั้น เราจึงจำเป็นต้องทราบว่าสไลด์เดอริบาร์ในรหัสนั้นๆถูกติดอยู่กับตัวยึดจับที่มีรหัสไหน และสามารถอ่านรหัสจากอุปกรณ์ยึดจับได้จากบาร์โค้ดบนตัวอุปกรณ์ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 8 เมื่อทราบแล้ว ก็สามารถที่จะติดตามสไลด์เดอริบาร์จากระหัสบนตัวยึดจับแทนได้



รูปที่ 8 แสดงบาร์โค้ดที่อยู่บนอุปกรณ์ยึดจับ

โดยปกติทั่วไปแล้วอุปกรณ์ยึดจับมีการวนใช้หลายครั้งผ่านกระบวนการล้างและคอนสารเคมีบ่อยครั้ง บาร์โค้ดก็จะมีจางลงบ้างในตัวยึดจับบางตัว หรือแม้กระทั่งมีสีพื้นหลังที่ไม่สม่ำเสมอ การที่จะนำไปอ่านบาร์โค้ดโดยตรงจะทำให้อ่านไม่ได้ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับแก้ภาพก่อนที่จะนำไปอ่านบาร์โค้ด

ในการแก้ไขสีพื้นหลังไม่เรียบ ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการลบพื้นหลังออกจากภาพต้นฉบับ ภาพพื้นหลังคือภาพที่

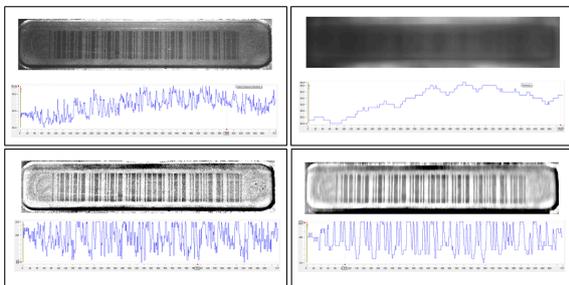
ผ่าน mean filter และสามารถคำนวณค่าความเข้มแสงในแต่ละพิกเซลได้ดังสมการที่ (3)

$$f(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{(s,t) \in S_{xy}} g(s, t) \quad (3)$$

โดยที่ m, n คือความกว้างและยาวของ kernel ซึ่งกำหนดให้มีค่ามาก จำนวนพิกเซลใน S_{xy} ที่นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยมาก ภาพผลลัพธ์ก็จะมีความเบลอมากขึ้น ซึ่งในงานนี้ เราเซตค่า $m = n = 20$ ซึ่งจะทำให้เบลอรายละเอียดที่เป็นแท่งบาร์โค้ดทิ้งไป เหลือแค่สีของพื้นหลังที่ไม่สม่ำเสมอ จากนั้นนำเอาภาพต้นฉบับมาลบกับภาพที่ได้จาก mean filter ก็จะเน้นแท่งบาร์โค้ดที่จางให้เด่นชัดมากขึ้นแต่ยังอาจจะมีขอบที่ไม่เรียบ จึงนำไปผ่าน median filter ดังสมการที่ (4) เพื่อให้แท่งบาร์โค้ดมีขอบที่คมชัด และสีสม่ำเสมอมากขึ้น

$$f(x, y) = \text{median}_{(s,t) \in S_{xy}} g(s, t) \quad (4)$$

สำหรับ medial filter จะกำหนดขนาด kernel กว้างและยาวไม่เท่ากัน โดยที่ $m = 3, n = 10$ เพราะแท่งบาร์โค้ดจะมีความยาวมากกว่าความกว้าง ซึ่งการกำหนดให้ความยาวของ kernel ให้มีค่าที่มาก จะทำให้สีของแท่งบาร์โค้ดมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดขึ้นจากกราฟ line profile หรือเส้นที่มีความกว้าง 1 พิกเซลพาดผ่านภาพบริเวณบาร์โค้ดในแนวนอน แล้วนำเอาค่าความเข้มแสงของเส้นนั้นไปพล็อตกราฟดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ภาพ Line profile ของขั้นตอนต่างๆ

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าภาพซ้ายบนซึ่งเป็นภาพที่ไม่ผ่านการคำนวณอะไรเลย จะมีลักษณะกราฟที่มีแท่งบาร์โค้ดแต่

สีไม่สม่ำเสมอ และรูปทางด้านขวาบนเป็นภาพที่ผ่าน mean filter จึงได้กราฟที่เป็นสีของพื้นหลัง และเมื่อนำภาพซ้ายบนมาลบกับขวาบน จะได้รูปทางซ้ายล่าง ที่แท่งบาร์โค้ดมีความชัดเจนมากขึ้น พื้นหลังสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งก็สะท้อนไปในกราฟ line profile ส่วนรูปทางขวาล่าง คือภาพที่ผ่าน median filter ก็จะได้แท่งบาร์โค้ดที่เรียบมากขึ้น และสะท้อนไปในกราฟ line profile ที่มีลักษณะเรียบขึ้นเช่นกัน จากนั้นใช้ซอฟต์แวร์ Halcon เวอร์ชัน 11 ในการอ่านบาร์โค้ดจากรูปภาพ

5. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ระบบรับภาพที่มีการติดตั้ง Liquid Lens เข้าไปเพิ่มเติม นั้น ไม่ได้มีสำเร็จรูปในท้องตลาด จึงจำเป็นต้องทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้ได้ภาพที่สามารถนำไปประมวลผลต่อได้อย่างเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ เครื่องอ่านซีเรียลบนสโตนเดอร์บาร์และบาร์โค้ดบนตัวยึดจับ ถูกเอาไปทดสอบการใช้งานในโรงงานผลิตฮาร์ดดิสก์เป็นระยะเวลาสามเดือน ซึ่งในแต่ละวันจะอ่านซีเรียลและบาร์โค้ดไปไม่น้อยกว่าพันชิ้น

5.1 อุปกรณ์ของระบบรับภาพ

ในการทดลองนี้ จะเลือกใช้อุปกรณ์กล้องและเลนส์ที่เงื่อนไขดังนี้

1. ระยะที่อยู่ในโฟกัสทั้งหมดจะต้องครอบคลุม 340 ไมครอน
2. ขนาดของตัวอักษรที่ได้จากภาพจะต้องกว้างไม่ต่ำกว่า 15 พิกเซล และสูงไม่ต่ำกว่า 20 พิกเซล
3. จะต้องมีความคมชัดของภาพสโตนเดอร์บาร์ ที่ครอบคลุมจำนวนสโตนเดอร์บาร์ขึ้นต่ำสองตัว

5.1.1 การทดสอบชุดเลนส์

ในตารางที่ 1 ทดลองใช้เลนส์ที่มีกำลังขยายและรุ่นต่างๆ โดยที่ 3x และ 4x คือเลนส์ที่มีกำลังขยาย 3 เท่าและ 4 เท่า ในขณะที่ 2Hx และ 4Hx คือเลนส์ที่มีกำลังขยาย 2 เท่าและ 4 เท่า แต่ภาพที่ได้จะมีคุณภาพความคมชัดมากกว่าสำหรับแถวแรกในตารางคือค่าระยะชัดทั้งหมดที่สามารถปรับได้จาก Liquid Lens แถวที่สองและสามคือค่าระยะชัดลึกเมื่อปรับระยะทางยาวโฟกัสสั้นที่สุดและยาวที่สุด แถวที่สามคือระยะชัดลึกของเลนส์เมื่อไม่มี Liquid Lens และแถวสุดท้ายคือขอบเขตของภาพ

ในการทดลองหาระยะชัดลึก เราจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถเลื่อนระบบรับภาพได้ในระยะที่ค่อนข้างละเอียด และในที่นี้เราใช้แกน Linear Robot ซึ่งสามารถเคลื่อนระบบรับภาพในแกนที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงานได้ละเอียดที่สุด 10 ไมครอน ระบบทดสอบระยะชัดลึกได้แสดงไว้ในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ภาพอุปกรณ์ทดสอบเพื่อค่า DOF และ ROF

สำหรับการวัดค่า DOF นั้นจะทำโดยการที่เลื่อนแกนเคลื่อนที่กล้องเข้าหาชิ้นงานแล้วหาช่วงให้ค่า F_{var} หรือค่าวัดความชัดของบริเวณเลขซีเรียลในภาพที่ยังอยู่ในเกณฑ์ภาพชัด หรือมีค่า F_{var} ไม่ต่ำกว่า 28.0 ทำนองเดียวกันกับการทดลองหาค่า ROF จุดที่แตกต่างคือ การหาค่า ROF จะมีการปรับค่าทางยาวโฟกัสของเลนส์ เพื่อหาช่วงระยะที่ภาพยังชัด ทั้งของค่าทางยาวโฟกัสมาก และค่าน้อยที่สุด

ตารางที่ 1 ระยะภายในโฟกัสและขอบเขตของภาพของเลนส์ชนิดต่างๆ

Mag.	3x	4x	2Hx	4Hx
ROF (μm)	370	360	680	240
DOF at min focus (μm)	220	140	150	100
DOF at max focus (μm)	220	140	155	100
DOF without liquid lens (μm)	250	235	160	100
FOV (number of sliders)	1.5	1.5	2	1.5

จากตารางจะเห็นได้ว่า ยิ่งเลนส์มีกำลังขยายสูงขึ้นเท่าไร ก็จะยิ่งมีระยะชัดลึก (DOF) น้อยลงเท่านั้น และหากเลนส์ให้ภาพที่มีความคมชัดสูงกว่า ก็จะทำให้ระยะชัดลึกลดตามลงไปด้วย สังเกตที่เลนส์กำลังขยายเท่ากัน 4x มี

ค่าระยะชัดลึกมากกว่าเลนส์ 4Hx และหากเราต่อ Liquid Lens เพิ่มเข้าไปในระบบรับภาพ ระยะชัดลึก (DOF) ของระบบจะลดลง เนื่องจากมีชิ้นอุปกรณ์ที่มาขวางทางเดินแสงเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม Liquid Lens ก็สามารถชดเชยได้ เนื่องจากระยะชัดทั้งหมด (ROF) เพิ่มขึ้น แต่ในที่นี้จำเป็นต้องตัดตัวเลือกกำลังขยาย 4Hx ออกไป เนื่องจากไม่สามารถครอบคลุมระยะขั้นต่ำ 340 ไมครอนได้ และจากแถวสุดท้ายของตาราง เลนส์ 2Hx เท่านั้นที่สามารถให้ภาพที่ครอบคลุม 2 สไลด์เดอร์ เลนส์ 2Hx จึงเป็นเลนส์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบของเรา

5.1.2 การทดลองความละเอียดของกล้อง

เมื่อได้เลนส์แล้ว จากนั้นทำการทดลองเพื่อหากล้องที่มีความละเอียดที่เหมาะสมที่สุด และมีจำนวนพิกเซลที่เพียงพอ สำหรับตัวเลขซีเรียลขนาด 18×30 ไมครอน ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2 หากจำนวนพิกเซลน้อยเกินไป ก็จะทำให้้อลกริที่มอ่านตัวอักษรได้แม่นยำน้อยลง แต่หากมีจำนวนพิกเซลมากเกินไป ก็จะต้องใช้ทรัพยากรประมวลผลที่มากขึ้น เนื่องจากมีข้อมูลต่อรูปที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 ขนาดของตัวอักษรในรูปของกล้องที่มีความละเอียดต่างๆ

Camera resolution	5 Megapixels	2 Megapixels
Character width (pixels)	18–20	9–10
Character height (pixels)	31–35	14–18

จากตารางข้างบน จะเห็นได้ว่า กล้องที่ 5 ล้านพิกเซลให้ภาพที่จำนวนพิกเซลที่เพียงพออ่านตัวเลขซีเรียล จะส่งผลให้การนำไปประมวลผลภาพมีเสถียรภาพมากขึ้น ในระบบนี้จึงเลือกใช้ที่ความละเอียดของกล้อง 5 ล้านพิกเซลสำหรับอุปกรณ์รับภาพในการอ่านบาร์โค้ด เนื่องจากบาร์โค้ดมีขนาดใหญ่ จึงสามารถมีความยืดหยุ่นในการเลือกกล้อง และสามารถเลือกใช้ได้ทั่วไป ฉะนั้นจะสรุปอุปกรณ์รับภาพทั้งระบบได้ดังนี้

สำหรับอ่านตัวเลขซีเรียลบนสไลด์เดอร์บาร์

- Camera: Basler acA2500-14gm
- Telecentric Lens: VS-TCH2-65CO
- Liquid Lens: Optotune, EL-10-30-c
- Coaxial Light (Red): U-SPRC

สำหรับอ่านบาร์โค้ดบนตัวยึดจับ

- Camera: Basler acA1300-30gm
- Lens: VS-MC15
- Bar Light (Red): VL-B05015R

5.2 อัลกอริทึมประมวลผลภาพ

ในการทดลองนี้จะประกอบด้วยสองส่วน นั่นคือ การทดลองอัลกอริทึมการปรับโฟกัสอัตโนมัติ และการทดลองการอ่านเลขซีเรียลและบาร์โค้ด

5.2.1 การทดลองอัลกอริทึมปรับโฟกัสอัตโนมัติ

การปรับโฟกัสแบบอัตโนมัติจำเป็นต้องปรับระยะโฟกัสแล้ววัดค่าความคมชัดของภาพในบริเวณที่เป็นตัวอักษร และหาว่าที่ระยะโฟกัสใดให้ค่าความคมชัดมากที่สุด ในตารางที่ 3 แสดงการปรับระยะโฟกัสสองแบบแบบแรกคือ กำหนดระยะที่แน่นอนเอาไว้ 4 ระยะ ซึ่งก็คือที่ระยะ 136 um, 272 um, 408 um, และ 544 um แล้วเลือกระยะที่ให้คะแนนความคมชัดมากที่สุด เทียบกับวิธี Golden Section Search ที่ปรับระยะโฟกัสทั้งหมด 4 ครั้ง

ตารางที่ 3 ค่าความคมชัดของวิธีต่างๆ

Method	136 μm	272 μm	408 μm	544 μm
Predefined Location	22.8497	25.9962	28.8075	24.9138
Method	1	2	3	4
Golden Section	23.0981	26.8863	29.2566	28.8023

ผลลัพธ์จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า วิธีของ Golden Section Search สามารถให้ความคมชัดสูงสุดได้มากกว่า เนื่องจากวิธีนี้ มีการปรับระยะให้ยืดหยุ่นไปตามวัตถุที่เข้ามา ในขณะที่การกำหนดระยะโฟกัสแต่แรก ไม่ได้มีความยืดหยุ่นเท่า และการเพิ่มความยืดหยุ่นตรงนี้ก็มีการคำนวณ

เพิ่มเติมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงเลือกใช้วิธี Golden Section Search ในการค้นหาระยะโฟกัสสำหรับการปรับโฟกัสอัตโนมัติ

5.2.2 การทดลองการอ่านเลขซีเรียลและบาร์โค้ด

เนื่องจากตัวอักษรอาจมีความคล้ายคลึงกัน บางตัวอาจจะอ่านผิดพลาดไปได้ อย่างเช่นเลข 0 และตัวอักษร O จึงมีการกำหนด Regular Expression กับผลลัพธ์ที่อ่านได้ เพื่อที่จะลดความผิดพลาดของตัวอักษรที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เลขซีเรียลมีทั้งหมด 8 ตัว ต่อหนึ่งสไลด์เดอร์ และแต่ละตำแหน่งมีความหมายเป็นชื่อรุ่นของการผลิตทางโรงงานมีการกำหนดว่าสามารถเป็นตัวอักษรอะไรได้บ้าง และไม่สามารถเป็นตัวอักษรอะไรได้บ้าง ดังนี้

- 4 ตัวอักษรแรก: [0-9A-Z]
- ตัวอักษรที่ 5: [0-9A-HJ-NP-T] (No I,O)
- ตัวอักษรที่ 6: [0-9A-HJ-NPR-X]
- ตัวอักษรที่ 7: [0-9]
- ตัวอักษรที่ 8: [1-4A-HJ-NPR-Z] (No I,O,Q)

ซึ่งข้อมูลจะถูกบันทึกในระบบ และสามารถนำมาคำนวณเป็นความแม่นยำของระบบได้ในตารางที่ 4 แสดงความแม่นยำของการอ่านเลขซีเรียลและบาร์โค้ด อัลกอริทึมสามารถให้ความแม่นยำที่ 98% และ 90% ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ค่าความแม่นยำของระบบการอ่านเลขซีเรียลและบาร์โค้ด

Algorithm	Without Regex	With Regex
Serial Number	95%	98%
Algorithm	Without BG Normalization	With BG Normalization
Barcode	80%	90%

เครื่องอ่านซีเรียลบนสไลด์เดอร์บาร์และบาร์โค้ดบนตัวยึดจับ ได้รับการทดสอบการใช้งานในโรงงานผลิตรถยนต์สี่ปีเป็นระยะเวลาสามเดือน ทดสอบในไลน์การผลิตกับชิ้นงานสไลด์เดอร์จำนวน 42,500 ชิ้นงาน และตัวยึดจับอีก 1,500 ชิ้นงาน โดยนำไปติดตั้งกับเครื่องจักร และมีคนช่วยตรวจสอบความถูกต้อง

ของผลลัพธ์ที่ได้ ผ่านการดูภาพจากหน้าจอ GUI ดังรูปที่ 11 และมีการแก้ไขให้ถูกต้องหากเจอชิ้นงานที่อ่านผิด



(a)



(b)

รูปที่ 11 GUI แสดงผลลัพธ์ (a) การอ่านเลขซีเรียล และ (b) การอ่านบาร์โค้ด

สำหรับระบบการอ่านเลขซีเรียลนั้น เนื่องจากตัวอักษรค่อนข้างคมชัดและตัดตัวอักษรที่มีความคลุมเครือออกไป ทำให้สามารถมีความแม่นยำที่สูงได้ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดเวลาการอ่านเลขซีเรียลลงไปได้มาก เพราะระบบใช้เวลาสำหรับประมวลผลทั้งหมดรวมการปรับโฟกัส 1 วินาทีและใช้เวลาทั้งหมด 3 วินาที รวมเวลาการดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลของชิ้นงาน และเปรียบเทียบข้อมูลเลขซีเรียลจากฐานข้อมูล ซึ่งหากเปรียบเทียบกับการใช้แรงงานมนุษย์ ที่จะต้องส่องดูเลขซีเรียลบนชิ้นงานด้วยกล้องไมโครสโคป และต้องใช้เวลามากกว่า 10 วินาที

เนื่องจากตัวยึดจับจะต้องนำไปเข้ากระบวนการล้าง และต้องโดนสารเคมี นอกจากนี้ยังมีการนำกลับมาใช้งานซ้ำอยู่เรื่อยๆ ทำให้ส่วนของบาร์โค้ดมีจางลงไป และมีสีพื้นหลังไม่เท่ากันในบางตัว ผลการอ่านบาร์โค้ดจึงได้ความแม่นยำที่ไม่ดีนัก แต่อัลกอริทึมการปรับสีพื้นหลังก็ช่วยเพิ่มความแม่นยำขึ้นมาได้ 12.5%

6. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบแมชชีนวิชั่นที่อ่านเลขซีเรียลบนสไลด์เตอร์บาร์และบาร์โค้ดบนตัวยึดจับในเวลา

เดียวกัน ซึ่งจะต้องออกแบบทั้งระบบให้สามารถติดตั้งในพื้นที่จำกัด การออกแบบระบบจะแบ่งเป็นสองส่วน มีส่วนของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ เพื่อให้ได้ภาพที่เหมาะสมที่สุด และซอฟต์แวร์ ที่จะต้องออกแบบอัลกอริทึมที่จะเพิ่มความแม่นยำให้กับการอ่านเลขซีเรียลบนสไลด์เตอร์บาร์และบาร์โค้ดบนตัวยึดจับจากภาพได้มากขึ้น และได้ทดสอบระบบกับชิ้นงานจำนวน 42,500 สไลด์เตอร์ และ 1,500 ตัวยึดจับ ได้ค่าความแม่นยำของการอ่านเลขซีเรียลที่ 98% และความแม่นยำในการอ่านบาร์โค้ดที่ 90%

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ถูกสนับสนุนโดยโครงการพัฒนานักวิจัยและอุตสาหกรรม(พอว.) และบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) ภายใต้สัญญาทุนที่ PHD5710049 ขอขอบคุณคุณศราพงศ์ ชุมวงศ์ และคุณจักกฤษ สุภาวสุทธิ์ สำหรับความช่วยเหลือและคำแนะนำทุกอย่างในขณะดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Sansomboon, B. Sangprngam and R. Oonsivilai, "Increasing Accuracy by Number of Sectional Images used in Processing the Aggregate Gradation in Asphalt Concrete," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 34, no. 3, pp.70–77, 2017.
- [2] K. Boonma and S. Klongboonjit, "The Application of Employing the Discriminant Analysis Technique to Forecast the Inspection Marking on the Integrated Circuit Product," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 39, no. 1, pp. 63–75, 2022.
- [3] J. Y. Chang, K. Fawzi, R. Moates and E. Rothenberg, "Image processing of novel vision-assisted hard disk drive flex cable-actuator manufacturing." *Microsystem Technologies*, vol. 15, pp. 1637–1643, 2009, doi: 10.1007/s00542-009-0864-8.
- [4] W. Withayachumnankul, P. Kunakornvong, C. Asavathongkul and P. Sooraksa, "Rapid detection of hairline cracks on the surface of piezoelectric

- ceramics.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 64, pp. 1275–1283, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4085-4.
- [5] C. Mak, N. Afzulpurkar, M. Dailey and P. Saram, “A bayesian approach to automated optical inspection for solder jet ball joint defects in the head gimbal assembly process,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 1155–1162, 2014, doi: 10.1109/TASE.2014.2305654.
- [6] S. Yammen and P. Muneesawang, “An advanced vision system for the automatic inspection of corrosions on pole tips in hard disk drives,” *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 4, no. 9, pp. 1523–1533, 2014, doi: 10.1109/TCPMT.2014.2334691.
- [7] B. Sae-ang and P. Mittrapiyanurak, P. Kaewtrakulpong, W. Kumwilaisak and S. Laohavichien, “Autofocus Machine Vision System for Reading Serial Numbers of Hard Disk Drive Slider Bar,” in *37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC- CSCC)*, Phuket, Thailand, Jul. 05–08, 2022, pp. 345–348.
- [8] R. Subramanian, E. Spalding and N. Ferrier, “A high throughput robot system for machine vision based plant phenotype studies,” *Machine Vision and Applications*, vol. 24, pp. 619–636, 2013, doi: 10.1007/s00138-012-0434-4.
- [9] H. Bilen, M. Hocaoglu, M. Unel and A. Sabanovic, “Developing robust vision modules for microsystems applications,” *Machine Vision and Applications*, vol. 23, pp. 25–42, 2012, doi: 10.1007/s00138-010-0267-y.
- [10] A. A. Bell, T. Würflinger, S.-O. Ropers, A. Böcking and T. Aach, “Towards fully automatic acquisition of multimodal cytopathological microscopy images with auto- focus and scene matching,” *Methods of Information in Medicine*, vol. 46, no. 3, pp. 314–323, 2007, doi: 10.1160/ME9049.
- [11] G. P. Allen, R. Hodgson, S. Marsland and J. Flenley, “Machine vision for automated optical recognition and classification of pollen grains or other singulated microscopic objects.” in *15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, Auckland, New Zealand, Dec. 2–4, 2008, pp. 221–226.