

Autofocusing System using Matching Blurry measure and Working Distance for industrial application

ระบบโฟกัสภาพโดยอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรมด้วยการจับคู่ ค่าความพร่ามัวและระยะห่างของวัตถุ

พิพัฒน์ ณรงค์วัฒน์¹, ประดิษฐ์ มิตรปิยานุรักษ์², วุฒิพงษ์ คำวิลัยศักดิ์³ และ ปกรณ์ แก้วตระกูลพงษ์⁴

^{1,3}ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

²ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ

⁴ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

Emails: pipat.nar@hotmail.com, wuttipong.kum@kmutt.ac.th, pakorn.kae@kmutt.ac.th, praditm@swu.ac.th

ABSTRACT – This paper presents a novel autofocus algorithm in which the type of target object is fixed and the range of working distance is known a priori. The key idea of the algorithm is to compare the blurry value computed from the input image to the ones pre-recorded in the learning step. The blurry value is derived from the Point Spread Function (PSF) estimated from the input image. The information on working distance associated to the reference blurry value is used to adjust the lens position to the focus position. This algorithm requires at most three shots (initial shot and two steps of lens position adjustment) to reach the focus position. From our experiment, the accuracy of our autofocus algorithm is about 93%. The algorithm can be applied for the autofocus module of an industrial visual inspection, especially in the area of high magnification applications.

KEYWORDS -- autofocusing, blurry measure, Point Spread Function estimation, high magnification visual inspection

บทคัดย่อ – บทความนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมใหม่สำหรับการปรับโฟกัสโดยอัตโนมัติ โดยที่ชนิดของวัตถุเป็นชนิดเดียวกัน และระยะห่างของวัตถุอยู่ในขอบเขตที่รู้ล่วงหน้า อัลกอริทึมนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าความพร่ามัวของภาพอินพุตกับค่าความพร่ามัวอ้างอิงที่ถ่ายจากวัตถุที่ระยะห่างต่างๆ ในขั้นการเรียนรู้ โดยการหาค่าความพร่ามัวที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ คัดแปลงจากการประมาณค่า Point spread function (PSF) ค่าความพร่ามัวที่คำนวณได้ในภาพทดสอบสามารถนำไปใช้ในการระบุตำแหน่งของเลนส์ที่จะต้องถูกปรับเพื่อให้เข้าสู่ระยะโฟกัส อัลกอริทึมที่นำเสนอจะใช้การเก็บภาพไม่เกิน 3 ครั้ง (การเก็บภาพครั้งแรกและการปรับระยะเพื่อให้เข้าโฟกัส 2 ครั้ง) จากการทดลอง อัลกอริทึมนี้ทำงานถูกต้องแม่นยำ 93% เราสามารถนำอัลกอริทึมนี้ไปประยุกต์ใช้ในระบบโฟกัสโดยอัตโนมัติในการตรวจสอบโดยใช้ภาพถ่ายสำหรับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะงานที่ใช้การถ่ายภาพที่มีกำลังขยายสูง

คำสำคัญ -- การประมาณค่า PSF, ความพร่ามัว, โฟกัสภาพโดยอัตโนมัติ, การตรวจสอบด้วยภาพที่มีกำลังขยายสูง

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมจำนวนมากได้ใช้การประมวลผลภาพเข้ามาช่วยในกระบวนการต่างๆ ของระบบการผลิต เนื่องจากสามารถทำงานได้รวดเร็ว มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพสูงกว่าการทำงานด้วยมนุษย์ ซึ่งหนึ่งในปัญหาที่พบในการถ่ายภาพวัตถุชิ้นงานเข้ามาประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ คือ ภาพของวัตถุอาจพร่ามัว (ไม่ได้ระยะโฟกัส) ซึ่งไม่สามารถนำไปประมวลผลต่อได้ โดยทั่วไปแล้วเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหานี้ ระบบโฟกัสภาพโดยอัตโนมัติ (autofocus system) [1] และ [2] ที่ประกอบไปด้วยมอเตอร์ที่ทำการควบคุมระยะห่างของเลนส์กับวัตถุมักถูกนำมาใช้งาน โดยที่เราจะต้องทำการคำนวณหาระยะห่างระหว่างตำแหน่งเลนส์ ณ ปัจจุบันเทียบกับวัตถุ เพื่อใช้ในการปรับตำแหน่งของเลนส์ให้ไปอยู่ที่ตำแหน่งโฟกัส วิธีการหนึ่งในการคำนวณระยะดังกล่าว คือ การเพิ่มเซ็นเซอร์พิเศษที่สามารถวัดระยะห่าง เช่น อัลตราโซนิก เลเซอร์ เป็นต้น วิธีการเหล่านี้เรียกว่า active autofocus ซึ่งมีข้อดีคือ ค่าใช้จ่ายของเซ็นเซอร์เหล่านี้และการติดตั้งค่อนข้างสูง ในทางตรงกันข้ามมีงานวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งเรียกว่า passive autofocus technique ซึ่งทำการคำนวณหาระยะการปรับตำแหน่งเลนส์ที่เหมาะสมโดยทำการวิเคราะห์จากภาพอินพุต สำหรับงานวิจัยในบทความนี้ เราจะเสนอวิธีการปรับระยะ โฟกัสในกลุ่มของ passive autofocus

วิธีการส่วนใหญ่ในงานวิจัยที่มีอยู่แล้ว [1] และ [2] จะทำการปรับระยะเลนส์ไปที่ระยะต่างๆ พร้อมทั้งทำการถ่ายภาพวัตถุ หลังจากนั้นจะนำมาคำนวณหาค่าความพร่ามัว (focus measure) เพื่อดูว่าภาพที่ถ่ายในระยะปัจจุบันอยู่ที่ตำแหน่งโฟกัสแล้วหรือยัง ถ้ายังก็จะทำการปรับไปเรื่อยๆ จนกว่าจะเจอ วิธีการปรับโฟกัสเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกล้องที่มีค่า depth of focus ที่มีค่าหลากหลายได้ โดยไม่ต้องปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบ อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าข้อเสียของวิธีการเหล่านี้คือ เราอาจจะต้องใช้จำนวนขั้น (step) ที่ใช้ในการถ่ายภาพและประมวลผลเป็นจำนวนมากจนกว่าจะเจอระยะโฟกัส

แต่ในการประยุกต์ใช้งานทางด้านการประกอบชิ้นส่วนไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (micro-assembly) ที่มีการเก็บภาพมาจากกล้องกำลังขยายสูง (high magnification) ซึ่ง depth of focus จะอยู่ในช่วงแคบๆ นอกจากนี้เรารู้ล่วงหน้าถึงค่าประมาณของ

working distance ของระบบว่าอยู่ในช่วงใด นอกจากนี้ชนิดของวัตถุที่จะใช้งานกับระบบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงยกเว้นเมื่อเปลี่ยนสายงานการผลิต แต่การถ่ายภาพชิ้นงานต่างๆ ในแต่ละครั้งอาจมีความแตกต่างของระยะระหว่างเลนส์ถึงตัวชิ้นงานนั้นๆ ถึงแม้จะมีค่าน้อยแต่เมื่อถ่ายด้วยกล้องที่มีอัตราการขยายสูงก็สามารถทำให้ได้ภาพที่มีความพร่ามัว

ในงานวิจัยนี้โดยใช้เงื่อนไขดังกล่าวข้างต้น เราจะนำเสนอวิธีการใหม่ในการค้นหาตำแหน่งโฟกัสที่ใช้ขั้นตอนค้นหาไม่เกิดการถ่ายภาพสองครั้ง โดยเราจะนำไปประยุกต์ใช้งานกับการถ่ายภาพชิ้นงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้มาจากกล้องกำลังขยายสูง (high magnification) ที่ทำงานใน working distance ที่มีระยะแน่นอน โดยสมมุติว่าไม่มีการเปลี่ยนเลนส์และชนิดของชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้เราจะนำเสนอวิธีการใหม่ในการค้นหาตำแหน่งโฟกัสที่ใช้ขั้นตอนค้นหาไม่เกิดการถ่ายภาพสองครั้ง เราได้นำเสนอการวัดค่าความพร่ามัวหรือค่าโฟกัส (focus measure) ที่คำนวณได้จาก PSF (Point spread function) ของภาพอินพุต และเราได้นำเสนอวิธีการในการปรับโฟกัส โดยอ้างอิงจากค่าความพร่ามัวของภาพต้นแบบที่รู้ระยะห่างของวัตถุที่ทำการบันทึกไว้ล่วงหน้าเป็นฐานข้อมูลของระบบ โดยเราจะนำไปประยุกต์ใช้งานกับการถ่ายภาพชิ้นงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ผ่านกล้องกำลังขยายสูง (high magnification) ที่ทำงานใน working distance ที่มีระยะแน่นอน โดยสมมุติว่าไม่มีการเปลี่ยนเลนส์และชิ้นงาน

เนื้อหาที่เหลือของบทความวิจัยนี้ มีดังต่อไปนี้ ในหัวข้อที่ 2 เราจะพูดถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หลังจากนั้นในหัวข้อที่ 3 เราจะอธิบายถึงวิธีการปรับโฟกัสที่ได้นำเสนอ ในหัวข้อที่ 4 เราจะแสดงผลการทดลอง และทำการสรุปในหัวข้อที่ 5

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในกลุ่มแรกจะเป็นงานวิจัย [1], [2], [3], [4], [5] และ [6] ที่นำเสนอระบบการปรับโฟกัสโดยอัตโนมัติโดยใช้แนวทาง passive autofocus โดยจะต้องทำการวัดค่าความพร่ามัวจากภาพ หลังจากนั้นจะนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาระยะที่จะปรับมอเตอร์ที่ควบคุมระยะห่างของกล้องเทียบกับ

วัตถุ โดยทำการปรับไปเรื่อยๆ จนกว่าจะเจอตำแหน่งซึ่งให้ค่าความพรมัวที่แสดงว่าเป็นค่าของภาพที่ชัดที่สุด

Y. Song และคณะ [1] เสนอวิธีการหาโฟกัสโดยอัตโนมัติด้วยการปรับมอเตอร์ค้นหาอย่างคร่าวๆ เพื่อสังเกตลักษณะของบริเวณที่น่าจะเป็นระยะโฟกัสของภาพ จากนั้นจะทำการปรับมอเตอร์ค้นหาอย่างละเอียดอีกครั้งในบริเวณที่สนใจ โดยการวัดค่าโฟกัสโดยอ้างอิงจากข้อมูลของภาพในบริเวณย่อย (local image structure) โดย Y. Song และคณะ ได้ใช้อัลกอริทึม Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus (SUSAN) [12] สำหรับการคำนวณหาโครงสร้างข้อมูลภาพในบริเวณย่อยเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่าโฟกัส งานวิจัย C.Y. Chen และคณะ [2] ได้นำเสนอวิธีที่ใช้เทคนิค discrete wavelet transformation และเทคนิค mathematic morphology ในการนิยามค่าโฟกัส ซึ่งจากการทดลองค่าโฟกัสนี้จะมีค่ามากที่สุดเมื่อภาพที่ถ่ายเข้ามาอยู่ที่ตำแหน่งโฟกัส นอกจากนี้เขายังได้นำเสนอวิธีการปรับโฟกัสโดยอัตโนมัติด้วยการค้นหาตำแหน่งการปรับเลนส์ที่เหมาะสม โดยประยุกต์ใช้เทคนิค Self-Organizing Map (SOM) neural network ในการเรียนรู้ค่าโฟกัสของวัตถุแต่ละชนิดที่ถ่ายที่ระยะต่างๆ สำหรับการใช้งานจะต้องหาค่าความคมชัดซึ่งได้จากวิธีการวัดค่าโฟกัสในช่วง 3 ระยะแรกเสียก่อนจากนั้นนำค่าที่ได้เข้าสู่ SOM neural network เพื่อหาระยะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับตำแหน่งของเลนส์และทำการค้นหาอย่างละเอียดอีกครั้งเพื่อหาโฟกัสของภาพ

S. Jin และคณะ [3] ได้นำเสนอระบบการหาโฟกัสโดยอัตโนมัติแบบเรียลไทม์ โดยจะเลือกบริเวณที่สนใจในภาพและจะแบ่งภาพออกเป็นหน้าต่างย่อยๆ ขนาด 5x5 จากนั้นจะนำหน้าต่างทั้งหมดมาผ่านการปรับภาพ 2 ระดับ (thresholding) และนำผลที่ได้มาผ่าน voting functions เพื่อใช้ในการตัดสินใจตำแหน่งโฟกัสที่เหมาะสม L. C. Chiu และ C. S. Fuh [4] ได้นำเสนอวิธีการวัดค่าโฟกัสโดยเลือกบริเวณที่มีความถี่สูงของภาพด้วยการหาเกรเดียนต์และนำผลที่ได้ไปประเมินการกระจายตัวของแสงที่มีลักษณะเป็นจุด ส่วนวิธีการหาโฟกัสจะใช้อัตราส่วนระหว่างค่าโฟกัสครั้งล่าสุดหารด้วยครั้งก่อนหน้านี้ โดยค่าอัตราส่วนจะเป็นตัวระบุการเพิ่ม หรือการลดลงของโฟกัส ซึ่งจะใช้ค่าดังกล่าวในการปรับระยะครั้งต่อไป จนเข้าสู่จุดโฟกัส S. Allegro และคณะ [5] นำเสนอวิธีการวัดค่าโฟกัส

ด้วย Brenner focus function ซึ่งเป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างพิกเซลข้างเคียง โดยเริ่มต้นจะทำการค้นหาแบบหยาบๆ และจะค้นหาอย่างละเอียดอีกครั้ง G. Duceux และคณะ [6] นำเสนอวิธีการหาโฟกัสด้วยการค้นหาในแนวตั้งตลอดทั้งระยะจนกระทั่งพบจุดที่มีค่าสูงสุด โดยใช้การวัดโฟกัสด้วยวิธีการทั่วไป เช่น เกรเดียนต์ ลาปลาเซียน ความแปรปรวน เอ็นโทรปี และ พลังงาน เป็นต้น ในการคัดเลือกวิธีการที่ให้ผลการทดลองที่มีสมรรถนะ และรวดเร็วในการหาโฟกัส

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบทความนี้ อีกกลุ่มหนึ่ง คือ งานวิจัยที่เน้นทางด้านการศึกษาตัววัดโฟกัสที่มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบโฟกัสโดยอัตโนมัติ โดยลักษณะร่วมกันของตัววัดเหล่านี้ คือ กราฟที่พล็อตระหว่างค่าโฟกัสกับระยะเลนส์ที่ทำการถ่ายภาพจะมีลักษณะสมมาตรรอบจุดสูงสุด (ต่ำสุด) โดยค่าโฟกัสที่ตำแหน่งภาพชัดสุดจะมีค่ามากที่สุด (น้อยสุด) P.T. Yap และ P. Raveendran [7] ใช้วิธีการวัดโฟกัสด้วยหลักการพื้นฐานโมเมนต์ของ Chebyshev โดยผลการทดลองจะเปรียบเทียบกับ การวัดค่าโฟกัสด้วยการหาโมเมนต์ในลำดับที่ 1 และ 5 ซึ่งจะถูกต้องทำให้มีมาตรฐานเดียวกัน โดยการหารด้วยค่าสูงสุดที่วัดได้ในแต่ละภาพ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าที่ได้จากการวัดโฟกัสมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 และแสดงผลการทดลองที่สามารถทนทานต่อ Gaussian และ salt-and-pepper noise ได้ J. Kautsky และคณะ [8] ใช้วิธีการวัดโฟกัสด้วยหลักการพื้นฐานของ discrete wavelet transform โดยใช้อัตราส่วนระหว่างขนาดของแถบความถี่สูงและขนาดของแถบความถี่ต่ำของภาพ และใช้ Daubechies wavelets มาประเมินค่าในการวัด ซึ่งภาพที่ใช้ในการทดลองจะใช้ blurring mask เพื่อเพิ่มความพรมัวของภาพ และจะใช้ slight additive noise เพื่อทดสอบความทนทานของสัญญาณรบกวน ซึ่งผลการทดลองไม่ได้ถูกทำให้มีมาตรฐานเดียวกัน ทำให้ค่าที่ได้จากการวัดโฟกัสมีค่าแตกต่างกันไป Y. Zhang และคณะ [9] ใช้การหาโมเมนต์ในลำดับที่ 2 และ 4 ของภาพที่จำลองการถ่ายภาพอย่างต่อเนื่องกัน ข้อดีของวิธีการดังกล่าวจะได้กราฟของจุดโฟกัสที่มีความโค้งลักษณะเดียวกันไม่ว่าจะถ่ายภาพวัตถุใดก็ตาม แต่ทุกกราฟจะต้องทำให้มีมาตรฐานเดียวกัน (normalization) โดยการหารด้วยค่าสูงสุดที่วัดได้ในแต่ละภาพ และเมื่อผ่านกระบวนการนี้แล้ว จะทำให้

กราฟของทุกๆ ภาพมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากจนมีลักษณะของกราฟที่ทับกัน

เนื่องจากค่าความพร่ามัวที่เราได้นำเสนอจะคำนวณจากค่า PSF เราขอกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการประมาณค่า PSF จากภาพอินพุต งานวิจัยเกี่ยวกับการประมาณค่า PSF เพื่อวัดความพร่ามัวของภาพ ซึ่งไม่เป็นที่นิยมกันนักในกลุ่มของงานวิจัยโฟกัสภาพโดยอัตโนมัติ แต่มักพบในกลุ่มของงานวิจัยทางด้านการจัดความพร่ามัวของภาพ (image deblurring) ในงานวิจัย [10] และ [11] ได้นำเสนอเทคนิคทางด้าน blind deconvolution ซึ่งจะทำให้การประมาณค่า PSF และภาพที่ไม่พร่ามัว (latent image) จากภาพอินพุต แต่ในวิธีการปรับโฟกัสที่เราได้นำเสนอจะใช้เพียงค่า PSF ที่หาได้โดยไม่สนใจภาพ latent image ที่ได้ออกมาด้วย

3. วิธีการที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้ เราจะนำเสนอวิธีการปรับโฟกัสอัตโนมัติภายใต้เงื่อนไขที่ว่าระบบจะทำงานใน working distance ที่มีระยะแน่นอน และไม่มีการเปลี่ยนแปลงและชิ้นงานยกเว้นเมื่อทำการเปลี่ยนสายการผลิต โดยวิธีการที่เราได้นำเสนอจะทำการบันทึกภาพต้นแบบของชิ้นงานที่ถ่ายที่ระยะระหว่างเลนส์กับวัตถุเป็นค่าต่างๆ โดยที่แต่ละอย่างเราจะทำการคำนวณค่าความพร่ามัวไว้เป็นค่าอ้างอิง โดยขั้นตอนการบันทึกภาพเหล่านี้ถือเป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการเรียนรู้ของระบบ ซึ่งจะทำการเพียงครั้งเดียว หลังจากนั้นในขั้นตอนใช้งาน เมื่อถ่ายภาพอินพุตเข้ามาครั้งแรก เราจะนำค่าความพร่ามัวที่วัดได้มาประมาณหาค่าตำแหน่งระยะโฟกัสที่จะถ่ายภาพครั้งที่ 2 หลังจากนั้น จะนำค่าความพร่ามัวที่คำนวณได้จากครั้งที่ 2 มาคำนวณหาค่าตำแหน่งหรือระยะโฟกัสที่ถูกต้อง ซึ่งจะทำการปรับในครั้งที่ 3 เป็นครั้งสุดท้าย นั่นคือ เราจะใช้ขั้นตอนย่อยในการถ่ายภาพเพื่อค้นหาตำแหน่งโฟกัสไม่เกิน 2 ครั้ง (ครั้งที่ 3 จะได้ภาพ ณ ตำแหน่งโฟกัส)

แนวคิดที่สำคัญของวิธีการที่เราได้นำเสนอประกอบด้วย (1) การนิยามค่าความพร่ามัวที่คำนวณได้จาก PSF ซึ่งเราจะกล่าวถึงในหัวข้อย่อยที่ 3.1 และ (2) แบบจำลองวิธีการค้นหาตำแหน่งโฟกัส โดยการเปรียบเทียบค่าความพร่ามัวกับภาพต้นแบบ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.2

3.1 ค่าความพร่ามัวโดยใช้ PSF (Focus measure based on Point Spread Function)

การวัดค่าความพร่ามัว โดยใช้ PSF จะอิงพื้นฐานความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายกระบวนการเกิดภาพจากแสงตกกระทบวัตถุผ่านเลนส์ดั้งสมการที่

$$I = L \otimes f + n \quad (1)$$

โดยที่ I คือ ภาพที่พร่ามัวที่ถ่ายเข้ามาเป็นภาพอินพุต และ L เป็นภาพดั้งเดิมที่ไม่พร่ามัว (latent image) โดยที่ I และ L มีขนาด $M \times N$ พิกเซล และ f คือ Point spread function (PSF) ที่มีขนาด kernel เป็น $S \times S$ ส่วน n คือสัญญาณรบกวน และ \otimes แสดงถึงตัวดำเนินการคอนโวลูชัน นั่นคือ ภาพอินพุตที่เราถ่ายเข้ามาได้ จะเกิดจากภาพดั้งเดิม L ทำการคอนโวลูชันกับเคอร์เนล f และบวกกับสัญญาณรบกวน n

ในทางทฤษฎีนั้น Point Spread Function (PSF) ได้อธิบายการตอบสนองของระบบภาพที่แหล่งกำเนิดของแสงจากวัตถุเป็นจุด โดยที่ PSF จะมีผลตอบสนองแบบอิมพัลส์ได้ก็ต่อเมื่ออยู่ในตำแหน่งที่โฟกัส ในการถ่ายภาพ เมื่อวัตถุอยู่ใกล้ตำแหน่งโฟกัส จะทำให้ภาพเกิดความพร่ามัวที่น้อย ซึ่งอาจจะทำให้มีลักษณะของ PSF ดังรูปที่ 1 (ก) และหากวัตถุไม่อยู่ในตำแหน่งโฟกัสแล้ว จะทำให้ภาพที่ได้เกิดความพร่ามัวที่มาก ซึ่งอาจจะทำให้มีลักษณะของ PSF ดังรูปที่ 1 (ง) สำหรับการถ่ายภาพที่มีพื้นผิวของวัตถุอยู่ในระนาบเดียวกัน ย่อมทำให้ PSF ที่ได้ในทุกๆ พื้นผิวไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 1. (ก) แสดงภาพที่ตำแหน่งโฟกัส (ข) แสดงภาพที่ไม่อยู่ในตำแหน่งโฟกัส (ค) แสดงภาพสมมุติของ PSF ของภาพที่

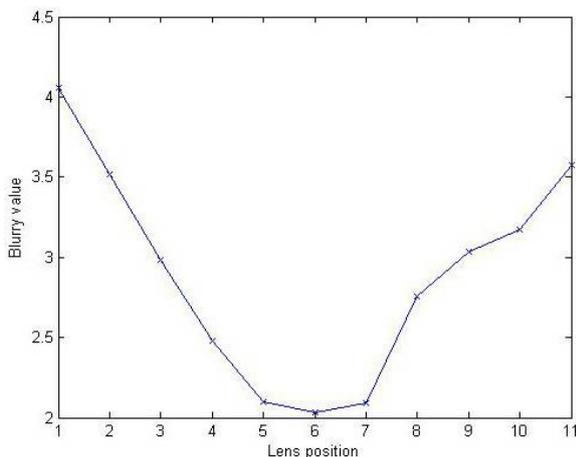
ตำแหน่งโฟกัส และ (ง) แสดงภาพสมมุติของ PSF ของภาพที่ไม่อยู่ในตำแหน่งโฟกัส

การวัดค่าความพร่ามัวของภาพ เราเลือกใช้วิธีการหามอร์เมนต์ไลซ์โมเมนต์ (normalized moment) ที่ศูนย์ ดังสมการ

$$b = \frac{\sum_{u=-\frac{S}{2}}^{\frac{S}{2}} \sum_{v=-\frac{S}{2}}^{\frac{S}{2}} f(u,v)}{\max_{(u,v)} f(u,v)} \quad (2)$$

โดยที่ b คือ ค่าความพร่ามัวของภาพ และ f แสดงถึง PSF ขนาด $S \times S$

เราพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพร่ามัวที่นิยามตามสมการที่ 2 กับระยะระหว่างเลนส์ถึงวัตถุจะมีความสัมพันธ์ค่อนข้างเป็นแบบสมมาตรรอบจุดต่ำสุด โดยที่ค่าน้อยสุดจะระบุระยะที่ได้โฟกัส นอกจากนี้ เมื่อระยะวัตถุอยู่ไกลจากโฟกัสมากขึ้น ย่อมมีค่าความพร่ามัวที่มากขึ้นตามไปด้วย ตัวอย่างของกราฟแสดงความสัมพันธ์สามารถแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพร่ามัวกับระยะระหว่างเลนส์ถึงวัตถุ

สำหรับการประมาณค่า PSF จากภาพอินพุต เราได้ประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยของ Q. Shan และคณะ

[11] ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เผยแพร่ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาตามแนวคิดที่ได้นำเสนอในบทความ ในงานวิจัยของเราได้นำซอฟต์แวร์ดังกล่าวมาทำงานเป็นส่วนหนึ่งของระบบของเรา

กล่าวโดยสรุปวิธีการของ Q. Shan และคณะ [11] ในการประมาณค่า f และ L จากภาพอินพุต I นั้น จะทำการแปลงปัญหาให้อยู่ในรูปของปัญหา Maximum a Posteriori (MAP) โดยมีโมเดลของปัญหาในรูปของความน่าจะเป็น คือ

$$p(L, f | I) \propto p(I | L, f)p(L)p(f) \quad (3)$$

โดย $p(I|L,f)$ หมายถึง ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของภาพอินพุตเมื่อรู้ค่า L และ f ส่วน $p(L)$ และ $p(f)$ แสดง prior ของภาพแฝง L และ PSF kernel f ตามลำดับ

ในการหาค่าที่เหมาะสม (optimization) เราจะทำการค้นหา f และ L ที่ทำให้ค่า negative logarithm ของความน่าจะเป็นที่นิยามในสมการที่ 3 น้อยที่สุด ดังแสดงได้จาก

$$E(L, f) = -\log(p(L, f | I)) \quad (4)$$

โดย Q. Shan เสนออัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหาการหาค่าน้อยสุด โดยใช้วิธีการกระทำซ้ำเพื่อคำนวณหา f และ L จากภาพอินพุต I โดยทำการสลับการประมาณค่า L โดยสมมุติว่า f มีค่าคงที่ และทำการประมาณค่า f เมื่อ L เป็นค่าคงที่ (โดยสัญลักษณ์ L, f และ I จะอ้างอิงถึงสมการที่ (1) จนกว่าค่าที่ประมาณได้มีความแตกต่างน้อยกว่า threshold

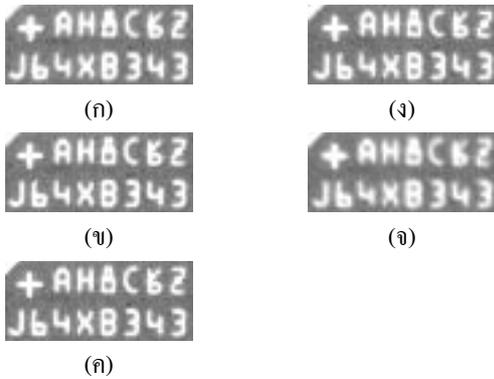
3.2 การค้นหาตำแหน่งโฟกัส โดยการเปรียบเทียบค่าความพร่ามัวกับภาพต้นแบบ

ในหัวข้อนี้เราจะอธิบายถึงอัลกอริทึมในการปรับระยะระหว่างเลนส์กับวัตถุเพื่อให้ได้ระยะโฟกัส โดยทำการวิเคราะห์ค่าความพร่ามัวที่คำนวณจากภาพอินพุตที่ถ่าย ณ เวลาปัจจุบัน โดยค่าความพร่ามัวที่ใช้ในอัลกอริทึมนี้ได้อธิบายในหัวข้อที่แล้ว

¹ ซอร์ฟแวร์คาร์เนกีโกลด์ที่ได้ที่ http://www.cse.cuhk.edu.hk/~leojia/projects/motion_deblurring/index.html

3.2.1 ขั้นตอนการเรียนรู้

ในขั้นตอนนี้ เราสมมุติว่าเรารู้ชนิดของวัตถุและระยะ working distance ที่แน่นอนแล้ว เราจะทำการบันทึกภาพที่ระยะต่างๆ พร้อมทั้งทำการคำนวณหาค่าความพร่ามัวคู่กับระยะที่ถ่ายภาพเพื่อเก็บไว้เป็นข้อมูลอ้างอิง โดยการทำงานในขั้นตอนนี้จะทำเพียงครั้งเดียวก่อนที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนใช้งาน ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3. ตัวอย่างภาพของวัตถุที่ถ่ายในขั้นตอนการเรียนรู้ (ก) และ (ข) แสดงภาพที่ระยะก่อนโฟกัส (ค) แสดงภาพที่ระยะโฟกัส (ง) และ (จ) แสดงภาพที่ระยะหลังโฟกัส ตามลำดับ

เราจะเริ่มต้นทำการถ่ายภาพที่ระยะโฟกัส หลังจากนั้นจะทำการปรับระยะเลนส์กับวัตถุให้ใกล้ขึ้นอย่างสม่ำเสมอขนาด Δx หน่วย ตลอดทั้งระยะ ซึ่งจะทำให้เราได้ภาพที่มีความพร่ามัวแบบหลังระยะโฟกัส (back focus) หลังจากนั้น จะทำแบบเดียวกันเพื่อให้ได้ภาพที่มีความพร่ามัวแบบก่อนโฟกัส (front focus) ภาพตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วค่าความพร่ามัวของภาพก่อนและหลังระยะโฟกัสที่ระยะห่างจากระยะโฟกัสเท่ากัน จะมีความพร่ามัวใกล้เคียงกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าเราไม่สามารถใช้ค่าความพร่ามัวที่คำนวณได้มาปรับระยะเลนส์เพื่อเข้าสู่ตำแหน่งโฟกัสภายในครั้งเดียว

สำหรับค่า Δx ที่กล่าวไว้ข้างต้นนี้จะระบุถึงความละเอียด (Resolution) ในการปรับระยะเลนส์ถึงวัตถุในการถ่ายภาพแต่ละครั้งของขั้นตอนการใช้งาน นั่นคือ การปรับเลนส์ในแต่ละครั้งจะเป็นจำนวนเท่าของค่า Δx ($k \cdot \Delta x$ โดยที่ $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) โดยเราสามารถกำหนดค่า Δx ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่า depth of focus ของเลนส์ สมมุติว่าค่านี้ คือ dof_0

โดยที่เราจะกำหนดให้ค่า Δx ต้องน้อยกว่าค่า dof_0 นี้ เหตุผลของการกำหนดค่า Δx ตามเงื่อนไขนี้ เนื่องจากการกำหนดระยะ Δx มากกว่า dof_0 อาจจะทำให้การปรับตำแหน่งต่อหนึ่งขั้น อาจกระโดดข้ามช่วงของ dof_0 ซึ่งทำให้เราไม่สามารถปรับเลนส์เข้าสู่ตำแหน่งโฟกัสได้

3.2.2 อัลกอริทึมในการปรับระยะเลนส์เพื่อเข้าสู่ตำแหน่งโฟกัส

การปรับระยะเลนส์เพื่อเข้าสู่ตำแหน่งโฟกัสในงานวิจัยนี้ เราจะสมมุติว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพร่ามัว (แกน y) กับระยะเลนส์ (แกน x) ที่วิเคราะห์จากภาพในขั้นตอนการเรียนรู้ (ดูตัวอย่างรูปที่ 2) มีรูปร่างของกราฟเหมือนกับกราฟที่ได้จากภาพที่ถ่ายในขั้นตอนการใช้งาน แต่อาจจะมีการเลื่อนตำแหน่งของกราฟไปในตามแกน x ที่ระบุค่าระยะเลนส์ซึ่งเกิดเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนยินยอม (tolerance) ของระยะจากเลนส์ถึงวัตถุซึ่งจะถูกป้อนเข้าสู่สายการผลิตต่อหน้ากล้องที่ถ่าย โดยใช้สมมุติฐานดังกล่าว เราจะวัดค่าความพร่ามัวของภาพอินพุตที่ถ่าย ณ ตำแหน่งเลนส์ปัจจุบัน มาเปรียบเทียบกับค่าในกราฟที่ได้จากขั้นตอนการเรียนรู้ เพื่อมาระบุหาระยะที่เหมาะสมในการปรับตำแหน่งเลนส์ให้อยู่ที่ตำแหน่งโฟกัส ซึ่งเราสามารถออกแบบอัลกอริทึมแสดงได้ดังผังงาน ดังรูปที่ 4

หลักการสำคัญของอัลกอริทึม คือ เราจะทำการปรับระยะทั้งหมดจำนวน 2 ครั้ง โดย ครั้งแรกจะเป็นการปรับเพื่อตรวจว่าวัตถุอยู่ในตำแหน่งก่อน (front focus) หรือหลังโฟกัส (back focus) หลังจากนั้นการปรับระยะในครั้งที่ 2 จะเข้าสู่ระยะโฟกัส เนื่องจากภาพอินพุตที่ถ่ายเข้ามาครั้งแรก อาจมีความพร่ามัว แต่เราจะไม่รู้ว่าความพร่ามัวนี้เป็นความพร่ามัวเนื่องจากตำแหน่งก่อนหรือหลังโฟกัส ดังนั้นในการปรับระยะครั้งแรกเราจะสมมุติว่า วัตถุอยู่ในตำแหน่งก่อนโฟกัสเสมอ แล้วปรับระยะเลนส์ให้เข้ามาใกล้วัตถุที่ระยะก่อนโฟกัส 1 ระยะ โดยการปรับระยะนี้ จะเป็นการปรับระยะที่สัมพันธ์ (relative movement) เทียบกับตำแหน่งเริ่มต้น (ใกล้วัตถุมากขึ้นเป็นระยะทาง Δx)

สำหรับการปรับระยะครั้งที่ 2 สามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณีหลักๆ ดังนี้

- ถ้าการถ่ายภาพครั้งแรก วัตถุอยู่ในระยะก่อนโฟกัส (front focus) หลังทำการปรับระยะครั้งที่ 1 แล้วทำการถ่ายภาพครั้งที่ 2 เพื่อคำนวณหาค่าความพร่ามัวค่าที่ได้จะต้องมีค่าน้อยลงเทียบกับค่าความพร่ามัวครั้งที่ 1 นั่นคือ ระยะเลนส์ปัจจุบันอยู่ที่ตำแหน่ง Δx ก่อนระยะโฟกัส ดังนั้นในการปรับระยะครั้งที่ 2 เราสามารถปรับตำแหน่งเลนส์ให้ใกล้วัตถุมากขึ้นเป็นระยะ Δx ซึ่งจะทำให้เราได้ภาพในระยะโฟกัส
- ในกรณีที่การถ่ายภาพครั้งแรก วัตถุอยู่ในระยะหลังโฟกัส (back focus) หลังทำการปรับระยะครั้งที่ 1 เราจะพบว่าระยะห่างจากเลนส์ถึงวัตถุจะมากขึ้น ดังนั้นค่าความพร่ามัวที่คำนวณได้จากการถ่ายภาพครั้งที่ 2 จะต้องมีค่ามากขึ้นกว่าค่าในครั้งที่ 1 ถ้าเป็นในกรณีนี้ เราจะทำการปรับระยะเลนส์ในครั้งที่ 2 ไปในทิศทางตรงกันข้ามกับการปรับครั้งที่ 1 และเป็นการปรับให้เข้าสู่ระยะโฟกัสทันที

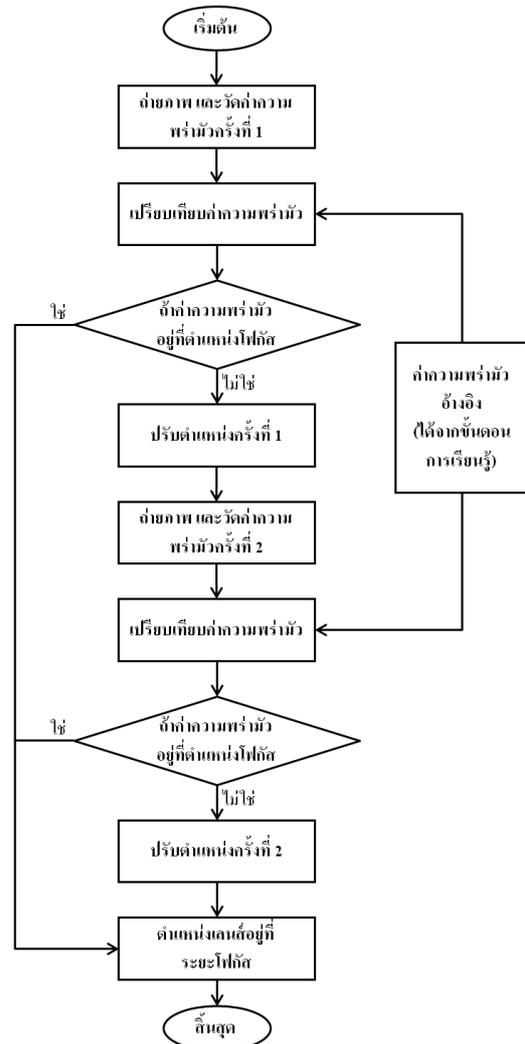
สำหรับกรณีพิเศษซึ่งใช้การปรับระยะน้อยกว่าสองครั้งที่เราต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

- กรณีที่ตำแหน่งเลนส์ครั้งที่ 1 อยู่ในตำแหน่งโฟกัสแล้วหลังจากการวัดและเปรียบเทียบค่าความพร่ามัวครั้งที่ 1 เราจะได้ค่าความพร่ามัวเท่ากับค่าความพร่ามัวอ้างอิงของระยะโฟกัส เราไม่จำเป็นต้องทำการปรับตำแหน่งเลนส์ใดๆทั้งสิ้น
- กรณีที่ตำแหน่งเลนส์ครั้งที่ 1 อยู่ในตำแหน่งก่อนระยะโฟกัสเป็นการลองปรับเข้าสู่ระยะโฟกัสทันที โดยหลังจากการถ่ายภาพการวัดและการเปรียบเทียบค่าความพร่ามัวครั้งที่ 2 ถ้าค่านี้มีค่าเท่ากับค่าที่ระยะโฟกัส ก็จะจบกระบวนการหาระยะโฟกัส โดยไม่จำเป็นต้องปรับระยะครั้งที่ 2 อีก

4. ผลการทดลอง

เพื่อเป็นการตรวจสอบแนวคิดที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ เราได้สร้างระบบที่จำลองสถานการณ์ให้เหมือนกับระบบ machine

vision ที่ใช้ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ แสดงดังรูปที่ 5 นั่นคือ ระบบจะประกอบไปด้วย กล้อง Basler scA750-60fm Firewire monochrome area scan camera และใช้เลนส์ Moritex MML6-HR65D (เฉพาะชิ้นส่วนที่มีกำลังขยาย 2X) อุปกรณ์ปรับระยะกล้องขึ้นลงเป็นลิเนียร์มอเตอร์ที่ควบคุมโดย serial protocol ในโปรแกรมประมวลผลภาพ ดังรูปที่ 6



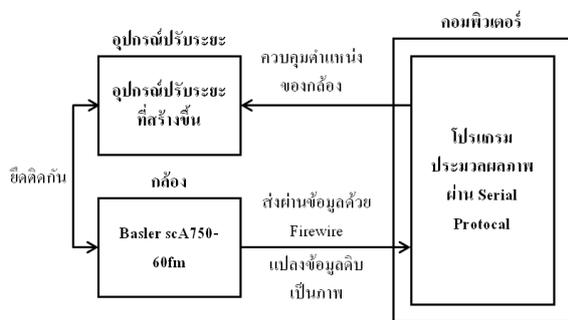
รูปที่ 4. ผังงานการปรับระยะเลนส์เพื่อเข้าสู่ตำแหน่งโฟกัส

สำหรับวัตถุเป้าหมายที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ slider bar ซึ่งเป็นชิ้นส่วนหนึ่งในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ โดยรูปลักษณะ

ทั่วไปจะประกอบไปด้วยแผงวงจร และตัวอักษรแสดงตัวตน² ซึ่งสามารถแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 5. กล้องที่ทำการยึดติดกับอุปกรณ์ปรับระยะ



รูปที่ 6. ขั้นตอนการถ่ายภาพด้วยระบบที่สร้างขึ้น



รูปที่ 7. ตัวอย่างภาพบางส่วนของ slider bar ที่ระยะจุดโฟกัส

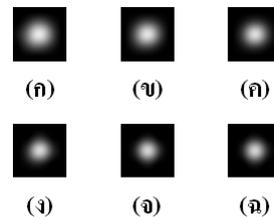
4.1. สมรรถนะของค่าความพร่ามัวในการปรับระยะเลนส์

การทดลองนี้จะแสดงให้เห็นค่าความพร่ามัวที่เราได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.1 สามารถนำไปใช้ในการอ้างอิงระยะที่เหมาะสมในการปรับตำแหน่งเลนส์ให้เข้าสู่ระยะ โฟกัส โดยเราจะทำการถ่ายภาพวัตถุห่างกันทุกๆ ระยะ 20 μm ภายได้ขอบเขตของ

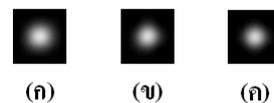
² ด้วยข้อจำกัดทางลิขสิทธิ์ ในบทความนี้จะเราจะแสดงภาพบางส่วนของ slider bar เท่านั้น

ระยะโฟกัส ซึ่งเราจะพิจารณาว่าภาพชุดนี้เป็นภาพที่ถ่ายในขั้นตอนการเรียนรู้ หลังจากนั้นเราจะถ่ายภาพชุดที่ 2 ซึ่งเป็นภาพของ slider bar ชนิดเดียวกันแต่คนละชิ้นงาน โดยเราจะพิจารณาว่าภาพที่ถ่ายในชุดที่ 2 เป็นภาพที่ได้จากขั้นตอนการใช้ งาน โดยถ่ายภาพที่ระยะ 25, 50 และ 75 μm

จากนั้นนำภาพทั้งหมดไปหาค่าความพร่ามัว และระยะวัตถุที่ห่างจากโฟกัส สำหรับการปรับพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการประมวลค่า PSF เราจะใช้ค่าเริ่มต้นของตัวแปรของค่ามาตรฐาน และกำหนดให้ขนาดของเคอร์เนลให้มีค่าเป็น 5x5 โดยผลลัพธ์ PSF ของภาพชุดที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 8 และ 9 และ เมื่อนำมาคำนวณค่าความพร่ามัวตามสมการที่ 2 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 และ 2



รูปที่ 8. (ก), (ข), (ค), (ง), (จ) และ (ฉ) แสดง PSF หรือ kernel ที่ได้จากภาพถ่ายโดยที่ทราบระยะจากจุดโฟกัสด้วยระยะ 100 μm , 80 μm , 60 μm , 40 μm , 20 μm จากจุดโฟกัส และที่จุดโฟกัส ตามลำดับ



รูปที่ 9. (ก), (ข) และ (ค) แสดง PSF หรือ kernel ที่ได้จากการสมมติให้ถ่ายภาพโดยที่ไม่ทราบระยะจากจุดโฟกัสด้วยระยะ 75 μm , 50 μm และ 25 μm จากจุดโฟกัสตามลำดับ

ตารางที่ 1. ค่าความพร่ามัว และระยะห่างของวัตถุกับจุดโฟกัสที่ได้จากการถ่ายภาพโดยที่ทราบระยะจากจุดโฟกัส

ค่าความพร่ามัว	ระยะห่างของวัตถุกับจุดโฟกัส
4.05	100 μm

3.52	80 μm
2.98	60 μm
2.48	40 μm
2.10	20 μm
2.04	ภาพที่จุดโฟกัส

ตารางที่ 2. ค่าความพร่ามัว และระยะห่างของวัตถุกับจุดโฟกัสที่ได้จากการสมมุติให้ถ่ายภาพโดยที่ไม่ทราบระยะจากจุดโฟกัส

ค่าความพร่ามัว	ระยะห่างของวัตถุกับจุดโฟกัส
3.27	75 μm
2.50	50 μm
2.13	25 μm

จากค่าในตารางที่ 1 และ 2 เราจะเห็นได้ว่าค่าความพร่ามัวในภาพชุดที่ 2 นี้ สามารถนำไปใช้ในการอ้างอิงหาระยะห่างจากวัตถุถึงเลนส์ จากค่าความพร่ามัวของภาพที่ถ่ายในขั้นตอนการเรียนรู้ (ชุดที่ 1) ซึ่งค่านี้สามารถนำไปใช้เพื่อทำการปรับระยะโฟกัสต่อไป ตัวอย่างเช่น ภาพทดสอบ (ชุดที่ 2) ที่ถ่ายที่ระยะ 25 μm ซึ่งวัดค่าความพร่ามัวได้เท่ากับตำแหน่งโฟกัส เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าในตารางที่ 2 จะพบว่าค่านี้จะใกล้เคียงกับค่าความพร่ามัวของภาพเรียนรู้ที่ถ่าย ณ ระยะ 20 μm ซึ่งมีค่าความพร่ามัวเท่ากับ 2.10 เช่นเดียวกัน กรณีของภาพที่ถ่ายที่ระยะ 50 และ 75 μm จะสามารถอ้างอิงถึงระยะจากข้อมูลที่คำนวณได้จากภาพเรียนรู้ที่ระยะ 40 และ 80 μm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความพร่ามัวที่วัดได้สามารถนำไปใช้ในการทำนายตำแหน่งที่จะปรับเลนส์ เพื่อเข้าสู่ระยะโฟกัสได้ ในการทดลองถัดไปเราจะแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในภาพรวมเมื่อนำค่าความพร่ามัวนี้ไปใช้ในการปรับตำแหน่งเลนส์ตามอัลกอริทึมที่นำเสนอ

ค่าความพร่ามัวของภาพที่ระยะต่างๆ ของภาพชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 สามารถแสดงดังตารางที่ 1 และ 2 จากนั้นนำภาพที่ได้ไปหาค่าความพร่ามัวเพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้บันทึกไว้เพื่อทำการปรับตำแหน่งของวัตถุไปยังจุดโฟกัส โดยถ้าหากสมมุติให้ตารางที่ 1 คือ ค่าที่ได้จากการบันทึกโดยใช้ PSF จากรูปที่ 8 และ ตารางที่ 2 คือ ค่าที่ไม่ทราบระยะห่างจากจุดโฟกัสโดยใช้ PSF จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าผลการทดลองเป็นไปตามการออกแบบที่วางไว้ ตัวอย่างเช่น ที่ระยะห่าง 25 μm จะมีค่าอยู่

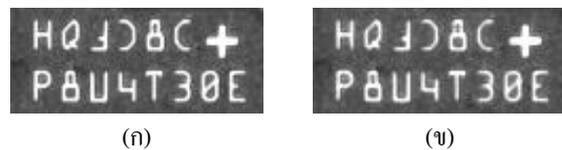
ระหว่าง 20 μm และ 40 μm ซึ่งจะมีค่าความพร่ามัวที่ใกล้เคียง 20 μm มากกว่า

4.2 ความแม่นยำในการปรับระยะเลนส์

การทดลองนี้เราจะแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการปรับตำแหน่งเลนส์เพื่อเข้าสู่ระยะโฟกัสของอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อที่แล้ว โดยเราจะทำการถ่ายภาพ slider bar ชนิดเดียวกันจำนวน 15 bar (มีตัวเลขแสดงตัวตบตัวกัน) โดยจะถ่ายภาพในช่วง 80 μm จากระยะโฟกัส และห่างกันเป็นขั้นๆ ขึ้นละ 20 μm (ค่านี้เทียบเท่ากับค่า Δx ที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้) สำหรับภาพเรียนรู้ เราจะเลือกภาพ slider bar 1 อัน ไว้เป็นข้อมูลอ้างอิง ส่วน ภาพที่เหลือ จะถือว่าเป็นภาพทดสอบที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำ นอกจากนี้เราสสมมุติว่าตำแหน่งเริ่มต้นของการวัดค่าความพร่ามัวอยู่ที่ 60 μm ก่อนระยะโฟกัส (เราพบว่าตำแหน่งเริ่มต้นที่ 40 และ 20 μm ก่อนระยะโฟกัสจะให้ความแม่นยำเท่ากัน) จากการทดลองเราพบว่าอัลกอริทึมสามารถปรับระยะเลนส์จนวิ่งเข้าไปสู่ตำแหน่งโฟกัสได้ความถูกต้องแม่นยำ 93% (ถูกต้อง 13 ภาพ จาก 14 ภาพ)

4.3 อภิปรายผลการทดลอง

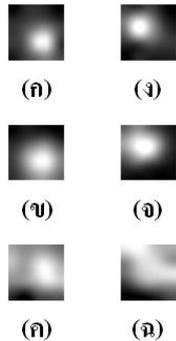
จากการทดลองที่แล้ว เราพบว่าภาพ slider bar ที่ทำให้การปรับตำแหน่งผิดพลาดเนื่องมาจากค่าความพร่ามัวที่วัดได้จากภาพที่ถ่าย ณ ระยะโฟกัสกับค่าที่ได้จากภาพหลังระยะโฟกัส 1 ระยะมีค่าใกล้เคียงกันมากๆ ซึ่งภาพทั้งสองแสดงได้ดังรูปที่ 10 โดยที่วัดค่าความพร่ามัวได้เท่ากับ 488/255 และ 487/255



รูปที่ 10. แสดงภาพ slider bar (ก) ระยะโฟกัส (ข) ระยะหลังโฟกัส 1 ระยะ

นอกจากนี้เราพบว่าจุดอ่อนของงานวิจัยนี้ คือกรณีที่เกิดการสะท้อนของแสงที่บริเวณขอบที่ไม่สม่ำเสมอทั้งหมดทั้งระนาบของวัตถุ ตัวอย่างขอปรากฏการณ์นี้สามารถแสดงดังรูปที่ 11 ซึ่งส่งผลให้การประมาณค่า PSF ผิดพลาดได้ ซึ่งจะมีผลต่อ

ความพร่ามัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างของ PSF ที่คำนวณได้ แสดงดังรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า PSF ที่ได้จะไม่เป็นวงกลมที่มีศูนย์กลางอยู่ที่จุดกึ่งกลางของ kernel



รูปที่ 11. (ก), (ข) และ (ค) แสดง PSF หรือ kernel ที่ได้จากการถ่ายภาพตัวอักษร SC15 ด้วยระยะที่จุดโฟกัส 1.3 mm และ 2.6 mm ตามลำดับ และ (ง), (จ) และ (ฉ) แสดง PSF หรือ kernel ที่ได้จากการถ่ายภาพตัวอักษร SC167 ด้วยระยะที่จุดโฟกัส 1.3 mm และ 2.6 mm ตามลำดับ

5. บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ เราได้นำเสนออัลกอริทึมในการโฟกัสภาพโดยอัตโนมัติ ซึ่งทำงานกับวัตถุชนิดเดียวกันที่ระยะห่างจากวัตถุถึงเลนส์อยู่ในช่วงคงที่ โดยระบบจะทำการถ่ายภาพเรียนรู้ของชิ้นงานที่ระยะห่างเป็นค่าต่างๆ พร้อมกับคำนวณหาค่าความพร่ามัวเก็บไว้เป็นฐานข้อมูลอ้างอิง ค่าความพร่ามัวที่เราใช้ในงานวิจัยนี้ คัดแปลงมาจากการประมาณค่า PSF ที่คำนวณได้จากภาพอินพุต เมื่อเราต้องการปรับระยะโฟกัสเพื่อถ่ายภาพวัตถุ ณ ขณะใช้งาน เราจะทำการถ่ายภาพ และคำนวณหาค่าความพร่ามัวแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงเพื่อใช้ในการปรับระยะที่เหมาะสม โดยอัลกอริทึมนี้ เราจะใช้การปรับระยะไม่เกิน 2 ครั้ง ก็จะเข้าสู่ตำแหน่งโฟกัส จากผลการทดลองเราพบว่าอัลกอริทึมสามารถทำงานได้ถูกต้องแม่นยำมากกว่า 90% และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบตรวจสอบโดยใช้ภาพถ่ายในงานอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถระบุชนิดของชิ้นงาน และช่วงระยะห่างของวัตถุ (working distance) ได้ล่วงหน้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Song, M. Li and L. Sun, "A new auto-focusing algorithm for optical microscope based automated system," International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, pp. 1-5, Dec. 2006.
- [2] C.Y. Chen, R.C. Hwang and Y.J. Chen, "A passive auto-focus camera control system," Applied Soft Computing, vol. 10, no. 1, pp. 296-303, 2010.
- [3] S. Jin, J. Cho, K.H. Kwon and J.W. Jeon, "A Dedicated Hardware Architecture for Real-Time Auto-Focusing using an FPGA," Machine Vision and Applications, vol. 21, no. 5, pp. 727-734, 2010.
- [4] L. C. Chiu and C. S. Fuh, "An efficient auto focus method for digital still camera based on focus value curve prediction model," Journal of Information Science and Engineering, vol.26, no. 4, pp. 1261-1272, 2010.
- [5] S. Allegro, C. Chanel and J. Jacot, "Autofocus for Automated Microassembly Under a Microscope", IEEE Int. Conf. on Image Processing, vol. 1, pp. 677-680, 1996.
- [6] G. Duceux, B. Tamadazte, E. Marchand, N. Le-Fort Piat and G. Fortier, "Autofocusing-Based Visual Servoing : Application to MEMS micromanipulation," International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2010.
- [7] P. T. Yap and P. Raveendran, "Image focus measure based on chebyshev moments," IEE Proceedings - Vision, Image and Signal Processing, vol. 151, no. 2, pp. 128-136, 2004.
- [8] J. Kautsky, J. Flusser, B. Zitová and S. Šimberová, "A new wavelet-based measure of image focus," Pattern Recognition Letters, vol. 23, pp. 1785-1794, 2002.
- [9] Y. Zhang, Y. Zhang and C. Wen, "A new focus measure method using moments," Image and Vision Computing, vol. 18, pp. 959-965, 2000.
- [10] R. Fergus, B. Singh, A. Hertzmann, S.T. Roweis and W.T. Freeman, "Removing camera shake from a single photograph," SIGGRAPH, vol. 25, no. 3, pp. 787-794, 2006.
- [11] Q. Shan, J. Jia and A. Agarwala, "High-Quality Motion Deblurring From a Single Image," ACM Transactions on Graphics, vol. 27, no. 3, pp. 73:1-73:10, Aug. 2008.
- [12] S.M. Smith and J.M. Brady, "SUSAN-a new approach to low level image processing," Journal of Computer Vision, vol. 23, pp. 45-78, 1997