บทที่ 3 แบบจำลองที่นำเสนอ

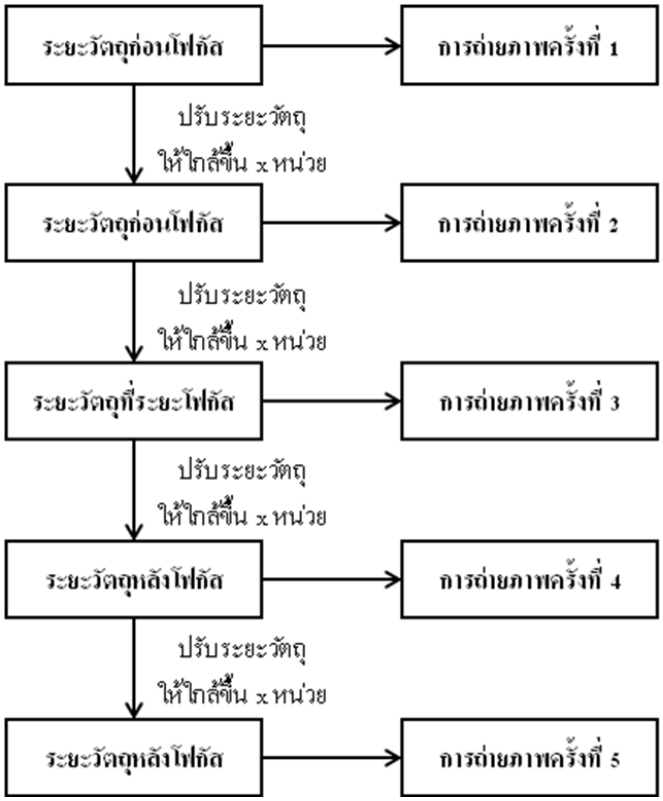
แบบจำลองที่เสนอจะพยายามลดกระบวนการในการถ่ายภาพลง เพื่อช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้เร็วขึ้น โดยเลือกใช้วิธีการบันทึกค่าความพร่ามัวและระยะวัตถุจากโฟกัสของภาพที่ระยะต่างๆในครั้งแรกก่อนการใช้งาน เพื่อใช้ในการจับคู่กับภาพที่ไม่ทราบระยะวัตถุจากโฟกัสของภาพ

ค่าความพร่ามัวและระยะวัตถุจากโฟกัสจะมีความสัมพันธ์ต่อกันเป็นแบบเชิงเส้นก็ต่อเมื่อใช้เลนส์เดี่ยวในการถ่ายภาพ ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วกล้องที่ใช้ในการถ่ายภาพที่มีกำลังขยายต่างๆ ย่อมมีส่วนประกอบของเลนส์และจำนวนของชิ้นเลนส์ที่แตกต่างกันไป ส่งผลให้ค่าความพร่ามัวและระยะวัตถุจากโฟกัสไม่ได้มีความสัมพันธ์ต่อกันเป็นแบบเชิงเส้น แต่ยังคงมีแนวโน้มที่ว่า เมื่อระยะวัตถุอยู่ไกลจากโฟกัสมากขึ้น ย่อมมีค่าความพร่ามัวที่มากขึ้นตามไปด้วย

สำหรับค่าความพร่ามัวและระยะวัตถุจากโฟกัสที่ใช้การนำเสนอจะถูกสมมุติขึ้นให้มีความสัมพันธ์ต่อกันเป็นแบบเชิงเส้น เพื่อใช้ในการอธิบายแบบจำลองเท่านั้น โดยค่าความพร่ามัวที่มากขึ้น แสดงถึงภาพที่พร่ามัวมากขึ้น หรือระยะวัตถุอยู่ไกลจากโฟกัสมากขึ้น

3.1 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง

ครั้งแรกของการใช้งานจำเป็นจะต้องทำการถ่ายภาพเพื่อบันทึกค่าความพร่ามัวและระยะห่างจากโฟกัส โดยทำการถ่ายภาพที่ระยะก่อนโฟกัส และทำการปรับระยะวัตถุให้ใกล้ขึ้นอย่างสม่ำเสมอกันขนาด x หน่วย ตลอดทั้งระยะ พร้อมทั้งทำการถ่ายภาพจนกระทั่งถึงระยะหลังโฟกัส ภายใต้ขอบเขตการทำงานทั้งหมด โดยการปรับระยะวัตถุขนาด x หน่วย ที่เหมาะสมจะถูกกำหนดด้วย Depth of focus ของกล้องและเลนส์ที่ใช้ในการถ่ายภาพ หากเลือกการปรับระยะวัตถุขนาด x หน่วย มากกว่าขนาดของ Depth of focus อาจทำให้ไม่ได้ภาพที่ตำแหน่งโฟกัส ซึ่งการปรับระยะวัตถุอย่างน้อยที่สุดควรจะถ่ายภาพครอบคลุมตำแหน่งโฟกัส หรือควรปรับระยะวัตถุให้น้อยกว่าขนาดของ Depth of focus ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการถ่ายภาพเพื่อบันทึกค่าความพร่ามัวและระยะห่างจากโฟกัสจำนวน 5 ระยะ

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการถ่ายภาพแล้ว จะนำภาพที่ได้ทั้งหมดมาหาค่าความพร่ามัว เพื่อสร้างตารางค่าความพร่ามัวและระยะห่างจากโฟกัส ดังตารางที่ 3.1 โดยอาจเลือกการบันทึกข้อมูลเฉพาะส่วน เช่น ระยะก่อนโฟกัสจนกระทั่งถึงระยะโฟกัส ระยะโฟกัสจนกระทั่งถึงระยะหลังโฟกัส หรือทำการหาค่าเฉลี่ยระหว่างระยะก่อนโฟกัสและหลังโฟกัสจนกระทั่งถึงระยะโฟกัสก็ได้ เนื่องจากความพร่ามัวที่เกิดจากระยะก่อนหรือระยะหลังโฟกัส หากเกิดมีระยะห่างจากโฟกัสเท่ากัน ย่อมมีความพร่ามัวที่เท่ากันตามหลักการของทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างตารางการบันทึกค่าความพร่ามัว และระยะห่างของวัตถุกับจุดโฟกัส

ระยะห่างของวัตถุกับจุดโฟกัส	ค่าความพร่ามัว
ระยะก่อนโฟกัส 2x หน่วย	3
ระยะก่อนโฟกัส x หน่วย	2
ระยะโฟกัส	1
ระยะหลังโฟกัส x หน่วย	2
ระยะหลังโฟกัส 2x หน่วย	3

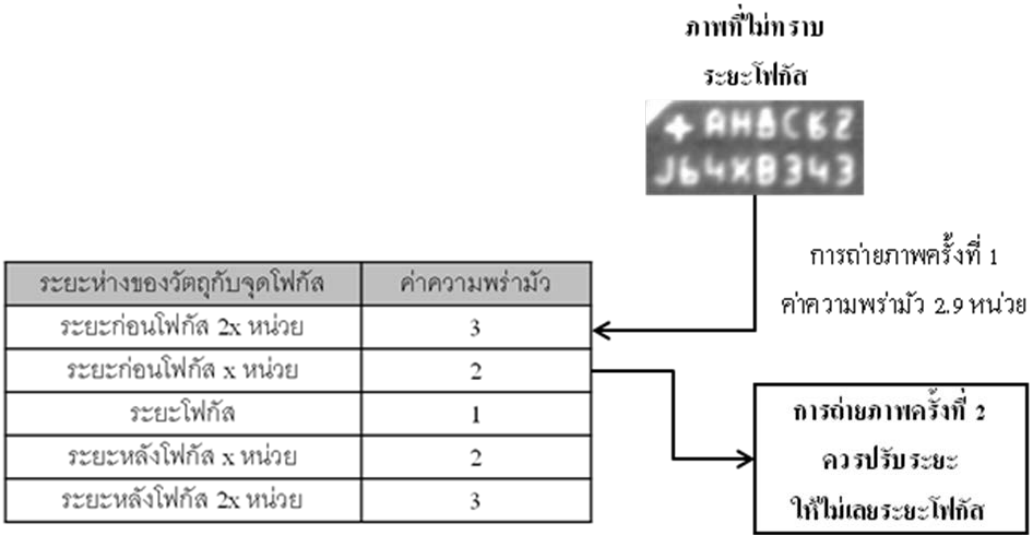
ในส่วนของขั้นตอนการทำงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กรณี ประกอบไปด้วย กรณีตำแหน่งไกลกว่าก่อนหรือหลังโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ กรณีตำแหน่งก่อนโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ กรณีตำแหน่งหลังโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ และกรณีตำแหน่งที่โฟกัสของเลนส์ โดยที่คำว่า 1 ระยะ หมายถึง ระยะวัตถุอยู่ห่างจากโฟกัสของภาพขนาด x หน่วย

แบบจำลองทุกกรณีมีขั้นตอนการทำงานที่แตกต่างกันเล็กน้อย โดยจะแสดงขั้นตอนการทำงานโดยละเอียดเฉพาะหัวข้อที่ 3.1.1 กรณีตำแหน่งไกลกว่าก่อนหรือหลังโฟกัสของเลนส์ x หน่วย สำหรับกรณีอื่นๆจะไม่แสดงขั้นตอนการทำงาน แต่จะกล่าวเพียงหลักการทำงานเท่านั้น

3.1.1 กรณีตำแหน่งไกลกว่าก่อนหรือหลังโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ

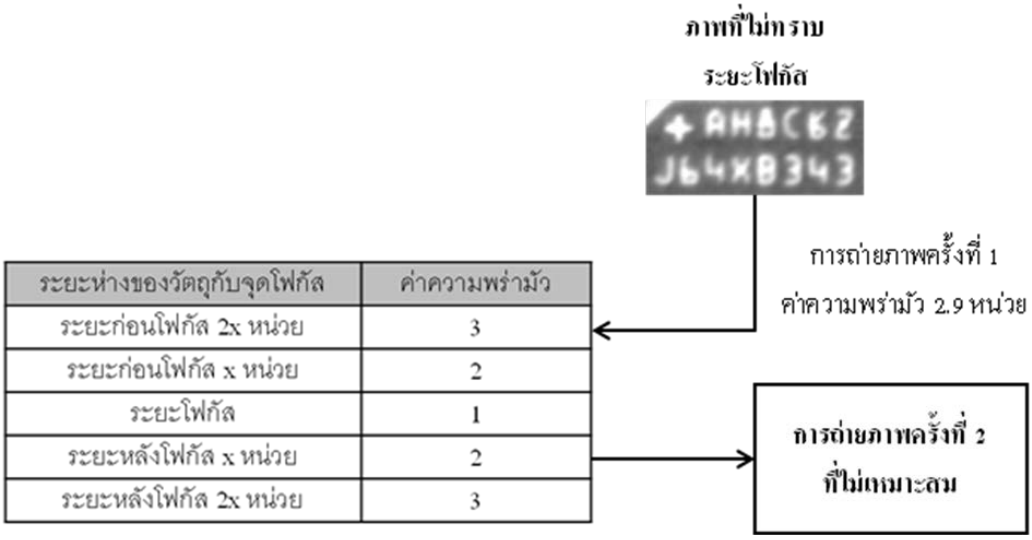
ในการบันทึกค่าความพร่ามัวจำเป็นจะต้องทำการวัดค่าความพร่ามัว และระยะห่างจากโฟกัสเมื่อเราทำการถ่ายภาพที่ไม่ทราบโฟกัส จากนั้น เราจะนำภาพที่ได้ไปวัดความพร่ามัว และนำค่าที่ได้ไปจับคู่กับค่าที่ได้บันทึกไว้ เพื่อใช้ในการปรับตำแหน่งของวัตถุไปยังตำแหน่งที่โฟกัส อย่างไรก็ดี การวัดความพร่ามัวนั้นยากที่จะแยกระยะวัตถุก่อนโฟกัส หรือหลังโฟกัส ดังนั้นเราจำเป็นจะต้องถ่ายภาพครั้งที่ 2 เพื่อเคลื่อนวัตถุไปยังตำแหน่งที่โฟกัส จากกระบวนการทำงานที่กล่าวในเบื้องต้นสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 การวัดค่าความพร่ามัวครั้งที่ 1 โดยขั้นตอนนี้จะเป็นการถ่ายภาพครั้งแรกโดยเราไม่ทราบระยะวัตถุที่เราต้องการถ่าย จากนั้นนำภาพที่ได้ไปวัดค่าความพร่ามัว
- ขั้นตอนที่ 2 การจับคู่ค่าความพร่ามัวครั้งที่ 1 โดยขั้นตอนนี้จะนำค่าที่วัดได้มาจับคู่กับค่าความพร่ามัวที่ได้บันทึกไว้ เพื่อหาระยะโฟกัสจากตารางการบันทึก ซึ่งจะทำให้ทราบว่าควรจะปรับระยะวัตถุเท่าไรจึงจะอยู่ในตำแหน่งโฟกัส
- ขั้นตอนที่ 3 การปรับตำแหน่งของวัตถุ ในขั้นตอนนี้เราไม่อาจทราบว่าภาพที่ถ่ายครั้งแรกเป็นระยะก่อนโฟกัส หรือระยะหลังโฟกัส ดังนั้นจำเป็นจะต้องปรับตำแหน่งวัตถุเพื่อทำการจับคู่ระยะโฟกัสอีกครั้งหนึ่ง โดยเลือกให้เคลื่อนวัตถุให้ใกล้ขึ้น แต่ปรับระยะให้น้อยกว่าระยะห่างจากระยะโฟกัสเล็กน้อย เพื่อให้ไม่เลยระยะโฟกัส ดังรูปที่ 3.2 ควรทำการปรับระยะเพียง x หน่วย แต่ไม่ควรปรับระยะเกิน 2x หน่วย เนื่องจากหากเลยระยะโฟกัสไปแล้ว อาจทำให้เกิดความสับสนว่าเป็นความพร่ามัวที่เกิดก่อนระยะก่อนโฟกัส หรือ ระยะหลังโฟกัส ดังรูปที่ 3.2 การปรับระยะ x หน่วย อาจให้ค่าความพร่ามัวเท่ากับรูปที่ 3.3 ที่มีการปรับระยะ 3x หน่วย



ระยะห่างของวัตถุกับจุดโฟกัส	ค่าความพร่ามัว
ระยะก่อนโฟกัส 2x หน่วย	3
ระยะก่อนโฟกัส x หน่วย	2
ระยะโฟกัส	1
ระยะหลังโฟกัส x หน่วย	2
ระยะหลังโฟกัส 2x หน่วย	3

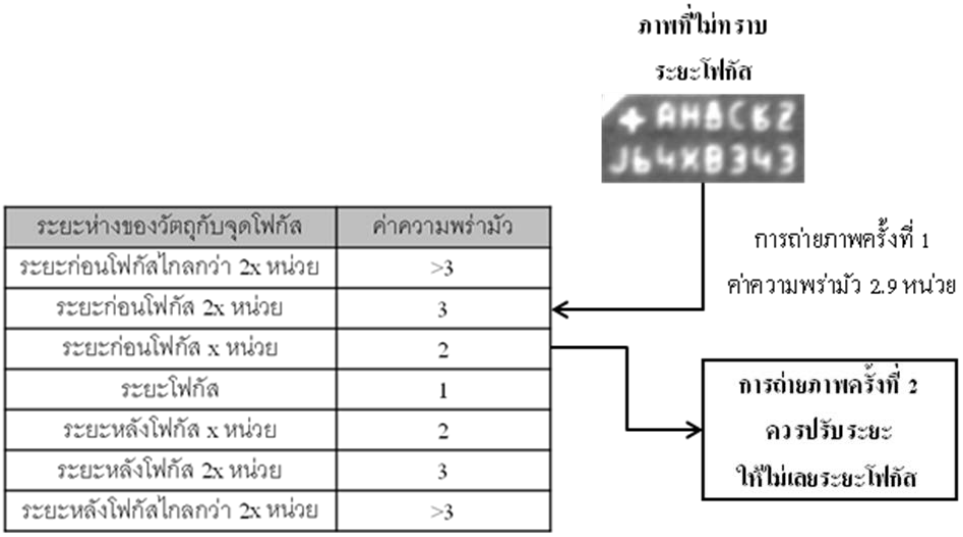
รูปที่ 3.2 การปรับตำแหน่งวัตถุที่เหมาะสม



ระยะห่างของวัตถุกับจุดโฟกัส	ค่าความพร่ามัว
ระยะก่อนโฟกัส 2x หน่วย	3
ระยะก่อนโฟกัส x หน่วย	2
ระยะโฟกัส	1
ระยะหลังโฟกัส x หน่วย	2
ระยะหลังโฟกัส 2x หน่วย	3

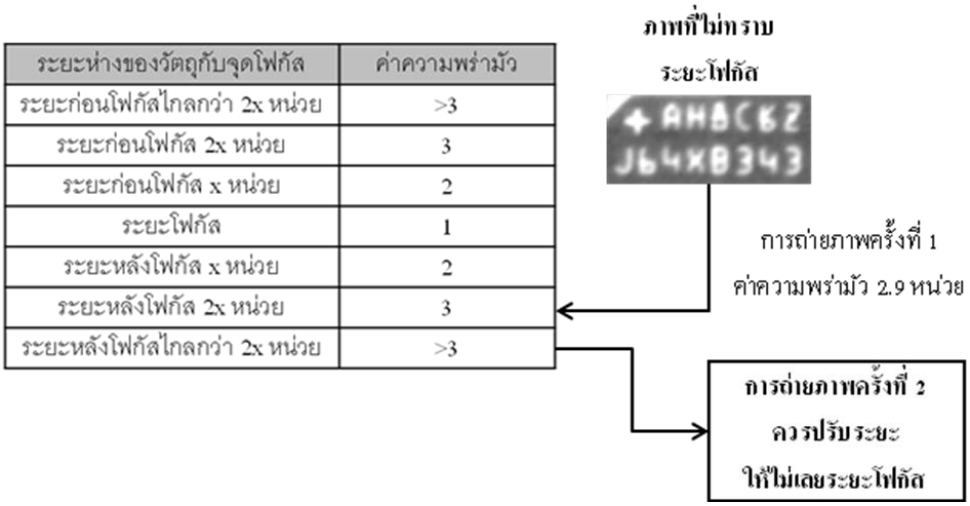
รูปที่ 3.3 การปรับตำแหน่งวัตถุที่ไม่เหมาะสม

- ขั้นตอนที่ 4 การวัดค่าความพร่ามัวครั้งที่ 2 โดยขั้นตอนนี้จะเป็นการถ่ายภาพครั้งที่สองโดยการเลือกค่าที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 3 จากนั้นนำภาพที่ได้ไปวัดค่าความพร่ามัว
- ขั้นตอนที่ 5 การจับคู่ค่าความพร่ามัวครั้งที่ 2 โดยขั้นตอนนี้จะเป็นการแยกแยะระยะก่อนโฟกัส หรือระยะหลังโฟกัส ถ้าหากค่าความพร่ามัวครั้งที่ 1 มากกว่าครั้งที่ 2 จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.4 และถ้าหากค่าความพร่ามัวครั้งที่ 1 น้อยกว่าครั้งที่ 2 จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.5 ซึ่งทำให้ทราบว่าเป็นตำแหน่งระยะก่อนหรือระยะหลังโฟกัส



ระยะห่างของวัตถุกับจุดโฟกัส	ค่าความพร่ามัว
ระยะก่อนโฟกัสไกลกว่า 2x หน่วย	>3
ระยะก่อนโฟกัส 2x หน่วย	3
ระยะก่อนโฟกัส x หน่วย	2
ระยะโฟกัส	1
ระยะหลังโฟกัส x หน่วย	2
ระยะหลังโฟกัส 2x หน่วย	3
ระยะหลังโฟกัสไกลกว่า 2x หน่วย	>3

รูปที่ 3.4 การปรับตำแหน่งวัตถุจากระยะก่อนโฟกัสของเลนส์

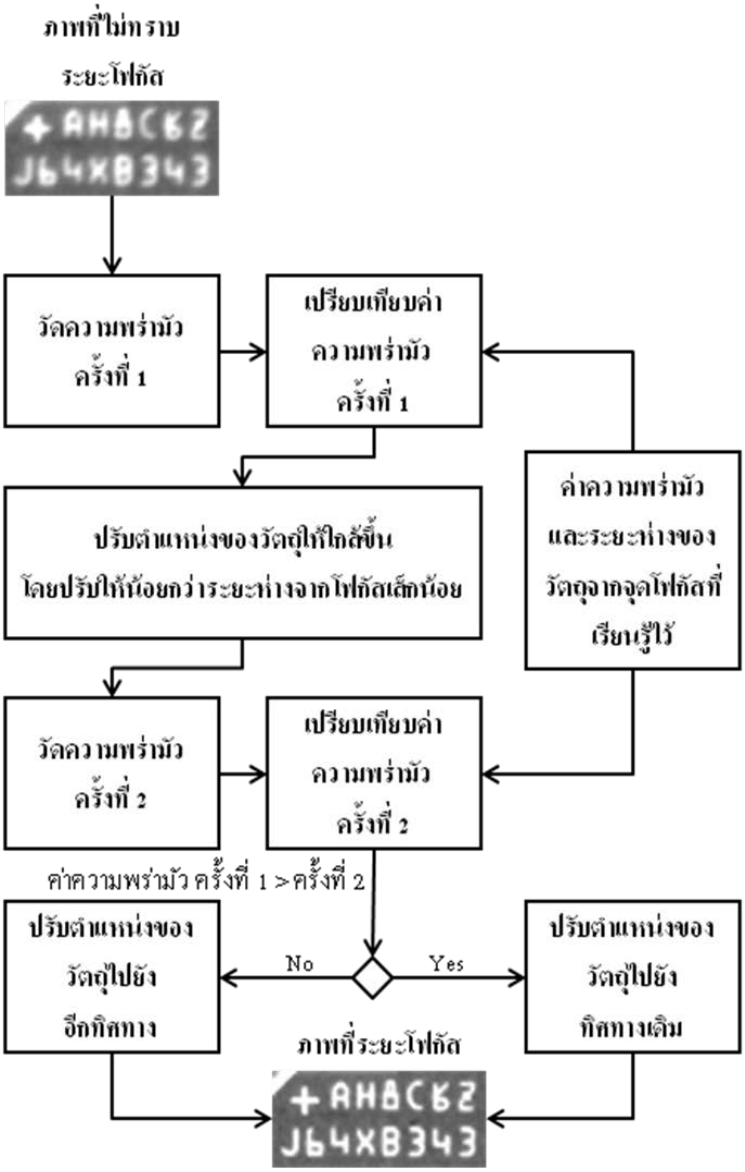


ระยะห่างของวัตถุกับจุดโฟกัส	ค่าความพร่ามัว
ระยะก่อนโฟกัสไกลกว่า 2x หน่วย	>3
ระยะก่อนโฟกัส 2x หน่วย	3
ระยะก่อนโฟกัส x หน่วย	2
ระยะโฟกัส	1
ระยะหลังโฟกัส x หน่วย	2
ระยะหลังโฟกัส 2x หน่วย	3
ระยะหลังโฟกัสไกลกว่า 2x หน่วย	>3

รูปที่ 3.5 การปรับตำแหน่งวัตถุจากระยะหลังโฟกัสของเลนส์

- ขั้นตอนที่ 6 การปรับตำแหน่งของวัตถุเพื่อให้ตรงกับระยะโฟกัส เมื่อทราบระยะโฟกัสที่เหมาะสมแล้ว อีกทั้งยังทราบทิศทางในการปรับระยะวัตถุทั้งในกรณีระยะก่อนโฟกัส หรือระยะหลังโฟกัส ทำให้สามารถปรับตำแหน่งวัตถุครั้งสุดท้ายเพื่อเข้าสู่ระยะโฟกัส

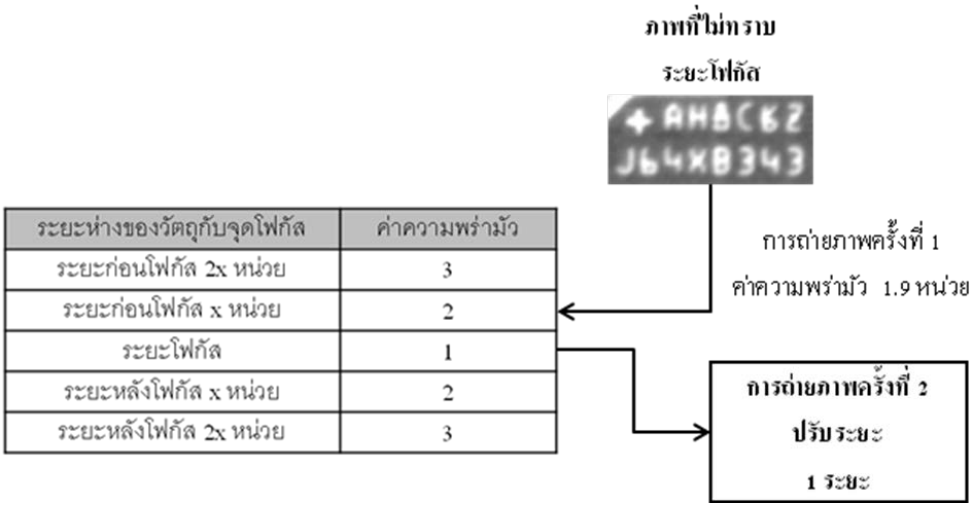
จากขั้นตอนที่ได้ออกแบบไว้ สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพเพื่อแสดงกระบวนการทำงานทั้งหมดให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้น ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพแบบจำลองที่ตำแหน่งไกลกว่าก่อนหรือหลังระยะโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ

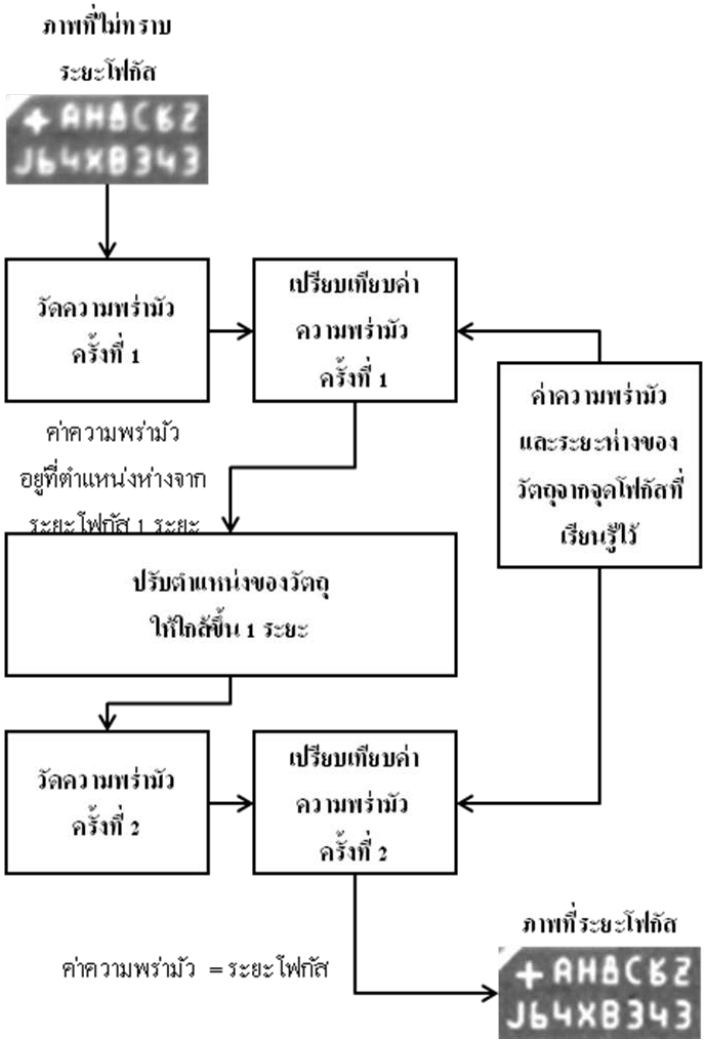
3.1.2 กรณีตำแหน่งก่อนระยะโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ

ในกรณีการถ่ายภาพครั้งแรกแล้วพบว่ามีค่าความพร่ามัวที่ตำแหน่งห่างจากระยะโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ ดังรูปที่ 3.7 ให้ปรับตำแหน่งของวัตถุให้ใกล้ขึ้นอีก 1 ระยะ และทำการถ่ายภาพครั้งที่ 2 หากค่าพบว่ามีค่าความพร่ามัวที่ระยะโฟกัสพอดี ก็ไม่จำเป็นจะต้องปรับตำแหน่งของวัตถุอีก ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพเพื่อแสดงกระบวนการทำงานทั้งหมดให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้น ดังรูปที่ 3.8



ระยะห่างของวัตถุกับจุดโฟกัส	ค่าความพร่ามัว
ระยะก่อนโฟกัส 2x หน่วย	3
ระยะก่อนโฟกัส x หน่วย	2
ระยะโฟกัส	1
ระยะหลังโฟกัส x หน่วย	2
ระยะหลังโฟกัส 2x หน่วย	3

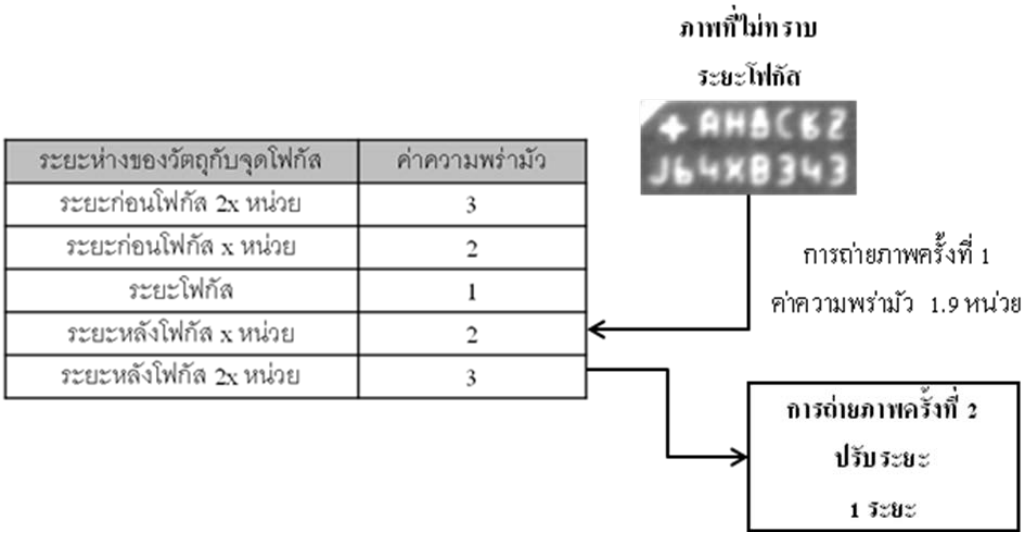
รูปที่ 3.7 แสดงวัตถุที่ตำแหน่งก่อนระยะโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ



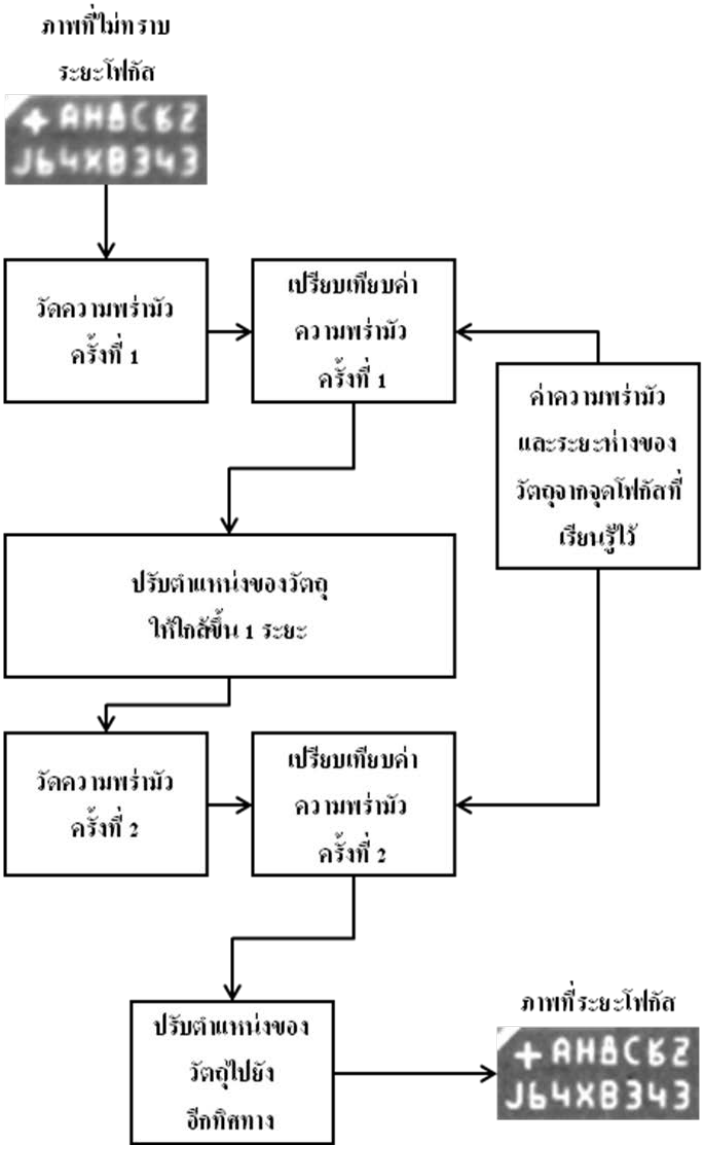
รูปที่ 3.8 แผนภาพแบบจำลองที่ตำแหน่งก่อนระยะโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ

3.1.3 กรณีตำแหน่งหลังระยะโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ

ในกรณีการถ่ายภาพครั้งแรกแล้วพบว่ามีค่าความพร่ามัวที่ตำแหน่งห่างจากระยะโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ ดังรูปที่ 3.9 ให้ปรับตำแหน่งของวัตถุให้ใกล้ขึ้นอีก 1 ระยะ และทำการถ่ายภาพครั้งที่ 2 หากค่าพบว่ามีค่าความพร่ามัวที่ห่างจากระยะโฟกัส 2 ระยะ ให้ปรับตำแหน่งของวัตถุไปยังอีกทิศทางหนึ่งอีก ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพเพื่อแสดงกระบวนการทำงานทั้งหมดให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้น ดังรูปที่ 3.10



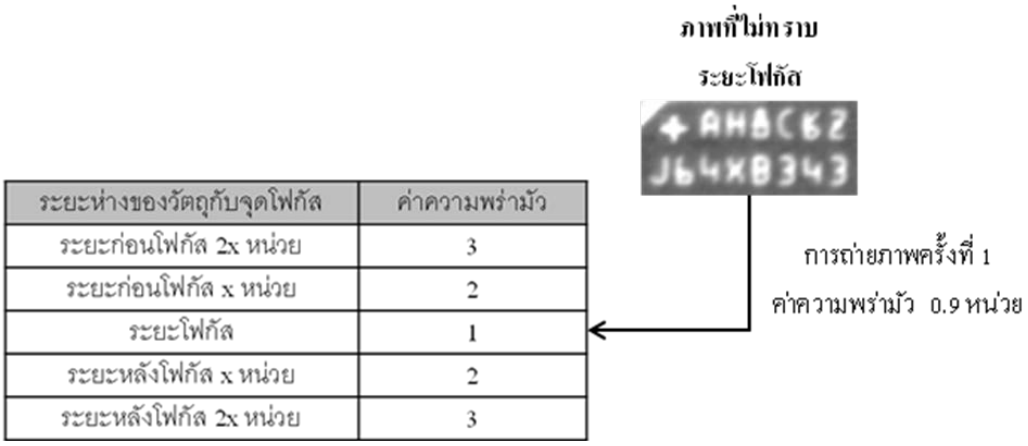
รูปที่ 3.9 แสดงวัตถุที่ตำแหน่งหลังระยะโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ



รูปที่ 3.10 แผนภาพแบบจำลองที่ตำแหน่งหลังระยะโฟกัสของเลนส์ 1 ระยะ

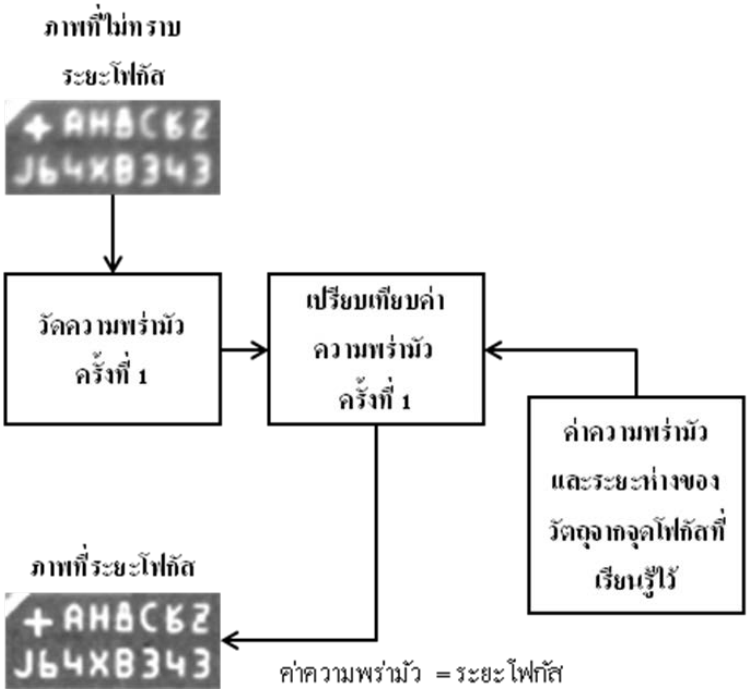
3.1.4 กรณีตำแหน่งที่ระยะโฟกัสของเลนส์

ในกรณีการถ่ายภาพครั้งแรกแล้วพบว่ามีค่าความพร่ามัวที่ระยะโฟกัสของเลนส์พอดี ก็ไม่จำเป็นจะต้องปรับตำแหน่งของวัตถุอีก ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพเพื่อแสดงกระบวนการทำงานทั้งหมดให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้น ดังรูปที่ 3.12



ระยะห่างของวัตถุกับจุดโฟกัส	ค่าความพร่ามัว
ระยะก่อนโฟกัส 2x หน่วย	3
ระยะก่อนโฟกัส x หน่วย	2
ระยะโฟกัส	1
ระยะหลังโฟกัส x หน่วย	2
ระยะหลังโฟกัส 2x หน่วย	3

รูปที่ 3.11 แสดงวัตถุที่ระยะโฟกัสของเลนส์



รูปที่ 3.12 แผนภาพแบบจำลองที่ระยะโฟกัสของเลนส์

3.2 การเลือกวิธีการวัดความพร่ามัว

การโฟกัสภาพโดยอัตโนมัติเกือบทุกวิธีจำเป็นจะต้องใช้วิธีการวัดต่างๆ เพื่อหาระยะโฟกัส ซึ่งพวกเราจะคัดเลือกวิธีการจากงานวิจัยอื่นๆ ที่เหมาะสมและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองที่นำเสนอ

3.2.1 การวัดโฟกัสภาพ

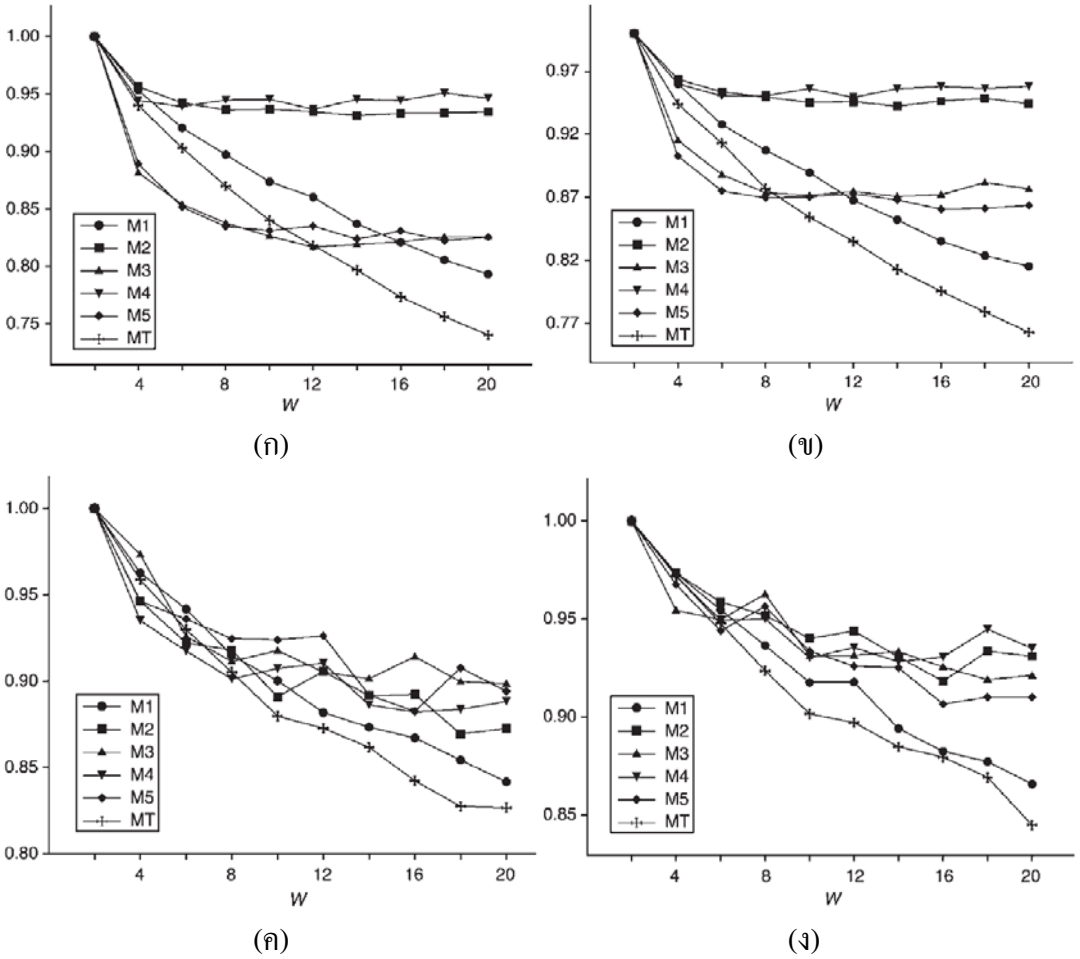
งานวิจัยเกี่ยวกับการวัดโฟกัสภาพส่วนใหญ่จะเป็นการวัดโฟกัสเพื่อแสดงสมรรถนะว่ามีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนเพียงใด ซึ่งอาจจะใช้วิธีการปรับระยะด้วยมอเตอร์ หรืออาจจะใช้วิธีการทำภาพให้พร่ามัวและเพิ่มสัญญาณรบกวนด้วยฟิลเตอร์ก็ตาม

P.T. Yap และ P. Raveendran [1] ใช้วิธีการวัดโฟกัสด้วยหลักการพื้นฐานโมเมนต์ของ Chebyshev ด้วยภาพ f(x, y) ที่มีขนาด MxN และทำการนอร์มอลไลซ์ดังสมการที่ 3.1

$$\tilde{f}(x,y) = \frac{f(x,y)}{\sqrt{\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}[f(x,y)]^2}} \tag{3.1}$$

$$M_T = \frac{\left\| H(\tilde{f};P) \right\|}{\left\| L(\tilde{f};P) \right\|} \tag{3.2}$$

โดยที่ H แสดงโมเมนต์ของ Chebyshev ระดับสูง และ L แสดงโมเมนต์ของ Chebyshev ระดับต่ำ และ P คือ ระดับของโมเมนต์ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ M+N-2 ซึ่งผลการทดลองจะเปรียบเทียบกับการวัดค่าโฟกัสด้วย M_1 ถึง M_5 ดังตารางที่ 3.2 และวิธีการที่เสนอจะถูกแทนด้วย M_T ซึ่งจะถูกทำให้มีมาตรฐานเดียวกัน โดยการหารด้วยค่าสูงสุดที่วัดได้ในแต่ละภาพ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าที่ได้จากการวัดโฟกัสมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 ดังรูปที่ 3.13 แสดงผลการทดลองที่สามารถทนทานต่อ Gaussian และ salt-and-pepper noise ได้ โดยที่ W คือ Average masks และเมื่อขนาดของ W มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ภาพมีความพร่ามัวมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3.13 ค่าที่ได้จากการวัดโฟกัสสำหรับภาพที่พร่ามัวด้วย Gaussian และ salt-and-pepper noise โดยขนาด Average masks ของ W x W, W = 2, 4,…, 20

(ก) ใช้ Gaussian noise ที่มีความแปรปรวนเท่ากับ 0.015

(ข) ใช้ Gaussian noise ที่มีความแปรปรวนเท่ากับ 0.020

(ค) ใช้ salt-and-pepper noise ที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.15

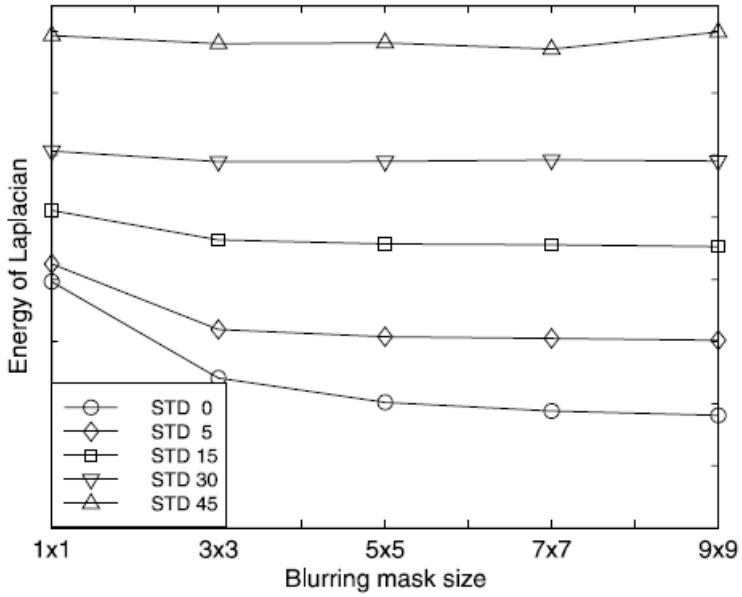
(ง) ใช้ salt-and-pepper noise ที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.20

ตารางที่ 3.2 คำอธิบายการวัดค่าโฟกัสด้วยโมเมนต์ที่ 1 ถึง 5

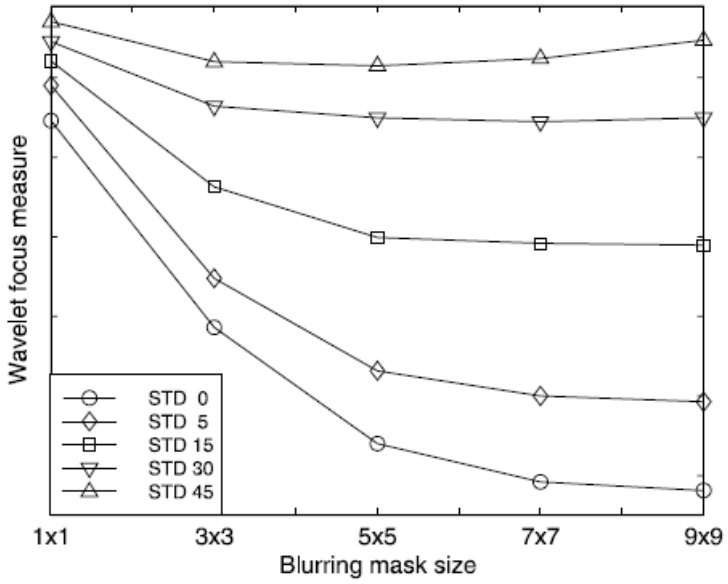
Description	Notation	Definition
Variance of image grey levels	M_1	$\iint (g(x,y)-\mu)^2 dxdy$
l_1 - norm of image gradient	M_2	$\iint \left\|\frac{\partial g(x,y)}{\partial x}\right\| + \left\|\frac{\partial g(x,y)}{\partial y}\right\| dxdy$
l_2 - norm of image gradient	M_3	$\iint \left[\frac{\partial g(x,y)}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial g(x,y)}{\partial y}\right]^2 dxdy$
l_3 - norm of image gradient	M_4	$\iint \left\|\frac{\partial^2 g(x,y)}{\partial^2 x}\right\| + \left\|\frac{\partial^2 g(x,y)}{\partial^2 y}\right\| dxdy$
Energy of Laplacian of image	M_5	$\iint \left[\frac{\partial^2 g(x,y)}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 g(x,y)}{\partial^2 y}\right]^2 dxdy$

J. Kautsky และคณะ [2] ใช้วิธีการวัดโฟกัสด้วยหลักการพื้นฐานของ discrete wavelet transform โดยใช้อัตราส่วนระหว่างขนาดของแถบความถี่สูงและขนาดของแถบความถี่ต่ำของภาพ และใช้ Daubechies wavelets มาประเมินค่าในการวัด ซึ่งภาพที่ใช้ในการทดลองจะใช้ blurring mask เพื่อเพิ่มความพร่ามัวของภาพ และจะใช้ slight additive noise เพื่อทดสอบความทนทานของสัญญาณรบกวน ดังรูปที่ 3.14 โดยผลการทดลองจะเปรียบเทียบกับการวัดค่าโฟกัสด้วย M_1 และ M_5 และวิธีการที่เสนอจะถูกแทนด้วย W ซึ่งไม่ได้ถูกทำให้มีมาตรฐานเดียวกัน ทำให้ค่าที่ได้จากการวัดโฟกัสมีค่าแตกต่างกันไป ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16

รูปที่ 3.14 ตัวอย่างภาพ Lena ที่ใช้ในการทดลอง ภาพซ้ายบนจะเป็นภาพที่ถูกทำให้พร่ามัวด้วย averaging mask ขนาด 3x3 ด้วย slight additive noise ที่มี STD = 5 โดยภาพขวาบนมี STD = 30 และภาพซ้ายล่างจะเป็นภาพที่ถูกทำให้พร่ามัวด้วย averaging mask ขนาด 9x9 ด้วย slight additive noise noise ที่มี STD = 5 โดยภาพขวาล่างมี STD = 3

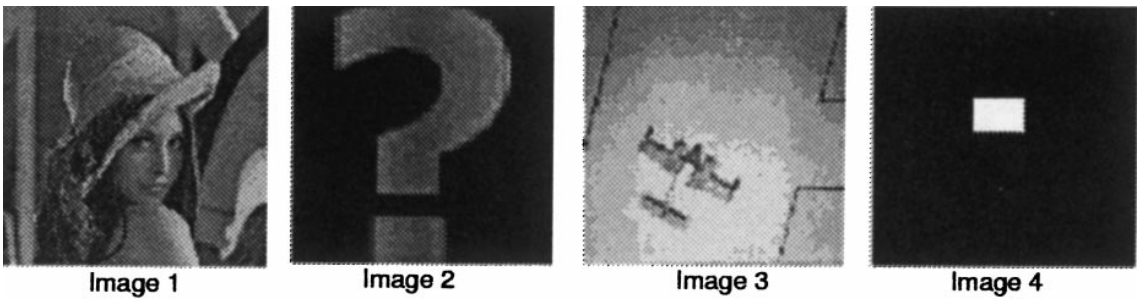


รูปที่ 3.15 ผลการวัดค่าโฟกัสของภาพ Lena ด้วย Energy of Laplacian M_5

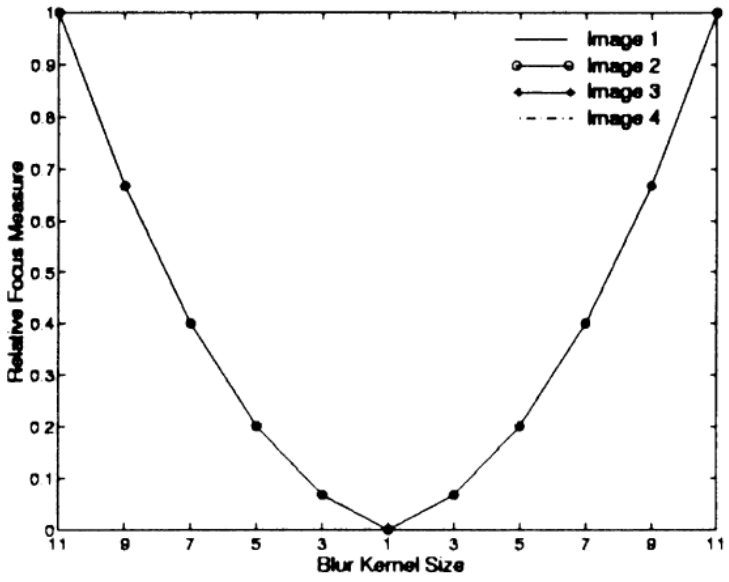


รูปที่ 3.16 ผลการวัดค่าโฟกัสของภาพ Lena ด้วย Daubechies wavelet โดยใช้ 10 taps และ depth เท่ากับ 2

Y. Zhang และคณะ [3] ใช้การหาโมเมนต์ในลำดับที่ 2 และ 4 ของภาพที่จำลองการถ่ายภาพอย่างต่อเนื่องกัน ข้อดีของวิธีการดังกล่าวจะได้กราฟของจุดโฟกัสที่มีความโค้งลักษณะเดียวกัน ไม่ว่าจะถ่ายภาพวัตถุใดก็ตาม แต่ทุกกราฟจะต้องทำให้มีมาตรฐานเดียวกันโดยการหารด้วยค่าสูงสุดที่วัดได้ในแต่ละภาพ ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าสูงสุดของกราฟจะมีค่าเป็น 1 ซึ่งเกิดการหารด้วยค่าสูงสุดที่วัดได้ และเมื่อผ่านกระบวนการนี้แล้ว จะทำให้กราฟของทุกๆ ภาพมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากจนมีลักษณะของกราฟที่ทับกัน



รูปที่ 3.17 ภาพที่ใช้ในการทดลอง



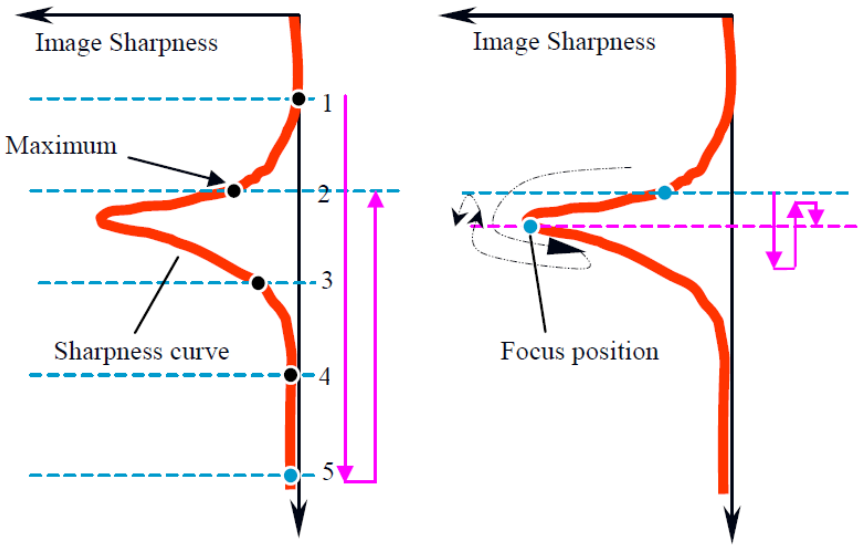
รูปที่ 3.18 กราฟแสดงค่าโฟกัสที่ค่าความพร่ามัวต่างๆ

การโฟกัสภาพโดยจำลองการถ่ายภาพทุกๆระยะ และนำค่าที่วัดได้ในแต่ละภาพมาทำให้มีมาตรฐานเดียวกันจะไม่สามารถนำมาลดขั้นตอนการถ่ายภาพได้ เนื่องจากการโฟกัสภาพโดยอัตโนมัติจำเป็นจะต้องถ่ายภาพให้มีความถี่ที่ครอบคลุม DOF หากทำการลดขั้นตอนที่มากเกินไปอาจจะทำให้ภาพที่ได้ไม่อยู่ที่ระยะโฟกัส

3.2.2 การโฟกัสภาพโดยอัตโนมัติ

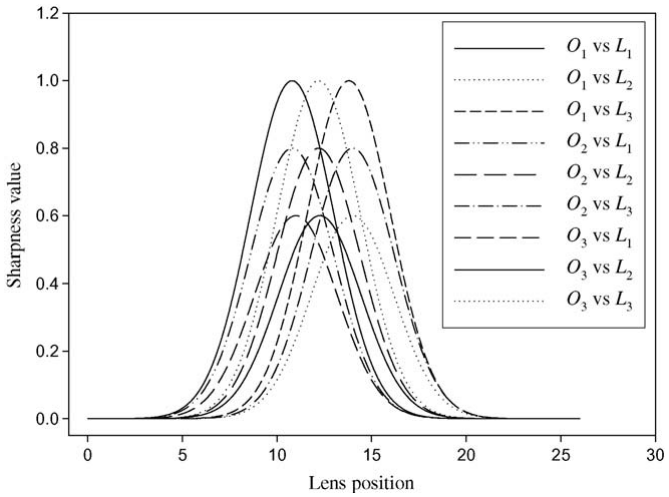
งานวิจัยเกี่ยวกับการโฟกัสโดยอัตโนมัติส่วนใหญ่จะเป็นการแสดงวิธีการโฟกัสภาพโดยอัตโนมัติ โดยจะต้องใช้วิธีการวัดค่าโฟกัสในการหาระยะโฟกัสของภาพ ซึ่งอาจจะวิธีการปรับระยะด้วยมอเตอร์ หรืออาจจะใช้วิธีการทำภาพให้พร่ามัวด้วยการจำลองก็ตาม

Y. Song และคณะ [4] เสนอวิธีการหาโฟกัสโดยอัตโนมัติด้วยการปรับมอเตอร์ค้นหาอย่างคร่าวๆ เพื่อสังเกตลักษณะของบริเวณที่น่าจะเป็นระยะโฟกัสของภาพ จากนั้นจะทำการปรับมอเตอร์ค้นหาอย่างละเอียดอีกครั้งในบริเวณที่สนใจ ดังรูปที่ 3.19 โดยการวัดค่าโฟกัสจะใช้อัลกอริทึม Smallest Univalue Segment Assimilating Nucleus (SUSAN) มาปรับปรุงฟังก์ชั่น Boolean ให้เหมาะสมมากขึ้น



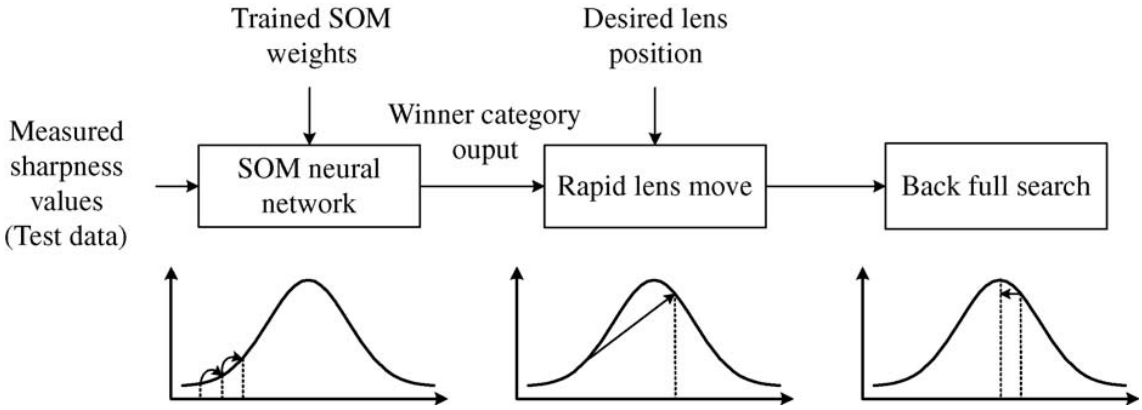
รูปที่ 3.19 ขั้นตอนในการค้นหาระยะโฟกัสของภาพ
(ก) แสดงการค้นหาอย่างคร่าวๆในเบื้องต้น
(ข) แสดงการค้นหาอย่างละเอียดในบริเวณที่สนใจ

C.Y. Chen และคณะ [5] ใช้วิธีการ Lifting 5/3 discrete wavelet transformation และ Morphology sharpness ในการวัดค่าโฟกัส ส่วนวิธีการหาโฟกัสโดยอัตโนมัติจะใช้วิธีการ Self-organizing map (SOM) neural network ในการเรียนรู้วัตถุแต่ละชนิดที่ระยะต่างๆ ดังรูปที่ 3.20 โดยที่ O หมายถึง ชนิดของวัตถุ และ L หมายถึง ระยะห่างระหว่างวัตถุกับกล้อง



รูปที่ 3.20 แสดงค่าความคมชัดของวัตถุต่างชนิดกันที่ระยะต่างๆ

สำหรับการใช้งานจะต้องหาค่าความคมชัดซึ่งได้จากวิธีการวัดค่าโฟกัสในช่วง 3 ระยะแรกเสียก่อน จากนั้นนำค่าที่ได้เข้าสู่ SOM neural network เพื่อหาระยะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับตำแหน่งของเลนส์ และทำการค้นหาอย่างละเอียดอีกครั้งเพื่อหาโฟกัสของภาพ ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงวิธีการหาโฟกัสโดยอัตโนมัติของ C.Y. Chen และคณะ

ในการค้นคว้าเกี่ยวกับงานวิจัยด้านการโฟกัสโดยอัตโนมัติพบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากพยายามลดขั้นตอนการถ่ายภาพ แต่ยังไม่สามารถลดขั้นตอนได้มากเท่าที่ควร ซึ่งวิธีการที่พบมักจะใช้การค้นหาคร่าวๆในเบื้องต้น การเรียนรู้ภาพที่ระยะวัตถุต่างๆ และการเลื่อนระยะให้ห่างมากขึ้นในช่วงที่ความพร่ามัวยังสูงอยู่

3.2.3 การแยกบริเวณของภาพที่ชัดและพร่ามัว

R. Liu และคณะ [6] ได้เสนอการค้นหาและจำแนกส่วนที่พร่ามัวของภาพ ซึ่งได้ใช้วิธีการที่แตกต่างกัน 4 วิธีในการจำแนก บริเวณที่ชัด บริเวณที่พร่ามัว และบริเวณที่มีการเคลื่อนไหว ซึ่งประกอบไปด้วย local power spectrum slope, gradient histogram span, maximum saturation และ local autocorrelation congruency

วิธีการ local power spectrum slope จะคำนวณ power spectrum ของภาพ I ที่มีขนาด N x N ด้วยการหาขนาดกำลังสองของ Discrete Fourier transform (DFT)

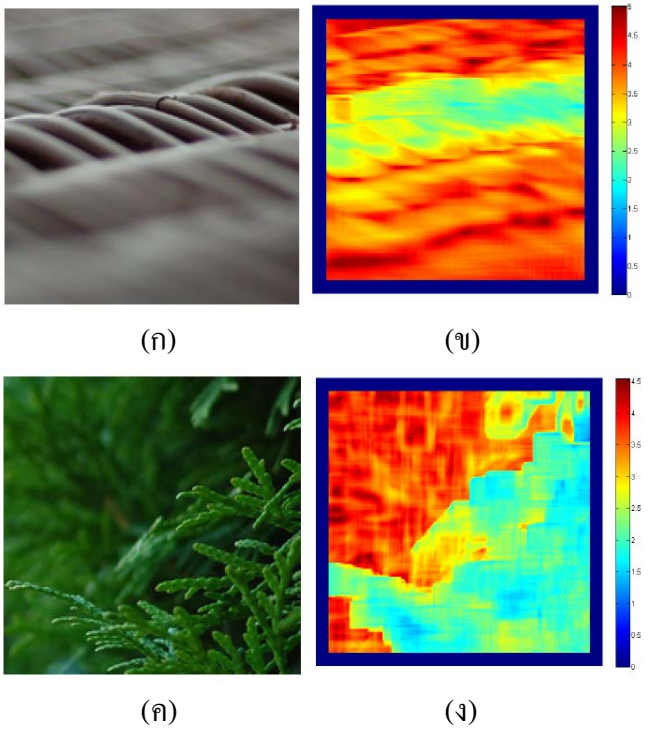
$$S(u,v) = \frac{1}{N^2}\left|I(u,v)\right|^2 \tag{3.3}$$

โดย I(u, v) แสดงถึง Fourier transform ของภาพที่เกิดจากการแปลงเป็น polar coordinates ซึ่ง $u = f\cos\theta$ และ $v = f\sin\theta$ จะได้ $S(f,\theta)$ จากนั้นทำการบวก power spectra S ในทุกๆทิศทางของ θ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$S(f) = \sum_{\theta} S(f,\theta) \approx A/\ f^{-\alpha} \tag{3.4}$$

โดย A คือ Amplitude scaling factor สำหรับการปรับค่า และ α คือ frequency exponent หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า slope of power spectrum โดยค่าที่ได้จากการเรียนรู้สำหรับภาพธรรมชาติทั่วไปจะพบว่า $\alpha \approx 2$ ซึ่งภาพที่มีความพร่ามัวมากจะมีค่า α ที่มากตามไปด้วย

ในขั้นตอนต่อไปจะทำการคำนวณค่า α ของทั้งภาพ (α_o) จากนั้นคำนวณค่า α เฉพาะส่วนของภาพ (α_p) โดยขนาดเฉพาะส่วนที่แนะนำจะมีค่าเท่ากับ 17 x 17 พิกเซล ถ้าหากพบว่าค่า α_p มีค่ามากกว่า α_o แสดงว่าบริเวณดังกล่าวมีความพร่ามัว โดยผลการเปรียบเทียบในแต่ละบริเวณจะแสดง ดังรูปที่ 3.22



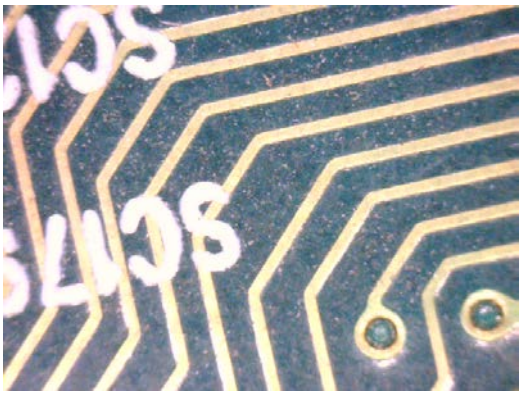
(ก) (ข)

(ค) (ง)

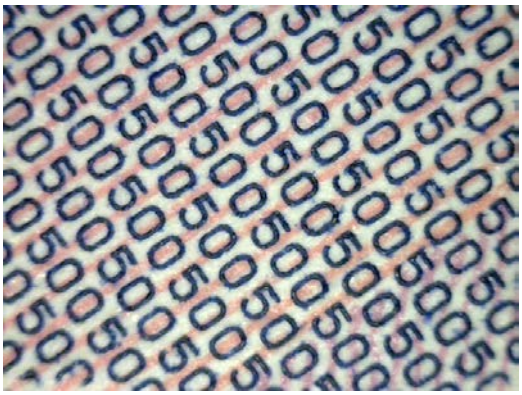
รูปที่ 3.22 ผลการเปรียบเทียบที่ได้จากวิธีการ local power spectrum slope
(ก) และ (ค) แสดงภาพก่อนผ่านกระบวนการ
(ข) และ (ง) แสดงภาพหลังผ่านกระบวนการ

สำหรับวิธีการหา local power spectrum slope พวกเราได้มีการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับแบบจำลองที่ได้นำเสนอ โดยการนำภาพที่มีความพร่ามัวไม่เท่ากันมาต่อกันเพื่อเปรียบเทียบว่าภาพย่อยใดมีค่าความพร่ามัวที่น้อยที่สุด และภาพใดมีค่าความพร่ามัวในลำดับถัดไป เพื่อเก็บเป็นฐานข้อมูล และนำมาเปรียบเทียบในภายหลัง โดยผลจากการนำไปประยุกต์ใช้พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถใช้งานได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังขาดการแสดงผลที่ชัดเจน

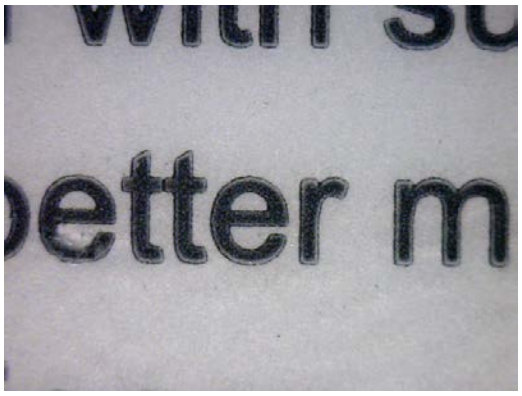
ในการประยุกต์ใช้ใช้สำหรับแบบจำลองที่ได้นำเสนอด้วยวิธีการหา local power spectrum slope โดยใช้กล้อง Dino-Lite Digital Microscope AM313 ที่กำลังขยาย 60X โดยภาพที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยภาพ CIR หมายถึง ภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ภาพ 500 หมายถึง ภาพตัวอักษร 500 บนธนบัตร และ ภาพ TEXT หมายถึง ภาพตัวอักษรทั่วไป ดังรูปที่ 3.23 ถึง 3.25 ตามลำดับ และมีการถ่ายถ่ายภาพ 3 ระยะ โดยระยะที่ 1 จะอยู่ที่ระยะโฟกัส และจะมีความพร่ามัวมากขึ้นตามระยะที่มากขึ้น ซึ่งจะเรียกเป็นอักษรย่อ เช่น CIR 60X 1 หมายถึง ภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังขยาย 60X ที่ระยะที่ 1



รูปที่ 3.23 ภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์

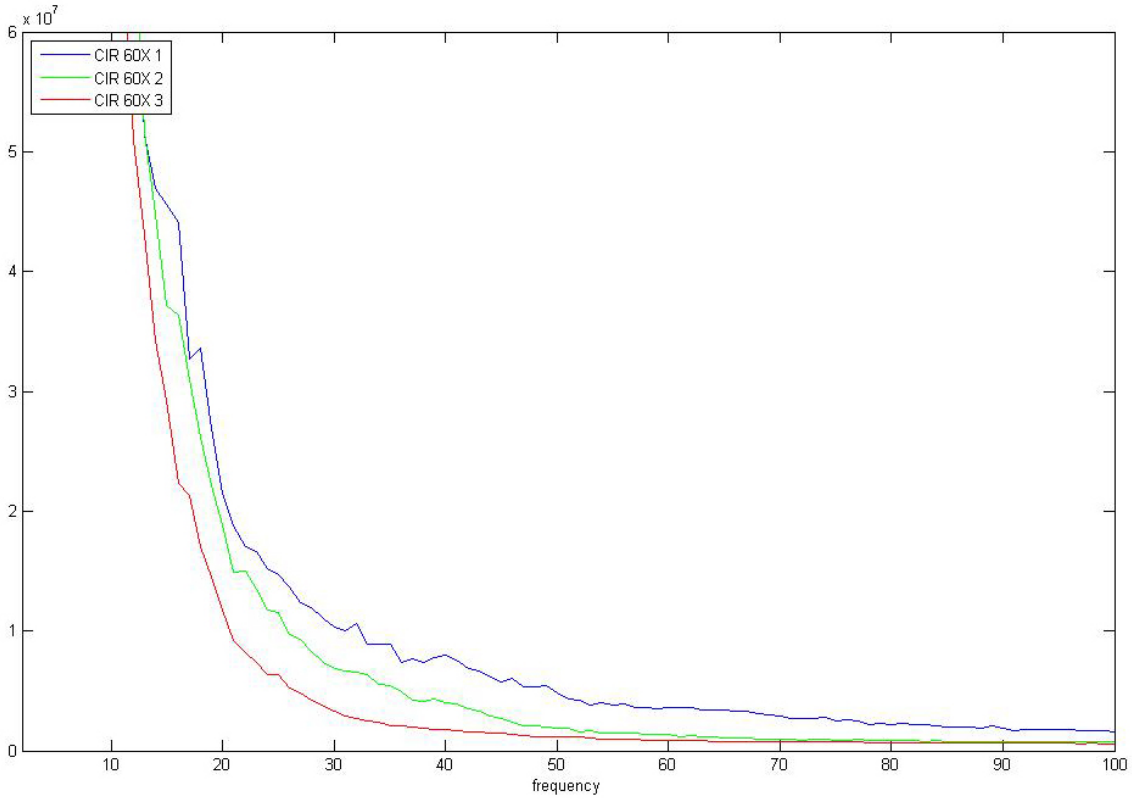


รูปที่ 3.24 ภาพตัวอักษร 500 บนธนบัตร

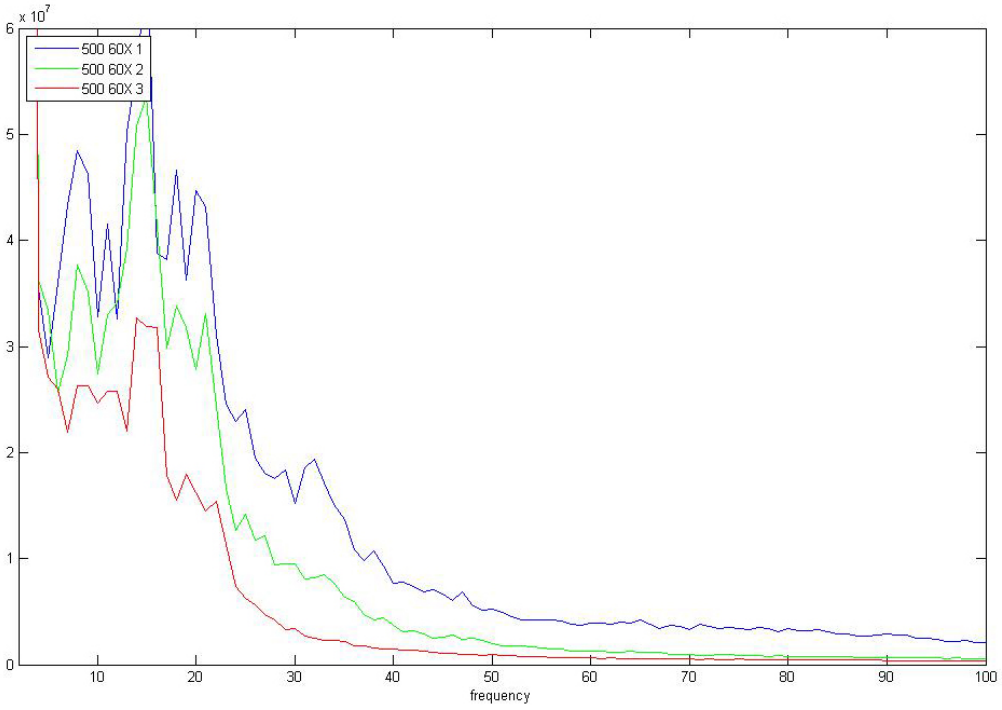


รูปที่ 3.25 ภาพตัวอักษรทั่วไป

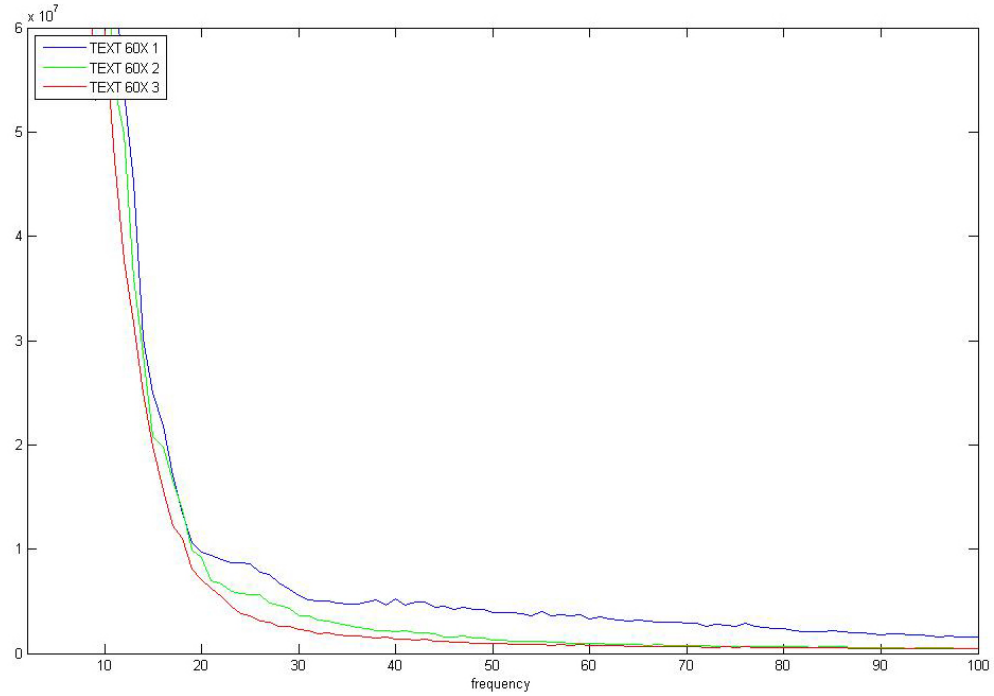
ในการทดลองของพวกเราจะทำการเปรียบเทียบภาพที่ละชุด โดยแสดงทั้ง 3 ระยะพร้อมกัน เพื่อให้เห็นความชัดเจนในการแยกระยะทั้ง 3 ระยะ ดังรูปที่ 3.26 ถึง 3.28 และแสดงทุกภาพพร้อมกันเพื่อเปรียบเทียบในระยะที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 3.29 และเปรียบเทียบในระยะที่ 2 และ 3 ดังรูปที่ 3.30



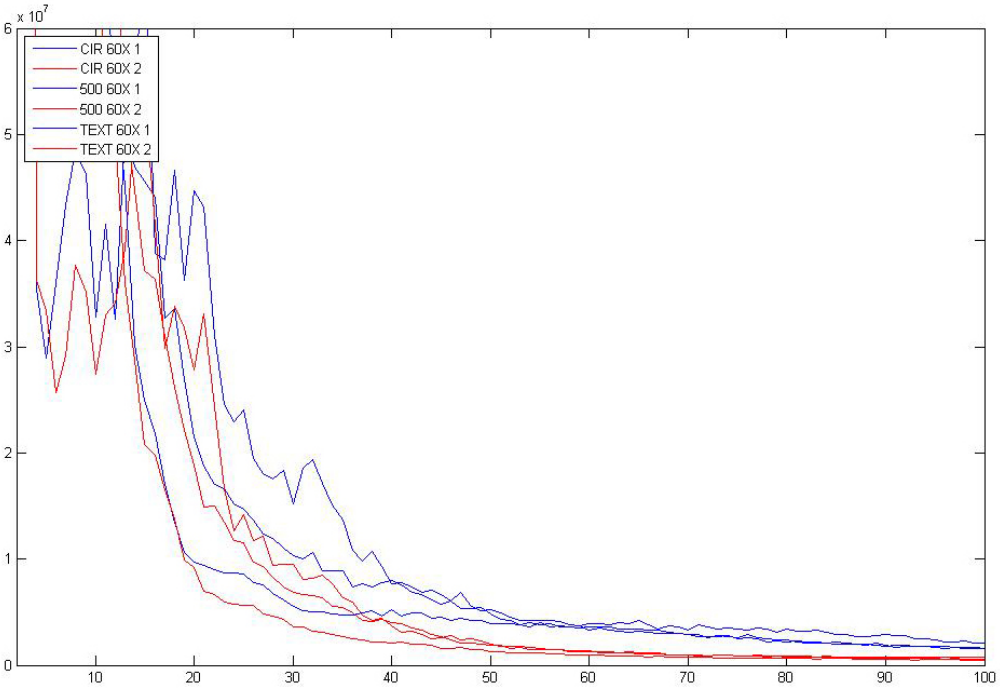
รูปที่ 3.26 ผลการเปรียบเทียบภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 3 ระยะ



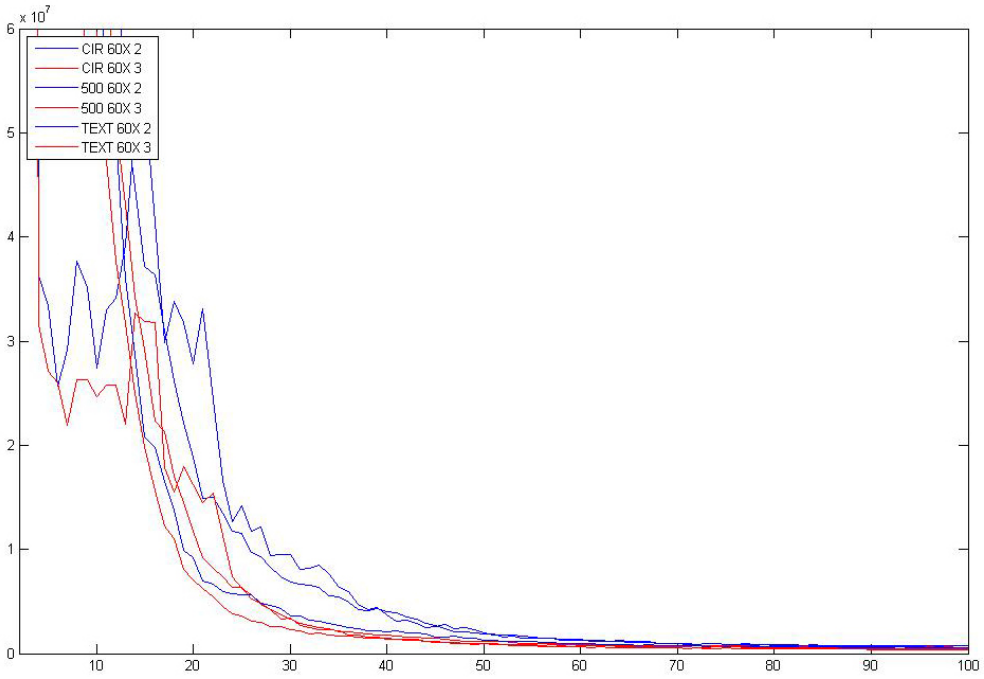
รูปที่ 3.27 ผลการเปรียบเทียบภาพตัวอักษร 500 บนธนบัตรทั้ง 3 ระยะ



รูปที่ 3.28 ผลการเปรียบเทียบภาพตัวอักษรทั่วไปทั้ง 3 ระยะ



รูปที่ 3.29 ผลการเปรียบเทียบทุกภาพในระยะที่ 1 และ 2

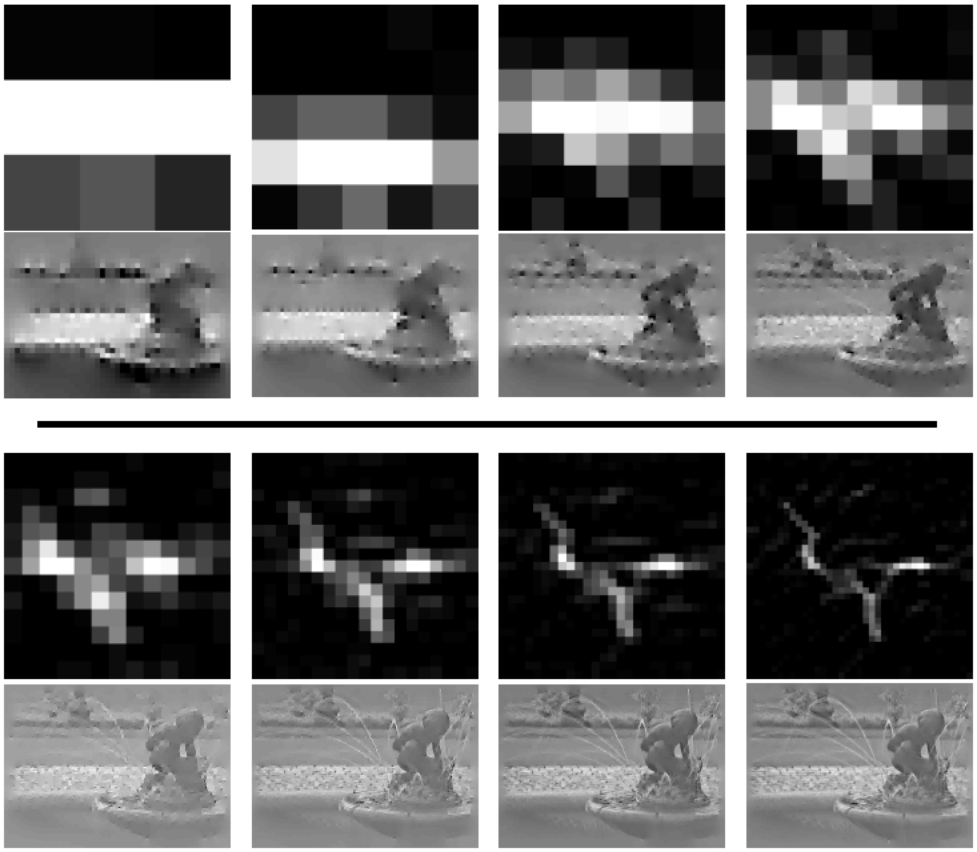


รูปที่ 3.30 ผลการเปรียบเทียบทุกภาพในระยะที่ 2 และ 3

จากผลการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าแนวแกน frequency ในรูปที่ 3.29 จะมีค่าที่เกาะกลุ่มกันในช่วง 50 เป็นต้นไป แต่ในรูปที่ 3.30 จะมีค่าที่เริ่มสังเกตได้ลำบาก และถ้าหากมีค่าความพร่ามัวที่มากขึ้นกว่านี้ ก็อาจจะทำให้ผลการประมาณค่าพร่ามัวผิดพลาดได้สูง

3.2.4 การขจัดความพร่ามัวของภาพ

วิธีการดังกล่าวพวกเราได้ประยุกต์ใช้การประมาณค่า PSF (Point spread function) เพื่อวัดความพร่ามัวของภาพ ซึ่งไม่เป็นที่นิยมกันนักในกลุ่มของงานวิจัยโฟกัสภาพโดยอัตโนมัติ แต่มันพบในกลุ่มของงานวิจัยทางด้านการขจัดความพร่ามัวของภาพ Fergus และคณะ [7] รวมถึง Q. Shan และคณะ [8] ได้ใช้การหาการกระจายตัวของอนุพันธ์ในภาพก่อนหน้าที่ถูกขจัดความพร่ามัว ในการประมาณค่า PSF ซึ่งผลที่ได้จากการประมาณค่า PSF ของ Fergus จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.31 และ ของ Q. Shan จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.31 ผลการเพิ่มขนาดของภาพเพื่อประมาณค่า PSF ของ Fergus โดย
รูปแนวนอนแถวที่ 1 และ 3 แสดงผลการประมาณค่า PSF ในแต่ละขนาด
และรูปแนวนอนแถวที่ 2 และ 4 แสดงภาพในแต่ละขนาด

รูปที่ 3.32 ผลการทำซ้ำเพื่อประมาณค่า PSF ของ Q. Shan
รูปแนวตั้งแถวที่ 1 แสดงภาพที่พร่ามัว
รูปแนวตั้งแถวที่ 2 แสดงการทำซ้ำครั้งที่ 1
รูปแนวตั้งแถวที่ 3 แสดงการทำซ้ำครั้งที่ 6
รูปแนวตั้งแถวที่ 4 แสดงการทำซ้ำครั้งที่ 10

การโฟกัสภาพโดยอัตโนมัติด้วยกล้องเพียงตัวเดียว พวกเราได้เลือกวิธีการประมาณค่า PSF เนื่องจากแบบจำลองของพวกเราได้ถูกออกแบบไว้สำหรับการถ่ายภาพ slider bar ของอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ ซึ่งมีลักษณะของวัตถุอยู่ในแนวระนาบที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ทำให้ PSF ที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก สำหรับการวัดจุดโฟกัส หรือระบบโฟกัสภาพโดยอัตโนมัติส่วนใหญ่จะใช้การปรับระยะเลนส์หรือวัตถุไปเรื่อยๆ และค่าที่จุดยอดของกราฟเป็นจุดโฟกัส ซึ่งวิธีการเหล่านี้ไม่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองของเรา เนื่องจากการวัดแต่ละครั้งเป็นอิสระต่อกัน เมื่อมีรายละเอียดของภาพที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย ค่าความพร่ามัวที่ได้จากการวัดก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นเราจึงประยุกต์ใช้การประเมินค่า PSF มาใช้ในการพิจารณาการกระจายตัวของพิกเซล ซึ่งเป็นไปตามหลักการของทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต

โดยทั่วไปสมการความพร่ามัวของภาพมักจะกำหนดให้ภาพที่พร่ามัว คือ I ซึ่งเกิดจากภาพที่ชัด L ทำการคอนโวลูชั่นกับเคอร์เนล f (PSF) และบวกกับสัญญาณรบกวน n โดยที่ $\otimes$ แสดงถึงตัวดำเนินการคอนโวลูชั่น

$$I = L \otimes f + n \tag{3.5}$$

ซึ่งการประมาณค่า PSF ของภาพถ่าย มีอยู่หลายชนิด เช่น การขจัดความพร่ามัวของภาพเดี่ยว การขจัดความพร่ามัวของภาพคู่ และการขจัดความพร่ามัวของวีดิทัศน์ การประมาณค่า PSF ที่เหมาะสมกับแบบจำลองของเรา คือ การขจัดความพร่ามัวของภาพเดี่ยว เนื่องจากใช้กล้องเพียงตัวเดียว ซึ่งจากผลการทดลองที่ดีที่สุดได้จากวิธีการประมาณค่าของ Q. Shan และคณะ โดยอัลกอริทึมการขจัดความพร่ามัวของวัตถุที่เคลื่อนไหวด้วยการปรับปรุงเคอร์เนลและประมาณค่าภาพแฝงหลายๆ ครั้งด้วยทฤษฎีของ Bayes' จะได้

$$p(L, f \mid I) \propto p(I \mid L, f)p(L)p(f) \tag{3.6}$$

โดย p(I|L,f) หมายถึง ฟังก์ชั่นความน่าจะเป็น และ p(L) แสดงถึงภาพแฝงอันก่อน และ p(f) แสดงถึงเคอร์เนลอันก่อน

ความเป็นไปได้ของ p(I| L,f) เกิดจากการหาอนุพันธ์ย่อยเพื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนในทุกๆ พิกเซล โดยจะหาอนุพันธ์ย่อยของ n ในสองทิศทาง และถูกคำนวณไปข้างหน้าด้วยค่าความแตกต่างระหว่างพิกเซลข้างเคียง กล่าวคือ $\partial_x n(x,y) = n(x+1,y) - n(x,y)$ และ $\partial_y n(x,y) = n(x,y+1) - n(x,y)$

และเมื่อนำ n มาทำตามวิธีการกระจายตัวแบบเกาส์ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ζ_0 จะสามารถเขียนกระจายตัวแบบเกาส์ได้เป็น $N(\partial_x n_i \mid 0, \zeta_1)$ และ $N(\partial_y n_i \mid 0, \zeta_1)$ ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\zeta_1 = \sqrt{2}\zeta_0$

สำหรับการหาอนุพันธ์ย่อยในลำดับที่สูงกว่าจะแสดงตัวอย่างเฉพาะ ∂_{xx} จะถูกคำนวณด้วย $\partial_{xx} n(x,y) = \partial_x(x+1,y) - \partial_x n(x,y) = (n(x+2,y) - n(x+1,y)) - (n(x+1,y) - n(x,y))$ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\zeta_2 = \sqrt{2} \cdot \zeta_1 = \sqrt{2^2}\zeta_0$

เพื่อให้ดูง่ายขึ้นจะใช้ ∂^* เพื่อแสดงถึงตัวดำเนินการหาอนุพันธ์ย่อยใดๆ และ $\kappa(\partial^*)$ จะใช้ในการแสดงลำดับของการหาอนุพันธ์ย่อย จะได้ว่า

$$\begin{aligned} p(I \mid L, f) &= \prod_{\partial^* \in \Theta} \prod_i N\left(\partial^* n_i \mid 0, \zeta_{\kappa(\partial^*)}\right) \\ &= \prod_{\partial^* \in \Theta} \prod_i N\left(\partial^* I_i \mid I_i^C, \zeta_{\kappa(\partial^*)}\right) \end{aligned} \tag{3.7}$$

โดยที่ $I_i \in \mathrm{I}$ แสดงถึงค่าในแต่พิกเซล และ I_i^C คือ พิกเซลที่พิกัด i ในภาพที่ถูกคอนโวลูชั่น $I_i^C = L \otimes f$ และ Θ แสดงถึงเซตที่ประกอบไปด้วยตัวดำเนินการของการหาอนุพันธ์ทั้งหมด ซึ่งประกอบไปด้วย $\Theta = \{\partial^0, \partial_x, \partial_y, \partial_{xx}, \partial_{xy}, \partial_{yy}\}$ และกำหนดให้ $\partial^0 n_i = n_i$

p(f) อันก่อน มาจากการสังเกตการเคลื่อนไหวของเคอร์เนลเพื่อระบุวิถีของกล้องที่โอนเอียง โดยค่าของเคอร์เนลจะเป็นการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล

$$p(f) = \prod_j e^{-\tau f_j} \ , \ f_j \geq 0$$

โดย τ คือ ระดับของพารามิเตอร์ และ j คือ ส่วนประกอบทั้งหมดของเบลอเคอร์เนล

p(L) อันก่อน มีค่าเท่ากับ $p_g(L)\ p_l(L)$ โดย $p_g(L)$ และ $p_l(L)$ หมายถึง ภาพโดยรวมอันก่อน และ ภาพเฉพาะส่วนอันก่อน

$p_g(L)$ จะใช้ลอการิทึมฮิสโตแกรมที่มีการกระจายตัวแบบเกรเดียนต์ของภาพทั่วไป 10 ภาพ โดยวิธีการของ Fergus จะรวมการกระจายตัวแบบเกาส์ของ K ซึ่งจะถูกใช้ในการประมาณการกระจายตัวแบบเกรเดียนต์ จะได้ว่า $\prod_i \sum_{k=1}^{K} \omega_k N(\partial L_i \mid 0, \zeta_k)$ โดยที่ i คือ พิกเซลทั้งหมดในภาพ และ ω_k กับ ζ_k

แสดงถึง น้ำหนัก และค่าเบียงเบนมาตรฐานของการกระจายตัวแบบเกาส์ในลำดับที่ k'th ส่วนวิธีการของ Q. Shan จะเสนอการใช้ฟังก์ชั่นไม่ต่อเนื่องเพื่อให้เหมาะสมกับการกระจายตัวของลอการิทึมฮิสโตแกรม

$$\Phi(x)=\begin{cases} -k|x| & x \le l_t \\ -\left(ax^2+b\right) & x > l_t \end{cases} \tag{3.8}$$

โดยที่ x แสดงถึงระดับเกรเดียนต์ของภาพ และ l_t แสดงตำแหน่งที่ต่อกันระหว่างสองฟังก์ชั่น ซึ่งผลจากการหาลอการิทึมฮิสโตแกรมที่มีการกระจายตัวแบบเกรเดียนต์ของภาพทั่วไป 10 ภาพ จะทำให้ได้ค่า k = 2.7, a = 6.1 x 10^{-4} และ b = 5.0 ซึ่งสามารถนำมาเขียนใหม่ได้เป็น

$$p_g(L)\alpha\prod_i e^{\Phi(\partial L_i)} \tag{3.9}$$

$p_l(L)$ มาจากการแบ่งภาพเป็นภาพย่อยๆ เพื่อเลือกส่วนที่พร่ามัว โดยคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสีพิกเซลในแต่ละหน้าต่างย่อย ซึ่งในการทดลองจะมีขีดแบ่งเท่ากับ 5 และจะพิจารณาเฉพาะบริเวณจุดกลางของหน้าต่างย่อยให้เป็นสมาชิกของ Ω

สำหรับทุกพิกเซลใน Ω ทำให้สามารถแยกบริเวณที่พร่ามัวและบริเวณที่ชัดได้ โดยความผิดพลาดจะถูกกำหนดตามการกระจายตัวแบบเกาส์ด้วยค่ากลางเป็นศูนย์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น σ_1

$$p_l(L)=\prod_{i\in\Omega} N(\partial_x L_i-\partial_x I_i \mid 0,\sigma_1)N(\partial_y L_i-\partial_y I_i \mid 0,\sigma_1) \tag{3.10}$$

ในส่วนต่อมาจะเป็นการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดหรือการออพติไมเซชั่น สำหรับการหาค่าต่ำสุดของพลังงาน $E(L,f)=-\log(p(L,f\mid I))$ ด้วยการเอาค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดและสิ่งที่ได้นิยามก่อนหน้านี้ลงไปในสมการที่ 3.6 จะได้

$$\begin{aligned} E(L,f)\alpha\left(\sum_{\partial^*\in\Theta}\omega_{\kappa(\partial^*)}\left\|\partial^* L\otimes f-\partial^* I\right\|_2^2\right)+\lambda_1\left\|\Phi(\partial_x L)+\Phi(\partial_y L)\right\|_1+ \\ \lambda_2\left(\left\|\partial_x L-\partial_x I\right\|_2^2\circ M+\left\|\partial_y L-\partial_y I\right\|_2^2\circ M\right)+\|f\|_1 \end{aligned} \tag{3.11}$$

โดยที่ $\|\cdot\|_p$ แสดงถึงตัวดำเนินการนอร์มลำดับที่ p และ $\circ$ แสดงถึงตัวดำเนินการคูณในระดับสมาชิก และ M คือ ไบนาริ่มาร์คสองมิติซึ่งถูกเข้ารหัสด้วยการทำหน้าต่างย่อยของ p(L) ให้ราบเรียบ และ $\omega_{\kappa(\partial^*)} = \frac{1}{\zeta^2_{\kappa(\partial^*)}\tau}, \lambda_1 = \frac{1}{\tau}, \lambda_2 = \frac{1}{\sigma_1^2\tau}$ โดยในการทดลองจะกำหนดให้ $\omega_{\kappa(\partial^*)}$ มีค่าเท่ากับ 50

ลำดับต่อมาจะเป็นการออพติไมซิ่ง L โดยกำหนด f ให้คงที่ ซึ่งพลังงาน E จะสามารถเขียนอย่างง่ายเป็น E_L และแยกการคอนโวลูชั่นที่ซับซ้อนให้คำนวณได้อย่างรวดเร็วโดยใช้การแปลงฟูริเยร์ ซึ่งแทนที่ $\partial L = (\partial_x L, \partial_y L)$ ด้วย $\Psi \approx (\Psi_x, \Psi_y)$ และเพิ่มข้อจำกัดให้ $\Psi \approx \partial L$ นอกจากนี้แล้วสำหรับ $(\partial_x L_i, \partial_y L_i) \in \partial L$ จะแทนด้วย $(\psi_{i,x}, \psi_{i,y}) \in \Psi$ จะได้สมการพลังงานดังนี้

$$\begin{aligned} E(L)\alpha\left(\sum_{\partial^*\in\Theta}\omega_{\kappa(\partial^*)}\left\|\partial^* L \otimes f - \partial^* I\right\|_2^2\right) + \lambda_1\left\|\Phi(\Psi_x) + \Phi(\Psi_y)\right\|_1 + \\ \lambda_2\left(\left\|\Psi_x - \partial_x I\right\|_2^2 \circ M + \left\|\Psi_y - \partial_y I\right\|_2^2 \circ M\right) + \\ \gamma\left(\left\|\Psi_x - \partial_x L\right\|_2^2 + \left\|\Psi_y - \partial_y L\right\|_2^2\right) \end{aligned} \tag{3.12}$$

โดยที่ γ คือ น้ำหนักซึ่งเป็นค่าที่ถูกเพิ่มขึ้นด้วยการทำซ้ำจนกระทั่งมีค่ามากจนเพียงพอในการทำซ้ำครั้งสุดท้ายของการออพติไมเซชั่น

การปรับปรุงค่า Ψ โดยกำหนด L และ $\partial^* L$ ให้คงที่ จากสมการที่ 3.12 สามารถเขียนให้ง่ายขึ้นได้เป็น

$$\begin{aligned} E'_\Psi = \lambda_1\left\|\Phi(\Psi_x) + \Phi(\Psi_y)\right\|_1 + \lambda_2\left\|\Psi_x - \partial_x I\right\|_2^2 \circ M + \lambda_2\left\|\Psi_y - \partial_y I\right\|_2^2 \circ M + \\ \gamma\left\|\Psi_x - \partial_x L\right\|_2^2 + \gamma\left\|\Psi_y - \partial_y L\right\|_2^2 \end{aligned} \tag{3.13}$$

การปรับปรุงค่า L โดยกำหนด Ψ ให้คงที่ จากสมการที่ 3.12 สามารถเขียนให้ง่ายขึ้นได้เป็น

$$E'_L = \left(\sum_{\partial^*\in\Theta}\omega_{\kappa(\partial^*)}\left\|\partial^* L \otimes f - \partial^* I\right\|_2^2\right) + \gamma\left(\left\|\Psi_x - \partial_x L\right\|_2^2 + \left\|\Psi_y - \partial_y L\right\|_2^2\right) \tag{3.14}$$

เนื่องจากส่วนสำคัญของ E'_L เกี่ยวข้องกับการคอนโวลูชั่น จึงได้ใช้การแปลงฟูริเยร์มาช่วยในการคำนวณให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยกำหนดให้ตัวดำเนินการแปลงฟูริเยร์และการแปลงกลับฟูริเยร์เป็น F และ F^{-1} ซึ่งสามารถเขียนสมการ E'_L ได้เป็น

$$E'_{F(L)} = \left(\sum_{\partial^* \in \Theta} \omega_{\kappa(\partial^*)} \left\| F(L) \circ F(f) \circ F(\partial^*) - F(I) \circ F(\partial^*) \right\|_2^2 \right) + \gamma \left\| F(\Psi_x) - F(L) \circ F(\partial_x) \right\|_2^2 + \gamma \left\| F(\Psi_y) - F(L) \circ F(\partial_y) \right\|_2^2 \quad (3.15)$$

ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Plancherel โดยผลรวมกำลังสองของฟังก์ชั่นจะมีค่าเท่ากับผลรวมกำลังสองของการแปลงฟูริเยร์ จะทำให้ $E'_L = E'_{F(L)}$ และ $E'_{L|L^*} = E'_{F(L)|F(L^*)}$ ดังนั้นจะสามารถคำนวณเพื่อออพติมั่ม L^* ด้วย

$$L^* = F^{-1}\left(\arg\min_{F(L)} E'_{F(L)} \right) \quad (3.16)$$

เนื่องจาก E'_L เป็นผลรวมพลังงานกำลังสองของ $F(L)$ ที่ไม่ทราบค่า ซึ่งมีลักษณะเป็นฟังก์ชั่นคอนเวกซ์และสามารถแก้ไขปัญหาได้โดยให้ $\partial E'_{F(L)} / \partial F(L)$ เป็นศูนย์ โดยการแก้ไขปัญหาจะสามารถแสดง L^* ได้ดังนี้

$$L^* = F^{-1}\left(\frac{\overline{F(f)} \circ F(I) \circ \Delta + \gamma \overline{F(\partial_x)} \circ F(\Psi_x) + \gamma \overline{F(\partial_y)} \circ F(\Psi_y)}{\overline{F(f)} \circ F(f) \circ \Delta + \gamma \overline{F(\partial_x)} \circ F(\partial_x) + \gamma \overline{F(\partial_y)} \circ F(\partial_y)} \right) \quad (3.17)$$

โดยที่ $\Delta = \sum_{\partial^* \in \Theta} \omega_{\kappa(\partial^*)} \overline{F(\partial^*)} \circ F(\partial^*)$ และ $\overline{(\cdot)}$ แสดงถึงตัวดำเนินการคอนจูเกต

ลำดับต่อมาจะกำหนดให้ L คงที่ เพื่อออพติมั่ม f จากสมการที่ 3.11 สามารถเขียนให้ง่ายขึ้นได้เป็น

$$E(f) \alpha \left(\sum_{\partial^* \in \Theta} \omega_{\kappa(\partial^*)} \left\| \partial^* L \otimes f - \partial^* I \right\|_2^2 \right) + \left\| f \right\|_1 \quad (3.18)$$

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$E(f) = \left\| Af - B \right\|_2^2 + \left\| f \right\|_1 \quad (3.19)$$

โดยที่ A คือ เมตริกซ์ที่ถูกคำนวณจากการคอนโวลูชั่นซึ่งปัจจัยสำคัญจะขึ้นอยู่กับการประมาณค่าภาพแฝง L และ B คือ เมตริกซ์ที่ถูกกำหนดด้วย I

สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะมีค่า λ_1 อยู่ในช่วง 0.002 ถึง 0.5 และ λ_2 อยู่ในช่วง 10 ถึง 25 โดยที่ค่า κ_1 อยู่ในช่วง 1.1 ถึง 1.4 และ κ_2 มีค่าเท่ากับ 1.5 ซึ่งกระบวนการขจัดความพร่ามัวของภาพจะมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.33

Algorithm Image Deblurring

Require: The blurred image **I** and the initial kernel estimate.

Compute the smooth region Ω by threshold t = 5.

L $\Leftarrow$ **I** {Initialize **L** with the observed image **I**}.

repeat {Optimizing **L** and **f**}

repeat {Optimizing **L**}

Update Ψ by minimizing the energy defined in (3.11).

Compute **L** according to (3.16).

Until $\|\Delta L\|_2 < 1\times10^{-5}$ and $\|\Delta\Psi\|_2 < 1\times10^{-5}$.

Update **f** by minimizing (3.17).

until $\|\Delta f\|_2 < 1\times10^{-5}$ or the max. iterations have been performed.

Output: **L**, **f**

รูปที่ 3.33 กระบวนการขจัดความพร่ามัวของภาพของ Q. Shan