

กรอบแนวคิดของเทคนิคการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง

A CONCEPTUAL FRAMEWORK OF SUPER RESOLUTION RECONSTRUCTION (SRR) TECHNIQUES

วรพจน์ พัฒนวิจิตร

Vorapoj Patanavijit

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

Faculty of Engineering, Assumption University

บทคัดย่อ

ความละเอียดของภาพ (Spatial Resolution) คือ ปัจจัยหลักในการกำหนดคุณภาพของรูปภาพโดยความละเอียดของภาพจะมีหน่วยเป็นจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่ (Pixel per Area) เนื่องจากการประมวลผลสัญญาณภาพได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างมาก และการประมวลผลเหล่านี้ก็จำเป็นต้องใช้ภาพที่มีความละเอียดสูงในการประมวลผล เพราะภาพที่มีความละเอียดสูงจะมีรายละเอียดต่างๆ ที่สำคัญมากกว่าภาพที่มีความละเอียดต่ำ โดยรายละเอียดเหล่านี้จะมีผลต่อการประมวลผลหรือการประยุกต์ใช้งานอย่างมาก การเก็บภาพความละเอียดสูงในปัจจุบันมีหลายวิธี อย่างเช่นการสร้างเซ็นเซอร์ที่สามารถบันทึกภาพความละเอียดสูงด้วยการลดขนาดของแต่ละพิกเซลลง (ซึ่งจะทำให้จำนวนพิกเซลต่อพื้นที่มีจำนวนเพิ่มขึ้น) แต่เซ็นเซอร์แบบนี้จะมีราคาแพง ดังนั้นเซ็นเซอร์ตรวจจับแบบนี้จึงไม่เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้สำหรับงานทั่วไปหรืออุปกรณ์ที่ผลิตจำนวนมากเพื่อจำหน่าย นอกจากนี้แล้ววิธีการเพิ่มรายละเอียดของภาพแบบนี้ยังมีข้อจำกัด คือ การลดขนาดของพิกเซลลงจะทำให้แสงทั้งหมดที่ตกกระทบตัวเซ็นเซอร์มีความเข้มลดลง (เนื่องจากเซ็นเซอร์มีพื้นที่รับแสงลดลง) จึงทำให้อัตราส่วนระหว่างความแรงสัญญาณต่อความแรงสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio หรือ SNR) มีค่าลดลง ดังนั้นการเพิ่มรายละเอียดของภาพโดยใช้กรรมวิธีประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) จึงถูกนำมาใช้ในการประยุกต์ใช้ในงานเหล่านี้โดยวิธีนี้จะเรียกว่า “การสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง (Super Resolution Reconstruction หรือ SRR)” ดังนั้นการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งจะหมายถึงกรรมวิธีประมวลผลสัญญาณที่ใช้ในการเพิ่มความละเอียดและปรับปรุงคุณภาพของภาพให้มีความละเอียดสูงขึ้นและมีคุณภาพที่ดีขึ้น บทความนี้จะอธิบายเกี่ยวกับแนวคิดและหลักการของการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง โดยครอบคลุมเนื้อหาเกี่ยวกับหลักการของการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบันทึกภาพเท่านั้น เนื่องจากการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งมีหลายเทคนิคจนไม่สามารถกล่าวถึงได้ทั้งหมด และยังมีเทคนิคต่างๆ เกี่ยวกับการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งที่จะถูกนำเสนอออกมาใหม่ๆ อีก ดังนั้นผู้เขียนจึงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าแนวคิดและหลักการทั้งหมดที่กล่าวถึงในบทความนี้จะถูกนำไปเป็นหัวข้อวิจัยเพื่อพัฒนาต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: การสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง ความละเอียดของภาพ กรรมวิธีประมวลผลสัญญาณ

Corresponding Author

E-mail: Patanavijit@yahoo.com

Abstract

Typically, a spatial resolution (Pixel per Area) is an important factor used to define the image quality. Due to the dramatically advance of digital image processing in this decade, high resolution (HR) images are in demand because HR images give more detail and information that directly impact their application performance. Today, there are several techniques that can capture high resolution images such as resolution increment by reducing pixel side. Consequently this high resolution sensor is so expensive and do not proper for general applications. Moreover, due to reducing pixel side, the SNR of sensors decrease. From the signal processing theory, the alternative algorithm for increasing resolution of captured image is called “Super Resolution Reconstruction or SRR” that can solve this problem. Hence, the SRR refers that the process of increasing resolution and improving the quality of image to be higher resolution and better quality. This paper aim to review the ideal and concept of the SRR technique and its SRR observation model but this paper don’t review all SRR frameworks because there are so many proposed SRR techniques. Author hopes that the SRR ideal and concept framework reviewed in this paper will motivate the reader to conduct in this research areas.

Keywords: Super Resolution Reconstruction (SRR), Spatial Resolution, Signal Processing

บทนำ

การประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับภาพอิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากแล้วจะต้องใช้ภาพที่มีความละเอียดสูง (HR หรือ High Resolution) โดยภาพที่มีความละเอียดสูงในบทความนี้ (Kang & Chaudhuri, 2003; Ng & Bose, 2003) จะหมายถึงภาพที่มีข้อมูลหรือจำนวนจุดภายในภาพจำนวนมาก ดังนั้นภาพแบบนี้จึงสามารถให้รายละเอียดได้มากกว่า และความละเอียดที่สูงขึ้นนี้อาจจะครอบคลุมถึงข้อมูลที่สำคัญในการประยุกต์ใช้งานบางประเภทอย่าง เช่น ภาพทางการแพทย์ที่มีความละเอียดสูง (HR) จะช่วยแพทย์ในการวินิจฉัยเกี่ยวกับโรคได้อย่างมาก ระบบประมวลผลสามารถแยกความแตกต่างระหว่างวัตถุภายในภาพถ่ายดาวเทียมได้ดีขึ้นเมื่อภาพมีความละเอียดสูง (HR) ถึงแม้ว่าตัวเซ็นเซอร์สำหรับตรวจจับภาพ (Image Sensor) แบบ CCD (Charge Coupled Device) และ CMOS ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายตั้งแต่ทศวรรษที่ 1970 แต่อุปกรณ์

เหล่านี้จะเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานโดยทั่วไป เนื่องจากความละเอียดในปัจจุบันและราคาของอุปกรณ์ยังไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในปัจจุบันและอนาคต อย่างเช่นผู้บริโภคต้องการกล้องที่มีความละเอียดสูงระดับเดียวกับกล้องถ่ายภาพยนต์ขนาด 35 มม. ซึ่งเมื่อภาพที่บันทึกได้ถูกขยายให้ใหญ่ขึ้นจะไม่มีารผิดเพี้ยน (Artifact) ของภาพที่บันทึกได้ ดังนั้นการเพิ่มรายละเอียดให้กับภาพสำหรับการประยุกต์ใช้งานในปัจจุบันจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก

การเพิ่มความละเอียดให้กับภาพโดยตรง (Park, Park & Kang, 2003; Segall, Molina & Katsaggelos, 2003; Rajan, Chaudhuri & Joshi, 2003) คือ การผลิตตัวเซ็นเซอร์ที่มีขนาดพิกเซล (Pixel) เล็กลงหรือการเพิ่มจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่ของภาพ แต่ถ้าขนาดของพิกเซลมีขนาดเล็กลงแล้วปริมาณแสงต่อพิกเซลจะมีขนาดลดลงด้วย ซึ่งจะเป็นผลทำให้สัญญาณรบกวนแบบ Shot (Shot Noise) ต่อพื้นที่ที่มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยหรืออาจกล่าวได้

อีกนัยหนึ่งว่า การผลิตเซ็นเซอร์ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มความละเอียดของภาพที่สามารถบันทึกได้จะส่งผลทำให้ภาพที่บันทึกได้มีสัญญาณรบกวนสูงขึ้นและมีคุณภาพต่ำลง ดังนั้นจึงเป็นผลทำให้เซ็นเซอร์ที่ผลิตแบบ CMOS ในปัจจุบันมีขนาดเล็กกว่า $40 \mu\text{m}^2$ ไม่ได้ การเพิ่มความละเอียดให้กับภาพโดยตรงอีกวิธีหนึ่ง คือ การเพิ่มขนาดของซีพ ซึ่งจะทำให้ค่าเก็บประจุ (Capacitance) มีค่าสูงขึ้นและเป็นผลทำให้ไม่สามารถเพิ่มความเร็วในการทำงานได้ ดังนั้นวิธีทั้งสองที่กล่าวไปแล้วนี้จึงไม่เหมาะต่อการประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากอุปกรณ์บันทึกภาพที่มีความละเอียดสูงจะต้องใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับภาพและอุปกรณ์เกี่ยวกับแสง (Optical) ซึ่งมีรายละเอียดในการบันทึกภาพได้สูง แต่เนื่องจากเซ็นเซอร์และอุปกรณ์เกี่ยวกับแสงแบบนี้มีราคาสูง ดังนั้นถ้าต้องการผลิตอุปกรณ์บันทึกภาพที่มีความละเอียดสูงสำหรับจำหน่ายจึงต้องใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับภาพและอุปกรณ์เกี่ยวกับแสง (Optical) ที่มีใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งมีความแม่นยำไม่สูงมากนัก (เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาไม่แพง) แต่ใช้เทคนิคหรือวิธีการในการเพิ่มรายละเอียดให้ภาพมีความละเอียดสูงขึ้น

บทความนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง (SRR) (Patanavijit, 2009-1) ซึ่งเป็นเทคนิคการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) แบบหนึ่งโดยเทคนิคการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง คือ การสร้างภาพความละเอียดสูง (HR) จากภาพมีความละเอียดต่ำ (LR) ซึ่งมีหลายวิธี ดังนั้นเพื่อไม่ทำให้ผู้อ่านเกิดความสับสน บทความนี้จะกำหนดให้คำว่า “การสร้างภาพความละเอียดสูง (SRR)” หมายถึง กระบวนการประมวลผลสัญญาณเพื่อเพิ่มความละเอียดให้กับภาพที่มีความละเอียดต่ำ (LR) โดยเทคนิคนี้มีข้อดีที่สำคัญ คือ ระบบแบบนี้จะมีราคาถูกกว่าและเทคนิคแบบนี้สามารถนำไปใช้เพิ่มความละเอียดให้กับอุปกรณ์บันทึกภาพที่มีความละเอียดต่ำเพื่อเพิ่มความละเอียดให้กับภาพหลังจากที่บันทึกแล้ว ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องสร้างอุปกรณ์ใหม่ การสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งได้ถูกพิสูจน์แล้วว่า เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งาน

หลายประเภทเมื่อระบบสามารถบันทึกภาพที่มีความละเอียดต่ำจำนวนหลายภาพ (หรือหลายเฟรม) อย่างเช่น ภาพถ่ายทางการแพทย์ ภาพถ่ายดาวเทียมหรือสัญญาณวิดีโอ โดยการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับเทคนิคนี้ คือ การสร้างภาพที่มีความละเอียดสูงจำนวน 1 ภาพจากภาพที่มีความละเอียดต่ำจำนวนหลายภาพ (กล้องถ่ายภาพวิดีโอแบบ Camcorder โดยทั่วไปแล้วจะสามารถบันทึกและแสดงภาพที่มีเฟรมติดๆ กันได้) นอกจากการประยุกต์ใช้งานแบบนี้แล้ว เทคนิคนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการขยายหรือเพิ่มความละเอียดให้กับบริเวณใดบริเวณหนึ่งภายในภาพได้ (ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเราจะเรียกบริเวณนี้ว่า ROI หรือ Region of Interest) อย่างเช่น การประยุกต์ใช้งานกับภาพถ่ายทางด้านกฎหมาย ภาพถ่ายทางด้านวิทยาศาสตร์ ภาพถ่ายทางการแพทย์หรือภาพถ่ายดาวเทียม เป็นต้น

บทความนี้จะกำหนดให้คำว่า “การสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง (SRR)” หมายถึง กรรมวิธีประมวลผลสัญญาณที่ใช้ในการปรับปรุงความละเอียดของภาพ โดยคำว่า “Super” ในที่นี้จะหมายถึงลักษณะของเทคนิคที่สามารถเอาชนะข้อจำกัดเกี่ยวกับความละเอียดของภาพได้ แต่คำว่า “Super Resolution (SR)” โดยทั่วไปแล้วจะเป็นคำศัพท์ทางวิชาการที่ถูกใช้ในงานทางด้านแสง (Optic) และจะหมายถึงอัลกอริทึมที่ประมวลผลภาพจำนวน 1 ภาพเพื่อเพิ่มความละเอียด ดังนั้นจึงมีหลักการใหญ่ๆ อยู่ 2 ข้อ คือ Super Resolution Reconstruction และ Super Resolution Restoration ซึ่งกระบวนการทั้งสองนี้มุ่งเน้นที่จะพยายามนำข้อมูลความถี่สูงซึ่งเกิดการสูญหายหรือลดทอนในระหว่างการบันทึกข้อมูล แต่การสูญเสียข้อมูลของทั้ง 2 กรณีจะแตกต่างกัน คือ

- กระบวนการ Super Resolution Restoration คือ วิธีการพยายามสร้างคืนข้อมูล โดยทั่วไปแล้วข้อมูลเหล่านี้จะเป็นข้อมูลที่ถูกลดทอนเนื่องจากมีความถี่สูงกว่าความถี่ Cut-Off ของระบบบันทึกภาพ

- กระบวนการ Super Resolution Reconstruction คือ วิธีการด้านวิศวกรรมศาสตร์ที่พยายามนำข้อมูลความถี่สูงที่เสียหายจากปัญหา Aliasing กลับมา

การสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างภาพความละเอียดต่ำแต่ละภาพแล้วนำมาสร้างภาพความละเอียดสูง ดังนั้นวิธีการนี้จะต้องพยายามกำจัดความไม่คมชัด (Blur) และกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับภาพความละเอียดต่ำ หรือกล่าวโดยสรุปแล้ววิธีการสร้างภาพความละเอียดสูงแบบ SRR คือ การคำนวณหาภาพความละเอียดสูงซึ่งจะต้องสร้างข้อมูลความถี่สูงจากภาพความละเอียดต่ำที่เราสามารถเก็บบันทึกได้ (ซึ่งสูญเสียข้อมูลความถี่สูงไปในระหว่างกระบวนการบันทึกภาพ) โดยภาพความละเอียดต่ำที่บันทึกได้โดยทั่วไปแล้วจะไม่คมชัด (Blur) มีสัญญาณรบกวน และเกิดปัญหา Aliasing วิธีการนี้จะมีข้อดี คือ มีราคาถูกและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบหรือกล้องที่มีความละเอียดต่ำได้เพื่อเพิ่มความละเอียดของภาพได้

การประยุกต์ใช้งานเทคนิคแบบการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง (SRR)

1. การประยุกต์ใช้งานทางด้านกฎหมายจะนิยมใช้กล้องถ่ายภาพแบบ CCTV แทนกล้องถ่ายภาพแบบ DVR (Digital Video Recorder) เนื่องจากกล้องแบบนี้จะสามารถขยายรายละเอียดของบริเวณใดบริเวณหนึ่งได้อย่างเช่น บริเวณใบหน้าคนร้ายหรือทะเบียนรถ (Chaudhuri & Taur, 2005)

2. การประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ คือ การนำเทคนิคนี้ไปใช้กับภาพแบบ CT (Computer Tomography) และ MRI (Magnetic Resonance Image) เนื่องจากความละเอียดของภาพถ่ายที่ได้มีความละเอียดที่จำกัด (เนื่องจากข้อจำกัดของความละเอียดของกล้อง) แต่ถ้าทำการบันทึกภาพจำนวนหลายภาพ (จากหลายตำแหน่ง) แล้วค่อยนำเทคนิคการเพิ่มรายละเอียดแบบ SRR มาเพิ่มความละเอียดให้กับภาพ CT หรือ MRI

ที่บันทึกได้ก็จะสามารถสร้างภาพที่มีความละเอียดสูงได้ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูง

3. การประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับภาพถ่ายจากดาวเทียม จะถูกใช้ในการปรับปรุงภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งได้จากการถ่ายภาพจากระยะไกล (Remote Sensor) หรือ LANDSAT เนื่องจากการถ่ายภาพมีระยะทางไกล ดังนั้นภาพถ่ายที่ได้จึงมีความละเอียดต่ำแต่ดาวเทียมสามารถถ่ายภาพ (ซึ่งมีความละเอียดต่ำ) ได้จำนวนหลายภาพ ดังนั้นจึงสามารถนำภาพซึ่งมีความละเอียดต่ำจำนวนหลายภาพมาสร้างภาพที่มีความละเอียดสูงโดยการใช้เทคนิคการสร้างภาพความละเอียดสูงแบบ SRR

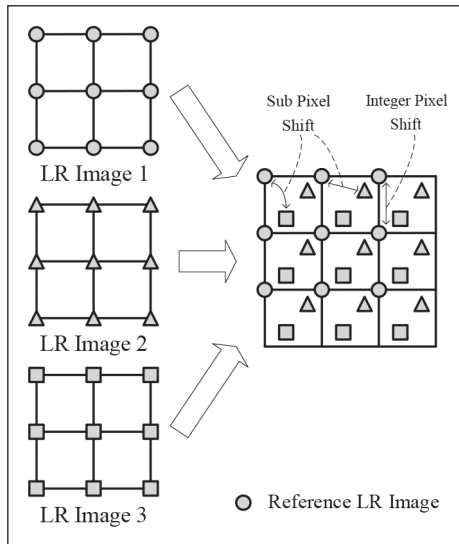
นอกจากนี้แล้วเทคนิคการสร้างภาพความละเอียดสูงแบบ SRR ยังถูกนำไปใช้ในการแปลงรูปแบบของสัญญาณวิดีโอจากสัญญาณวิดีโอแบบ NTSC ซึ่งมีความละเอียดต่ำไปเป็น SDTV, HDTV หรือ UHDTV ซึ่งมีความละเอียดสูงโดยเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อย

ความสัมพันธ์ระหว่างภาพต้นแบบที่มีความละเอียดสูงกับภาพที่ถ่ายได้ซึ่งมีความละเอียดต่ำ

สมมติฐานเกี่ยวกับการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง (Ng & Bose, 2003; Patanavijit, 2009-2) คือ

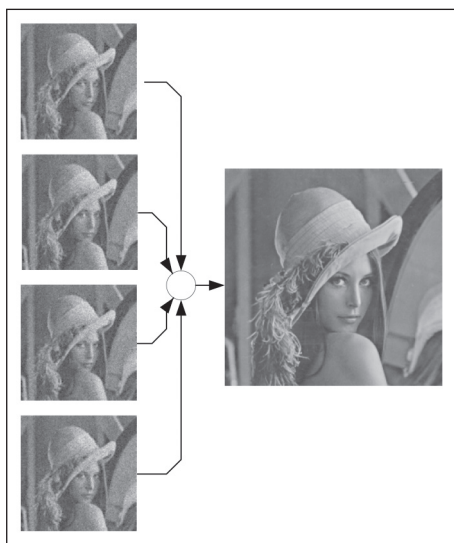
1. ภาพที่มีความละเอียดต่ำจำนวนหลายภาพจะต้องเกิดจากภาพที่มีความละเอียดสูงภาพเดียวกัน
2. ภาพที่มีความละเอียดต่ำจะเกิดจากการถ่ายภาพจากมุมมองที่แตกต่างกัน โดยภาพที่มีความละเอียดต่ำเหล่านี้จะต้องมีข้อมูลที่ทับซ้อนกันในระยะที่น้อยกว่าขนาดของพิกเซล (Subpixel) ดังแสดงในภาพที่ 1 และตัวอย่างของการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งแสดงได้ดังภาพที่ 2 (Patanavijit, 2008)

ถ้าภาพที่มีความละเอียดต่ำมีข้อมูลที่ทับซ้อนกันในระยะเท่ากับขนาดของพิกเซลแล้วเทคนิคการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง (SRR) จะไม่สามารถสร้างภาพความละเอียดสูงได้ดังแสดงในภาพที่ 3



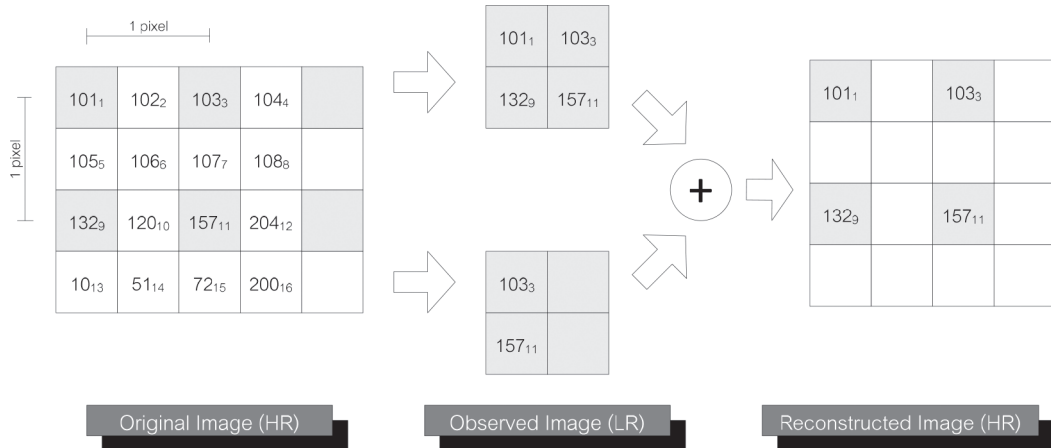
ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างภาพความละเอียดสูงต้นแบบกับภาพความละเอียดต่ำที่บันทึกได้ ซึ่งนำไปสู่แนวคิดของหลักการของการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง

แต่ถ้าภาพที่มีความละเอียดต่ำมีข้อมูลที่ทับซ้อนกันในระยะที่น้อยกว่าขนาดของพิกเซลแล้วเทคนิคการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง (SRR) จะสามารถสร้างภาพความละเอียดสูงได้ดังแสดงในภาพที่ 2

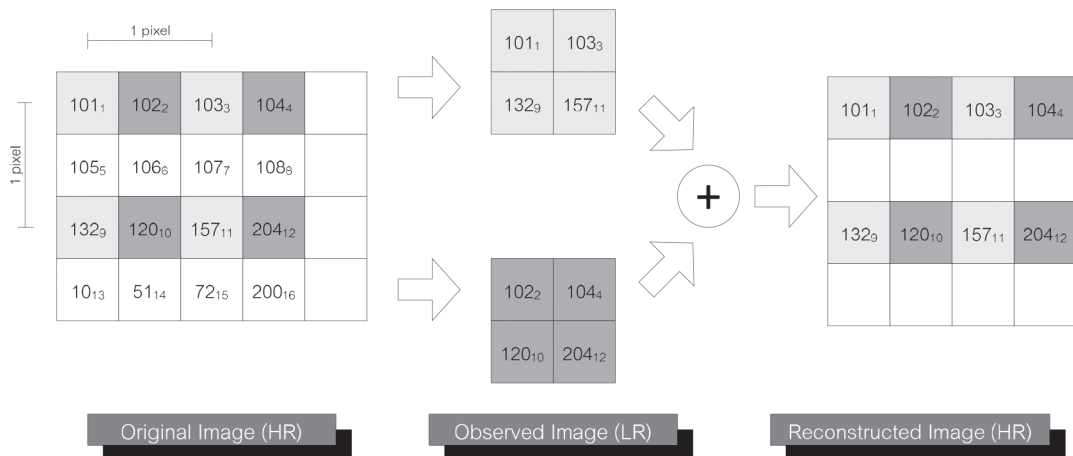


ภาพที่ 2 ตัวอย่างของการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง (Patanavijit, 2008)

ภาพที่ 2 จะแสดงให้เห็นได้ว่าถ้าภาพความละเอียดต่ำ (LR) ที่บันทึกได้มีข้อมูลที่ทับซ้อนกันในระยะที่น้อยกว่าขนาดของพิกเซลแล้วภาพความละเอียดต่ำทั้ง 2 ภาพจะมีข้อมูลที่แตกต่างกัน (ซึ่งข้อมูลจากทั้ง 2 ภาพจะมีความสัมพันธ์กับภาพความละเอียดสูง) ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปสร้างภาพที่มีความละเอียดสูงยิ่ง (SRR) ได้ (ตัวอย่างนี้จะสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งจากภาพความละเอียดต่ำจำนวน 4 ภาพ) ภาพที่มีความละเอียดต่ำแต่ละภาพอาจจะถูกบันทึกจากมุมมองที่แตกต่างกัน (แต่มาจากภาพความละเอียดสูงภาพเดียวกัน) โดยภาพความละเอียดต่ำทั้งหมดจะมีความสัมพันธ์กับภาพความละเอียดสูงในลักษณะใดลักษณะหนึ่ง อย่างเช่น ภาพความละเอียดต่ำได้จากกล้องตัวเดียวกัน โดยกล้องนี้ จะมีการเคลื่อนที่และทำการบันทึกหลายครั้งหรือภาพความละเอียดต่ำได้จากกล้องหลายตัว โดยกล้องแต่ละตัว จะวางอยู่คนละตำแหน่ง เป็นต้น การบันทึกภาพจากมุมมองที่แตกต่างกันนั้นจะทำให้ภาพความละเอียดต่ำที่บันทึกได้มีความสัมพันธ์กันเองด้วย อย่างเช่น ถ้าภาพความละเอียดต่ำที่บันทึกได้มาจากกล้องตัวเดียวกันโดยกล้องนี้จะมีการเคลื่อนที่แล้วจะได้ว่า ภาพความละเอียดต่ำที่บันทึกได้จะมีความสัมพันธ์กันตามลักษณะการเคลื่อนที่ของกล้อง (อย่างเช่น ภาพถ่ายที่ได้จากดาวเทียมหรือการสั่นของระบบกล้อง) ดังนั้นถ้าเราสามารถคำนวณหาแบบการเคลื่อนที่เหล่านี้ได้ และภาพความละเอียดต่ำที่บันทึกได้เป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนดไว้ข้างต้นแล้วเราจะสามารถสร้างภาพความละเอียดสูงขึ้นมากได้ ดังแสดงในภาพที่ 3.2 (ซึ่งจะเห็นได้ว่า ภาพความละเอียดสูงยิ่งที่สร้างขึ้นได้จะมีจำนวนข้อมูลมากกว่าภาพความละเอียดต่ำเพียงภาพเดียว โดยข้อมูลในภาพความละเอียดสูงยิ่งที่ยังคงหายไปจะถูกสร้างขึ้นโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ในระหว่างกระบวนการสร้างคืนภาพหรือภายหลังกระบวนการสร้างคืนภาพก็ได้)



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างของการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งแบบ SRR เมื่อภาพที่มีความละเอียดต่ำจำนวนสองภาพ ที่มีข้อมูลที่ทับซ้อนกันในระยะเท่ากับขนาดเป็นจำนวนเต็มของพิกเซล (1 พิกเซล) จะทำให้กระบวนการสร้างคืน ภาพความละเอียดสูงยิ่งไม่สามารถทำได้ เนื่องจากภาพความละเอียดต่ำที่บันทึกภาพที่สอง (ข้างล่าง) ไม่มีข้อมูล ที่แตกต่างกับภาพความละเอียดต่ำที่บันทึกภาพแรก (ข้างบน) ซึ่งมีข้อมูลจำนวน 4 พิกเซล



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างของการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งแบบ SRR เมื่อภาพที่มีความละเอียดต่ำจำนวนสองภาพ ที่มีข้อมูลที่ทับซ้อนกันในระยะที่น้อยกว่าขนาดจำนวนเต็มของพิกเซล (0.5 พิกเซล) จะทำให้กระบวนการสร้างคืน ภาพความละเอียดสูงยิ่งสามารถทำได้ เนื่องจากภาพความละเอียดต่ำที่บันทึกภาพที่สอง (ข้างล่าง) มีข้อมูล ที่แตกต่าง (จำนวน 4 พิกเซล) กับภาพความละเอียดต่ำที่บันทึกภาพแรก (ข้างบน) ซึ่งมีข้อมูลจำนวน 4 พิกเซล ดังนั้นภาพความละเอียดสูงยิ่งจึงมีข้อมูลเพิ่มขึ้น (เป็นจำนวน 8 พิกเซล)

การบันทึกภาพแบบดิจิตอลจะมีการสูญเสียความละเอียดของข้อมูล ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การลดทอนความเข้มแสงอย่างเช่น การปรับระยะโฟกัสไม่ถูกต้อง (Out of Focus) หรือข้อจำกัดเกี่ยวกับการกระเจิงของแสง (Diffraction Limit)
2. ความไม่ชัดของภาพซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ (Motion Blur) โดยจะมีสาเหตุมาจากตัว Shutter ทำงานช้าเกินไป
3. สัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากตัวเซ็นเซอร์เอง และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในขณะที่ส่งผ่านข้อมูล
4. ปริมาณของตัวเซ็นเซอร์ต่อพื้นที่ (Sensor Density) ซึ่งมีน้อยเกินไป

ลักษณะของการสูญเสียต่างๆ ดังกล่าวจะส่งผลต่อภาพความละเอียดต่ำที่บันทึกได้ ดังนั้นภาพที่มีความละเอียดต่ำซึ่งบันทึกได้จะได้รับอิทธิพลจากสัญญาณรบกวนเหล่านี้ ถึงแม้ว่าหลักการของการสร้างความละเอียดสูงยิ่ง คือ การสร้างภาพความละเอียดสูงจากภาพที่มีความละเอียดต่ำ แต่เทคนิคนี้จะต้องครอบคลุมไปถึงการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณรบกวน ซึ่งทำให้ภาพมีลักษณะไม่ชัดเจนด้วย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง คือ การสร้างภาพที่มีความละเอียดสูงจากภาพที่มีความละเอียดต่ำจำนวนหลายภาพ โดยภาพที่มีความละเอียดต่ำแต่ละภาพจะมีปัญหา Aliasing ด้วย

ปัญหาเกี่ยวกับเทคนิคการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง จะสัมพันธ์กับการแก้ไขและสร้างคืนภาพ (Image Restoration) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการประมวลผลสัญญาณภาพประเภทหนึ่งเพียงแต่วัตถุประสงค์ของการสร้างคืนภาพ คือ การแก้ไขหรือการสร้างข้อมูลที่ถูกลบหายไปจากสัญญาณรบกวนหรือการแก้ไขเกี่ยวกับความไม่คมชัดของภาพ แต่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความละเอียดของภาพ ดังนั้นภาพความละเอียดสูงยิ่งจึงมีความสัมพันธ์ทางทฤษฎีอย่างมากกับการสร้างคืนภาพอย่างมาก ดังนั้นเราอาจจะพิจารณาว่า การสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งเป็นปัญหารุ่นที่สองของการสร้างคืนภาพ

การสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งจะสัมพันธ์กับกระบวนการสร้างข้อมูลแบบ Interpolation แต่กระบวนการสร้างข้อมูลแบบ Interpolation (ซึ่งได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางและยาวนานมากแล้ว) จะสร้างภาพความละเอียดสูงจากภาพความละเอียดต่ำโดยจะไม่ได้แก้ปัญหาหรือใช้ประโยชน์จากปัญหา Aliasing ดังนั้นกระบวนการสร้างข้อมูลแบบ Interpolation โดยทั่วไปแล้วจะพยายามนำฟังก์ชันแบบที่เป็น Basis อย่างเช่น ฟังก์ชัน Sinc มาช่วยในการสร้างข้อมูลขึ้นมาใหม่ แต่ก็ไม่สามารถแก้ไขหรือสร้างข้อมูลความถี่สูงของภาพที่สูญเสียหรือลดทอนไปกลับคืนมาได้จากภาพที่มีความละเอียดต่ำ ดังนั้นกระบวนการสร้างข้อมูลแบบ Interpolation จึงไม่นับเป็นการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง (SRR)

จุดประสงค์ของบทความนี้ คือ การนำเสนอหลักการอย่างกว้างๆ เกี่ยวกับการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งให้กับผู้อ่านที่มีความรู้ทางด้านการประมวลผลสัญญาณภาพอยู่บ้างไปจนถึงผู้อ่านที่มีความชำนาญทางด้านนี้ ดังนั้นเนื้อหาในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงวิธีการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งหลายวิธีและจะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์บันทึกภาพ (Observation Model)

แบบจำลองของอุปกรณ์บันทึกภาพ (Observation Model)

ขั้นตอนแรกในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่ง คือ การกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์บันทึกภาพ (Observation Model) โดยแบบจำลองนี้ คือ ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างภาพต้นแบบที่มีความละเอียดสูงและภาพที่มีความละเอียดต่ำ แบบจำลองนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ แบบจำลองสำหรับการถ่ายภาพนิ่ง (Ng & Bose, 2003; Patanavijit, 2008) และแบบจำลองสำหรับภาพวิดีโอ (Segall, Molina & Katsaggelos, 2003; Chaudhuri & Taur, 2005)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองสำหรับการถ่ายภาพนิ่งเป็นหลัก เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจถึงหลักการของการสร้างภาพความละเอียดสูงจากภาพต้นแบบที่มีลักษณะเป็นภาพนิ่งจะมีแนวคิดทางคณิตศาสตร์ที่ง่ายต่อความเข้าใจ และสามารถขยายขอบเขตเพื่อใช้สำหรับภาพต้นแบบที่เป็นภาพเคลื่อนไหวอย่าง เช่น สัญญาณวิดีโอ ในภายหลังได้ แบบจำลองของอุปกรณ์บันทึกภาพแสดงได้ดังภาพที่ 4 โดยความหมายทางกายภาพของแบบจำลองคือ สัญญาณภาพต้นแบบจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล ($\mathbf{x}$) ก่อนแล้วจึงผ่านกระบวนการเลื่อนหรือหมุน (Warping Process) ซึ่งเกิดจากการสั่นหรือหมุนของตัวกล้อง จึงทำให้ภาพที่บันทึกได้มีมุมมองที่แตกต่างกัน โดยแต่ละภาพก็จะมีรายละเอียดในแต่ละส่วนแตกต่างกันไป หลังจากนั้นภาพที่บันทึกได้ก็จะผ่านกระบวนการที่ทำให้ภาพไม่คมชัด (Blur Process) โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นจากความไม่คมชัดของเลนส์ที่ใช้บันทึกภาพ (Optical Blur) หรือเกิดจากการบันทึกภาพแต่วัตถุกำลังเคลื่อนที่ (Motion Blur) ขั้นตอนถัดไป คือ กระบวนการลดจำนวนข้อมูลเพื่อทำการบันทึกภาพ (Down Sampling) โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นจากความละเอียดของตัวเซ็นเซอร์ที่ใช้บันทึกภาพที่ถูกนำมาใช้ผลิตกล้อง และกระบวนการท้ายสุด คือ การบวกสัญญาณรบกวนลงในภาพที่บันทึกได้ ลักษณะของภาพเมื่อผ่านแบบจำลองของการสร้างภาพคือความละเอียดสูงยังแสดงได้ดังภาพที่ 5

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบบันทึกภาพ (Ng & Bose, 2003) จะสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (1)

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{D}\mathbf{B}_k\mathbf{M}_k\mathbf{x} + \mathbf{n}_k \quad (1)$$

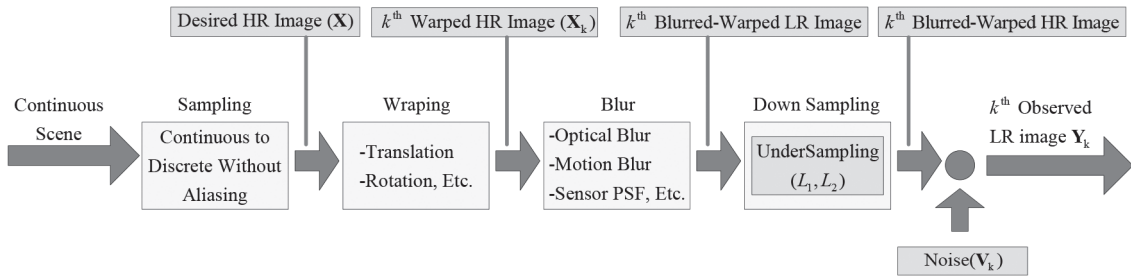
เมื่อ

- เวกเตอร์ $\mathbf{x}$: ภาพต้นแบบมีความละเอียดสูงซึ่งมีความละเอียดเป็น $L_1N_1 \times L_2N_2$ และจะมีค่าคงที่หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการถ่ายภาพ (ซึ่งจะได้ภาพความละเอียดต่ำจำนวนหลายภาพหรือ $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_p$) และโดยทั่วไปแล้วภาพความละเอียดสูงต้นแบบนี้จะนิยมเขียนในรูปเวกเตอร์แบบ Lexicography หรือ

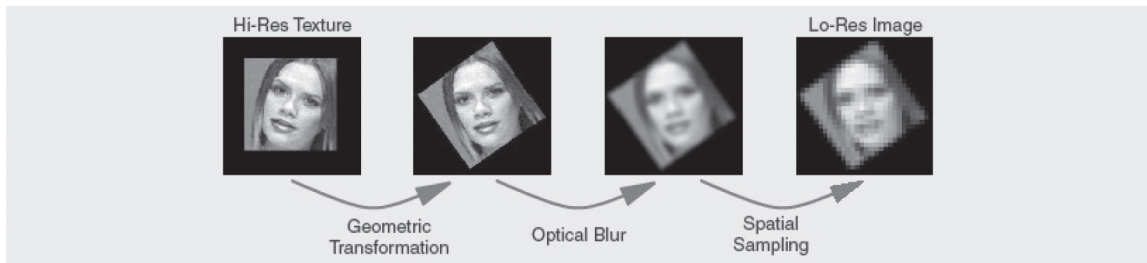
$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{L_1N_1 \times L_2N_2} \end{bmatrix}$$

- เวกเตอร์ $\mathbf{y} : \mathbf{y} = \{\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_p\}$ คือภาพที่บันทึกได้มีความละเอียด $N_1 \times N_2$ ซึ่งได้จากกล้องหรือเซ็นเซอร์โดยภาพเหล่านี้อาจมีการเคลื่อนที่หรือผิดเพี้ยนไปจากภาพความละเอียดสูงต้นแบบ $\mathbf{x}$ อันเนื่องมาจากกระบวนการ Wrap (คือกระบวนการเลื่อนระหว่างการบันทึกภาพถ่าย), กระบวนการที่ทำให้ภาพไม่คมชัด (Blur) และการลดความละเอียดของภาพ (Down-Sampling)
- L_1 : อัตราการลดความละเอียดของภาพ (Down-Sampling) ของข้อมูลภาพในแนวนอน
- L_2 : อัตราการลดความละเอียดของภาพ (Down-Sampling) ของข้อมูลภาพในแนวตั้ง
- p : จำนวนภาพที่มีความละเอียดต่ำ (LR) ที่จะใช้สร้างภาพความละเอียดสูง
- $\mathbf{n}_k$: สัญญาณรบกวน
- $\mathbf{M}_k$: เมตริกของกระบวนการเคลื่อนที่หรือกระบวนการ Wrap
- $\mathbf{B}_k$: เมตริกของกระบวนการที่ทำให้ภาพไม่คมชัด (Blur) ซึ่งสร้างจากแบบจำลองของระบบบันทึกภาพ
- $\mathbf{D}_k$: เมตริกของการลดความละเอียดของภาพ (Down-Sampling)

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองของการบันทึกภาพเพื่อให้ผู้อ่านมีความเข้าใจมากขึ้นโดยรายละเอียดต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้



ภาพที่ 4 แบบจำลองสำหรับภาพความละเอียดต่ำกับภาพความละเอียดสูง



ภาพที่ 5 ลักษณะของภาพเมื่อผ่านแบบจำลองของการบันทึกภาพ (Capel & Zisserman, 2003)

ตัวอย่างของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

กำหนดให้ x คือ ภาพต้นแบบซึ่งมีความละเอียด 4×4 พิกเซล และกำหนดให้ y คือภาพต้นแบบซึ่งมีความละเอียด 2×2 พิกเซล โดยจะแบ่งเป็น 4 ภาพ คือ ภาพ y_1, y_2, y_3 และ y_4 ตามลำดับ (ดังแสดงในภาพที่ 6)

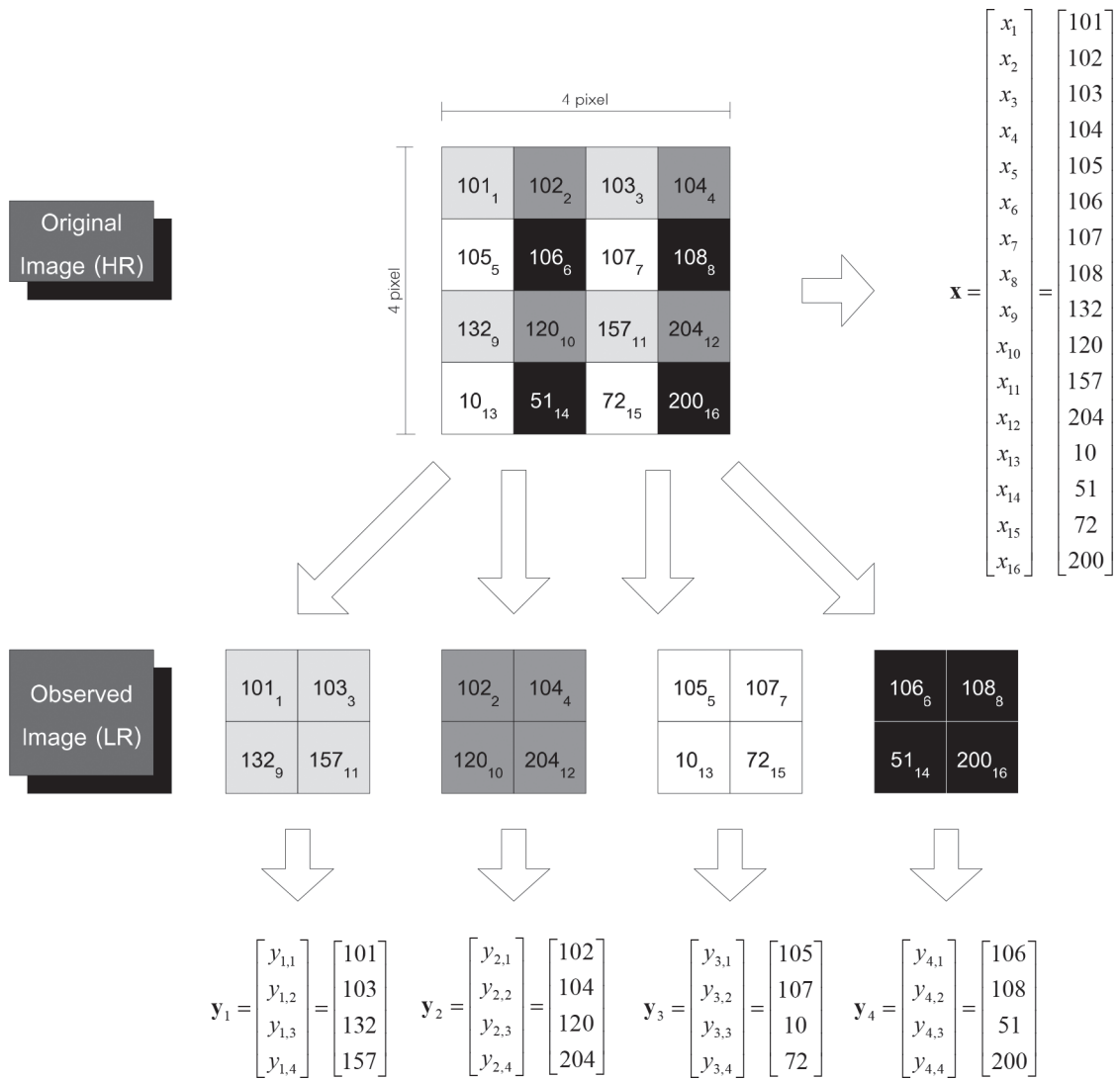
กำหนดให้ $L_1 = L_2 = 2$

และเมื่อแทนค่าเวกเตอร์ x และเวกเตอร์ y_1 ลงในสมการที่ (3.1) จะได้ว่า

$$y_k = D \cdot B_k \cdot M_k \cdot x = n_k \quad (1)$$

$$y_1 = D \cdot B_1 \cdot M_1 \cdot x = n_1 \quad (2)$$

โดยรายละเอียดของแต่ละพจน์ในสมการที่ (2) สามารถแสดงได้ดังในภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ตัวอย่างข้อมูลภาพเมื่อเขียนในรูปเวกเตอร์ $\mathbf{x}$ และตามสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} 101 \\ 103 \\ 132 \\ 157 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1,1-1} & D_{1,1-2} & \dots & D_{1,1-16} \\ D_{1,2-1} & D_{1,2-2} & \dots & D_{1,2-16} \\ D_{1,3-1} & D_{1,3-2} & \dots & D_{1,3-16} \\ D_{1,4-1} & D_{1,4-2} & \dots & D_{1,4-16} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_{1,1-1} & B_{1,1-2} & B_{1,1-3} & \dots & B_{1,1-16} \\ B_{1,2-1} & B_{1,2-2} & B_{1,2-3} & \dots & B_{1,2-16} \\ B_{1,3-1} & B_{1,3-2} & B_{1,3-3} & \dots & B_{1,3-16} \\ B_{1,4-1} & B_{1,4-2} & B_{1,4-3} & \dots & B_{1,4-16} \\ B_{1,5-1} & B_{1,5-2} & B_{1,5-3} & \dots & B_{1,5-16} \\ B_{1,6-1} & B_{1,6-2} & B_{1,6-3} & \dots & B_{1,6-16} \\ B_{1,7-1} & B_{1,7-2} & B_{1,7-3} & \dots & B_{1,7-16} \\ B_{1,8-1} & B_{1,8-2} & B_{1,8-3} & \dots & B_{1,8-16} \\ B_{1,9-1} & B_{1,9-2} & B_{1,9-3} & \dots & B_{1,9-16} \\ B_{1,10-1} & B_{1,10-2} & B_{1,10-3} & \dots & B_{1,10-16} \\ B_{1,11-1} & B_{1,11-2} & B_{1,11-3} & \dots & B_{1,11-16} \\ B_{1,12-1} & B_{1,12-2} & B_{1,12-3} & \dots & B_{1,12-16} \\ B_{1,13-1} & B_{1,13-2} & B_{1,13-3} & \dots & B_{1,13-16} \\ B_{1,14-1} & B_{1,14-2} & B_{1,14-3} & \dots & B_{1,14-16} \\ B_{1,15-1} & B_{1,15-2} & B_{1,15-3} & \dots & B_{1,15-16} \\ B_{1,16-1} & B_{1,16-2} & B_{1,16-3} & \dots & B_{1,16-16} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} M_{1,1-1} & M_{1,1-2} & M_{1,1-3} & \dots & M_{1,1-16} \\ M_{1,2-1} & M_{1,2-2} & M_{1,2-3} & \dots & M_{1,2-16} \\ M_{1,3-1} & M_{1,3-2} & M_{1,3-3} & \dots & M_{1,3-16} \\ M_{1,4-1} & M_{1,4-2} & M_{1,4-3} & \dots & M_{1,4-16} \\ M_{1,5-1} & M_{1,5-2} & M_{1,5-3} & \dots & M_{1,5-16} \\ M_{1,6-1} & M_{1,6-2} & M_{1,6-3} & \dots & M_{1,6-16} \\ M_{1,7-1} & M_{1,7-2} & M_{1,7-3} & \dots & M_{1,7-16} \\ M_{1,8-1} & M_{1,8-2} & M_{1,8-3} & \dots & M_{1,8-16} \\ M_{1,9-1} & M_{1,9-2} & M_{1,9-3} & \dots & M_{1,9-16} \\ M_{1,10-1} & M_{1,10-2} & M_{1,10-3} & \dots & M_{1,10-16} \\ M_{1,11-1} & M_{1,11-2} & M_{1,11-3} & \dots & M_{1,11-16} \\ M_{1,12-1} & M_{1,12-2} & M_{1,12-3} & \dots & M_{1,12-16} \\ M_{1,13-1} & M_{1,13-2} & M_{1,13-3} & \dots & M_{1,13-16} \\ M_{1,14-1} & M_{1,14-2} & M_{1,14-3} & \dots & M_{1,14-16} \\ M_{1,15-1} & M_{1,15-2} & M_{1,15-3} & \dots & M_{1,15-16} \\ M_{1,16-1} & M_{1,16-2} & M_{1,16-3} & \dots & M_{1,16-16} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 101 \\ 102 \\ 103 \\ 104 \\ 105 \\ 106 \\ 107 \\ 108 \\ 132 \\ 120 \\ 157 \\ 204 \\ 10 \\ 51 \\ 72 \\ 200 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{1,1} \\ n_{1,2} \\ n_{1,3} \\ n_{1,4} \end{bmatrix}$$

ภาพที่ 7 รายละเอียดของสมการที่ (6) โดยถ้าทราบรายละเอียดของระบบบันทึกภาพแล้ว

เราสามารถคำนวณหาค่า n_k , M_k , B_k และ D_k ได้และเราก็จะสามารถคำนวณหาภาพต้นแบบ x ได้ หรือสามารถสร้างภาพความละเอียดสูงได้นั่นเอง

ปัญหาของการสร้างภาพความละเอียดสูงโดยทั่วไปแล้วคือเราจะทราบค่า y , D_k , B_k , M_k และเราต้องการคำนวณหาค่า x ซึ่งเป็นภาพต้นแบบ ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาค่า x จากการหาผลเฉลยของสมการที่ (1) ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีโดยวิธีเหล่านี้จะประกอบด้วย การเพิ่มความละเอียดของข้อมูล (Upsampling), การกำจัดความไม่คมชัดของภาพและการกำจัดสัญญาณรบกวน ดังนั้นกระบวนการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งคือการคำนวณหาค่า $\hat{x}$ ที่ทำให้สมการที่ (1) เป็นจริง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเราจะคำนวณหาค่า $\hat{x}$ ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\hat{x} = \underset{x}{\text{ArgMin}} \left\{ \sum_{k=1}^p \rho(\mathbf{D}\mathbf{B}_k \mathbf{M}_k \mathbf{x} - \mathbf{y}_k) \right\} \quad (2)$$

เมื่อ $\rho(x)$ คือฟังก์ชัน Norm ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะนิยามกำหนดให้เป็นฟังก์ชันแบบ L2 (หรือ $\rho(x) = (x)^2$)

การกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบันทึกภาพ (Observation Model) จะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ใช้งาน ดังนั้นแบบจำลองนี้จะเป็นตัวกำหนดวิธีการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งที่ใช้คำนวณและ

กระบวนการบันทึกภาพ (หรือถ่ายภาพ) ดังแสดงในสมการที่ (1) อัลกอริทึมการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งแบบต่างๆ (Ng & Bose, 2003; Patanavijit, 2008) ที่มีการนำเสนออีกคือ การคำนวณหา $\hat{x}$ ด้วยวิธีต่างๆ (ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป) อย่างเช่น

1. วิธีแบบ Nonuniform Interpolation
2. วิธีแบบ Frequency Domain
3. วิธีแบบ Regularized ML (Maximum Likelihood)
4. วิธีแบบ POSC (Projection Onto Convex Set)
5. วิธีแบบ ML-POCS Hybrid Reconstruction
6. วิธี SRR แบบอื่นๆ

- วิธีแบบ Iterative Back-Projection
- วิธีแบบ Adaptive Filtering
- วิธีแบบ Motionless SR Reconstruction

รายละเอียดของแต่ละวิธีโดยผู้อ่านที่สนใจสามารถหารายละเอียดของแต่ละวิธีได้จากเอกสาร (Park, Park & Kang, 2003; Patanavijit, 2009-2)

สรุป

บทความนี้จะอธิบายเกี่ยวกับแนวคิดและหลักการของการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งให้กับผู้อ่านที่ไม่ค่อยมีความรู้ทางด้านนี้ไปจนถึงผู้อ่านที่มีความชำนาญ

ทางด้านนี้เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางของการพัฒนาและวิจัยต่อไป เนื่องจากการสร้างภาพความละเอียดสูงยิ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน

บรรณานุกรม

- Capel, D. & Zisserman, A. (2003). Computer Vision Applied to Super Resolution. *IEEE Signal Processing Magazine*, 20(3), 75-86.
- Chaudhuri, S. & Taur, D. R. (2005). High-Resolution Slow-Motion Sequencing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 22(2), 16-24.
- Kang, M. G. & Chaudhuri, S. (2003). Super-Resolution Image Reconstruction. *IEEE Signal Processing Magazine*, 20(3), 19-20.
- Ng, M. K. & Bose, N. K. (2003). Mathematical analysis of super-resolution methodology. *IEEE Signal Processing Magazine*, 20(3), 62-74.
- Park, S. C., Park, M. K. & Kang, M. G. (2003). Super-Resolution Image Reconstruction: A Technical Overview. *IEEE Signal Processing Magazine*, 20(3), 21-36.
- Patanavijit, V. (2008). A Robust Iterative Multiframe SRR using Stochastic Regularization Technique Based on Geman & McClure Estimation, *Proceeding of The National Conference on Information Technology 2008 (NCIT 2008)*, Bangkok, Thailand, Nov. 2008.
- Patanavijit, V. (2009-1). Super-Resolution Reconstruction and its Future Research Direction. *AU Journal of Technology*, 12(3), 149-163.
- Patanavijit, V. (2009-2). Mathematical Analysis of Stochastic Regularization Approach for Super-Resolution Reconstruction. *AU Journal of Technology*, 12(4), 235-244.
- Rajan, D., Chaudhuri, S. & Joshi, M. V. (2003). Multi-objective super resolution concepts and examples, *IEEE Signal Processing Magazine*, 20(3), 49-61.
- Segall, C. A., Molina, R. & Katsaggelos, A. K. (2003). "High-resolution Images from Low-Resolution Compressed Video". *IEEE Signal Processing Magazine*, 20(3), 37-48.



Name and Surname: Vorapoj Patanavijit

Highest Education: Doctor of Philosophy (Ph.D.) in Electrical Engineering, Chulalongkorn University

University or Agency: Assumption University

Field of Expertise: He has authored and co-authored over 110 national/international peer-reviewed publications in Digital Signal Processing (DSP) and Digital Image Processing (DIP); He works in the field of signal processing and multidimensional signal processing, specializing, in particular, on Image/Video Reconstruction, SRR (Super-Resolution Reconstruction), Compressive Sensing, Enhancement, Fusion, Denoising, Inverse Problems, Motion Estimation, Optical Flow Estimation and Registration.

Address: VME Bldg. (Vincent Mary Bldg.), 2nd Flr., 88 Moo 8, Bang Na-Trad Km. 26, Samuthprakarn, 10540