

การปรับเทียบฮิสโตแกรมแบบปรับได้จำกัดคอนทราสต์หลายมิติ

Vincent Stimper^{1,2,□}, Stefan Bauer¹, Ralph Ernstorfer³

Bernhard Schölkopf¹ และ R. Patrick Xian^{3,□} 1Max

Planck Institute for Intelligent Systems, 72076 Tübingen, Germany

2Physics Department, Technical University Munich, 85748 Garching, Germany

3Fritz Haber Institute of the German Academy of Sciences, 14195 Berlin, Germany

{vincent.stimper,stefan.bauer,bs}@tue.mpg.de, {ernstorfer,xian}@fhi-berlin.mpg.de

เชิงนามธรรม

การเพิ่มความคมชัดเป็นเทคนิคการประมวลผลล่วงหน้าที่สำคัญสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของงานด้านคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลภาพและการมองเห็นของคอมพิวเตอร์

ในบรรดาวิธีการที่มีอยู่ซึ่งอิงตามการแปลงฮิสโตแกรมแบบไม่เชิงเส้น การทำให้เท่ากันของฮิสโตแกรมแบบจำกัดคอนทราสต์ (CLAHE) เป็นตัวเลือกยอดนิยมสำหรับการจัดการกับภาพ 2 มิติที่ได้จากการตั้งค่านิยามและวิทยาศาสตร์ การอัปเดตฮาร์ดแวร์ล่าสุดในระบบการรับข้อมูลส่งผลให้ความซับซ้อนของข้อมูลเพิ่มขึ้นอย่างมาก รวมถึงขนาดและมิติข้อมูล การวัดข้อมูลตัวอย่างหนาแน่นที่สูงกว่าสามมิติ ซึ่งโดยปกติจะประกอบด้วยข้อมูล 3 มิติเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ภายนอก กำลังกลายเป็นเรื่องธรรมดาในการใช้งานต่างๆ ในด้านวิทยาศาสตร์ธรรมชาติและวิศวกรรมศาสตร์ ความเข้าใจเบื้องต้นของชุดข้อมูลหลายมิติที่ซับซ้อนเหล่านี้มักต้องการการแทรกแซงของมนุษย์ผ่านการตรวจสอบด้วยสายตา ซึ่งอาจถูกขัดขวางโดยระดับความแปรปรวนที่แตกต่างกันผ่านมิติต่างๆ เราแสดงทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณว่าการใช้ส่วนขยายหลายมิติของ CLAHE (MCLAHE) พร้อมกันในทุกมิติของชุดข้อมูลช่วยให้มองเห็นภาพได้ดีขึ้นและแยกแยะคุณสมบัติของภาพหลายมิติได้ดีขึ้น ดังที่แสดงโดยใช้กรณีจาก 4D photoemission spectroscopy และกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ การใช้งาน CLAHE แบบหลายมิติของเราใน Tensorflow สามารถเข้าถึงได้แบบสาธารณะและสนับสนุนการขนานพอร์ตด้วย CPU หลายตัวและตัวเร่งความเร็วฮาร์ดแวร์อื่นๆ รวมถึง GPU

คำสำคัญ: การปรับปรุงคอนทราสต์, ฮิสโตแกรมอีควอไลเซชัน, การวิเคราะห์ข้อมูลหลายมิติ, สเปกโตรสโกปีแบบโฟโตอีมิสชัน, กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์

I. บทนำ

ความคมชัดเป็นเครื่องมือในการประมวลผลภาพและอยู่ภายใต้สถานะของเนื้อหาข้อมูลภายในภาพในการตั้งค่าต่างๆ [1] ดังนั้นวิธีการคำนวณสำหรับ

การปรับปรุงคอนทราสต์ (CE) มักใช้เพื่อพิสูจน์การมองเห็นของภาพ [2] ในบรรดาวิธี CE ที่มีอยู่ อัลกอริทึมที่ใช้การแปลงฮิสโตแกรมเป็นที่ยอมรับเนื่องจากประสิทธิภาพการคำนวณ ภาพธรรมชาติที่มีความแปรปรวนสูงมักจะมีฮิสโตแกรมความเข้มที่สมดุล แนวคิดนี้นำไปสู่การพัฒนาฮิสโตแกรมอีควอไลเซชัน (HE) [3] ตัวอย่างที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอัลกอริทึม CE คลาสนี้คือการปรับค่าฮิสโตแกรมแบบจำกัดคอนทราสต์แบบจำกัด (CLAHE) [4; 5] เดิมกำหนดในรูปแบบ 2D ซึ่งทำการปรับแต่งคอนทราสต์ของภาพในท้องถิ่นด้วยการขยายสัญญาณรอบหน้าต่าง การปรับคอนทราสต์จะสอดคล้องกับพื้นที่ภาพเส้นตรงใกล้ๆ ที่น้ำเหนือซึ่งเรียกว่าเคอร์เนล และการปรับ spatial ใน CLAHE ทำได้ผ่านการเลือกขนาดเคอร์เนล ช่วงความเข้มของฮิสโตแกรมเคอร์เนล (หรือฮิสโตแกรมเฉพาะที่) ถูกกำหนดโดยจำกัดของคลิปที่จำกัดการขยายสัญญาณรอบหน้าต่างผลลัพธ์ บัญชีของการพัฒนาทางประวัติศาสตร์ระบุไว้ในส่วนที่สองกรณีการใช้ CLAHE และรูปแบบต่างๆ มีตั้งแต่การสำรวจได้น้ำ [6] การตรวจหาแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเอกซเรย์แบบโมโนแกรม [7; 8], การรับรองความถูกต้องด้วยไบโอเมตริกซ์ [9] มิติวิดีโอ [10] ไปจนถึงการเข้ารหัสการลดสิ่งประดิษฐ์ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [11] และกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์แบบหลายช่องสัญญาณ [12] เนื่องจากการกำหนดสูตรดั้งเดิม การใช้งานจึงเน้นเฉพาะในภาคสนามและอุปกรณ์ที่สร้างภาพ 2 มิติ

อย่างไรก็ตาม ระบบการเก็บข้อมูลปัจจุบันสามารถผลิตข้อมูลภาพตัวอย่างหนาแน่นในสามมิติหรือสูงกว่าด้วยอัตราที่สูง [13; 14; 15; 16; 17] ตามความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วในวิธีการทางสเปกโทรสโกปีและการถ่ายภาพในลักษณะเฉพาะของวัสดุและระบบทางชีววิทยา การกรองผ่านกองรูปภาพเพื่อระบุคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องสำหรับการใช้งานทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมกำลังกลายเป็นงานที่กำลังท้าทายมากขึ้น แม้จะมีเทคนิคการทดลองที่หลากหลาย แต่พารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ ความดัน ความยาวของคลื่น ความเข้มข้น ฯลฯ ในระบบที่วัดซึ่งเป็นผลมาจากไดนามิกภายในหรือการก่อตัวของภายนอกมักถูกแปลเป็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มที่ลงทะเบียนโดยวงจรตรวจจับภาพ [18] การแสดงภาพและการแยกคุณลักษณะของภาพหลายมิติจากข้อมูลที่ได้รับมักเริ่มต้นด้วยการตรวจด้วยสายตาของมนุษย์ ซึ่งได้รับอิทธิพลจากความแปรปรวนที่กำหนดโดยกลไกการตรวจจับ สภาวะของชิ้นงานทดสอบ และความละเอียดของเครื่องมือ เพื่อช่วยเหลือ

□ติดต่อผู้เขียน

การประมวลผลภาพหลายมิติและความเข้าใจ อัลกอริทึม CE ที่มีอยู่ซึ่งกำหนดในรูปแบบ 2 มิติควรปรับให้เข้ากับความต้องการในมิติที่สูงขึ้น (3 มิติขึ้นไป) เมื่อเร็ว ๆ นี้ ส่วนขยาย 3 มิติของ CLAHE ที่ทำงานพร้อมกันในทุกมิติได้รับการอธิบายและแสดงเพื่อเปรียบเทียบได้ดีกว่า CLAHE 2 มิติสำหรับข้อมูลภาพเชิงปริมาตร (3 มิติ) ทั้งในการตรวจสอบด้วยสายตาและในเมตริกคอนทราสต์ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด (p.a.) [19].

สูตรของ 2D [5] และ 3D CLAHE [19] algo rithms รวมถึงการรักษาแต่ละส่วนของภาพที่ถูกผูกไว้ (มุมและขอบประเภทต่างๆ) ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าเบื่อหน่ายในมิติที่สูงขึ้น นอกจากนี้ การคำนวณฮิสโตแกรมของเคอร์เนลและการแปลงความเข้มที่ปรับขนาดได้ถือเป็นความท้าทายที่สำคัญในมิติที่สูงขึ้น ในงานนี้ เรากำหนดและใช้งาน m -dimensional CLAHE (MCLAHE) ซึ่งเป็นการวางทั่วไปที่ยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพของอัลกอริทึม CLAHE กับจำนวนมิติโดยพลการ การแนะนำอัลกอริทึมของ MCLAHE ก่อให้เกิดการกำหนดขอบเขตของภาพแบบรวมเป็นหนึ่งเดียว และลดการใช้เคอร์เนลรูปทรงสี่เหลี่ยมตามอำเภอใจ และขยายขอบเขตการปรับตัวเชิงพื้นที่ของ CLAHE ไปสู่ความเข้มที่กระทำหลักด้วยการเลือกช่วงฮิสโตแกรมแบบปรับได้ การใช้งานแบบ parallelized ของ MCLAHE ยังช่วยให้การคำนวณขึ้นอยู่กับฮาร์ดแวร์เร็วขึ้นผ่านการใช้ m title CPUs และ GPU ไม่มีแง่มุมใดที่เกี่ยวข้องกับการจัดการภาพหลายมิติที่ซับซ้อนที่ได้รับความสะดวกในสูตรดั้งเดิมของ 2D [4; 5] หรือ 3D CLAHE [19] ต่อไป เราแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ MCLAHE โดยใช้การเปรียบเทียบกับภาพและการคำนวณคอนทราสต์เมตริกของชุดข้อมูล 4 มิติ (3 มิติ+เวลา) สองชุดในวิทยาศาสตร์ชีววิทยาโอมิกส์สเปกโทรสโกปี [20] และในวิทยาศาสตร์ชีวภาพโดยกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ [21] ตามลำดับ เทคนิคทั้งสองนี้เป็นตัวแทนของความสามารถในการเข้าในปัจจุบันและความสะดวกของวิธีการด้านซึ่งข้อมูลหลายมิติในวิทยาศาสตร์ธรรมชาติ การใช้และการนำ CE มาใช้ในชุมชนของटनाอาจเป็นประโยชน์ต่อการสร้างภาพข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นปลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในชุดข้อมูลสเปกโทรสโกปีการปล่อยแสงของอิเล็กโตรนิกไดนามิกส์ในวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ เราแสดงให้เห็นว่า MCLAHE สามารถลดความเข้มแวนไอส์โกริปได้อย่างมาก และเปิดใช้งานการตรวจสอบด้วยสายตาของคุณสมบัติไดนามิกทั้งแบบดัดแปลง ในชุดข้อมูลกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ของตัวอ่อนที่กำลังพัฒนา [22] เราแสดงให้เห็นว่า MCLAHE ปรับปรุงการมองเห็นของไดนามิกส์ของเซลล์จากการกระจัดกระจาย นอกจากนี้ เรายังจัดเตรียม TensorFlow [23] การกล่าวถึง MCLAHE แบบธรรมดาที่เข้าถึงได้แบบสาธารณะบน GitHub [24] ซึ่งช่วยให้สามารถเข้าถึงได้และอำนวยความสะดวกในการนำอัลกอริทึมไปใช้ในชุมชนที่กว้างขึ้น

โครงสร้างของกระดาษมีดังนี้ ในส่วนที่ II เราเน้นการพัฒนาในการปรับฮาร์ดแวร์ที่นำไปสู่ CLAHE และการใช้เทคนิคคอนทราสต์ในการประเมินผลลัพธ์ ในส่วนที่ III เราจะลงรายละเอียดเกี่ยวกับตัวสร้างค่าความแตกต่างของอัลกอริทึม MCLAHE จากอัลกอริทึม CLAHE มีดีลางก่อนหน้า ในส่วนที่ IV เราอธิบายกรณีการใช้งานของ MCLAHE ใน 4D photoemission spectroscopy และข้อมูลกล้องจุลทรรศน์เรืองแสง ในส่วนที่ V เราแสดงงานคิดค้นที่เกี่ยวข้องกับข้อจำกัดในปัจจุบันและการปรับปรุงที่เป็นไปได้เล็กน้อยในการออกแบบอัลกอริทึมและซอฟต์แวร์

การใช้งานเครื่อง ในที่สุดในส่วนที่ 6 เราได้ข้อสรุป

ครั้งที่สอง งานที่เกี่ยวข้อง

CE ที่ใช้การแปลงฮิสโตแกรมเริ่มต้นด้วยอัลกอริธึมการปรับค่าฮิสโตแกรมที่พัฒนาโดย Hall ในปี 1974 [3] โดยการกำหนดความเข้มแบบพิกเซลที่ได้มาจากฟังก์ชันการกระจายสะสมแบบปกติ (CDF) ของฮิสโตแกรมความเข้มของภาพทั้งหมดถูกนำมาใช้เพื่อปรับรูปร่างโทเนอแกรมของภาพให้เป็น การกระจายที่สม่ำเสมอมากขึ้น [3; 25]. อย่างไรก็ตาม วิธีการของ Hall จะคำนวณฮิสโตแกรมความเข้มทั่วโลก ซึ่งสามารถมองข้ามคุณสมบัติของภาพขนาดละเอียดที่มีคอนทราสต์ต่างกันได้ การปรับเปลี่ยนในภายหลังของบทนำ HE เกิดขึ้นอย่างอิสระโดย Ketcham [26] และ Hummel [27] โดยตั้งชื่อว่า Adaptive Histogram Equalization (AHE) [4] โฆษณาแต่ละประเด็นนี้โดยใช้ความเข้มของฮิสโตแกรมของภาพแต่ละเส้นที่เรียกว่าเคอร์เนล หรือ region ปรับรอบ ๆ แต่ละพิกเซลเพื่อปรับเป็นการแปรความเข้ม

อย่างไรก็ตาม AHE มาพร้อมกับกับการคำนวณเหนือศีรษะที่สำคัญเนื่องจากการคำนวณฮิสโตแกรมของเคอร์เนลรอบพิกเซลทั้งหมด ในด้านประสิทธิภาพ สัญญาณรบกวนในบริเวณที่มีความเข้มต่ำเสมอสัมพันธ์กันมักจะถูกขยายมากเกินไป โพเซอร์และคณะ เสนอเวอร์ชันของ AHE [4] โดยมีค่าใช้จ่ายการคำนวณน้อยกว่ามากโดยใช้เฉพาะเมล็ดที่อยู่ติดกันซึ่งแบ่งภาพสำหรับการคำนวณฮิสโตแกรมในเครื่อง ความเข้มที่แปลงแล้วจะถูกแทรกสอดแบบ bilinear กับพิกเซลอื่นที่ไม่ได้อยู่ที่กลางของเคอร์เนลไปยังกว่านั้น พวกเขาแนะนำขั้นตอนของคลิปปิสโตแกรมเพื่อจำกัดการกระจายความหนาแน่นและยับยั้งการขยายสัญญาณรบกวน [4; 5]. ส่วนขยาย 3 มิติของ CLAHE เพิ่งเปิดตัวโดย Amorim และคณะ [19] สำหรับการประมวลผลภาพทางการแพทย์ อัลกอริทึมของพวกเขาใช้เมล็ดปริมาตรเพื่อคำนวณโทแกรมในพื้นที่ของเขาและการแก้ไขแบบสามเส้นเพื่อให้ได้มาแบบความเข้มของ voxelwise จากเมล็ดเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด ผลลัพธ์เชิงคุณภาพแสดงให้เห็นในข้อมูลการถ่ายภาพด้วยคลื่นสนามแม่เหล็ก ซึ่งแสดงว่า CLAHE แบบทวีปริมาตรนำไปสู่คอนทราสต์ที่ดีกว่าการใช้ 2D CLAHE แบบแยกส่วนกับข้อมูลทุกส่วน

การประเมินผลลัพธ์ของการเพิ่มคอนทราสต์จำเป็นต้องใช้มาตรวัดเชิงปริมาณของคอนทราสต์ของภาพ ซึ่งไม่ค่อยใช้ในการสารถีอัลกอริทึม HE ในระยะแรก [4; 3; 26; 27; 28; 29] เนื่องจากกรณีการใช้งานส่วนใหญ่อยู่ใน 2D และการปรับปรุงคุณภาพของภาพเป็นส่วนใหญ่ในการตั้งค่าเฉพาะโดเมนที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานง่ายที่สูงขึ้น ภาพสามมิติ (3D ขึ้นไป) การย้อมสีไม่บ่อยนักเหมาะสมสำหรับการ์ดสกิน แต่เมตริกของวัตถุประเภทของรูปร่างที่เฉพาะเจาะจงสามารถรู้ได้ทันทีโดยใช้อัลกอริทึมที่เรียกว่า Mean Squared Error (MSE) หรือ PSNR ที่เกี่ยวข้อง [30; 31], ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เรียกอีกอย่างว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกำลังสองของราก) [32] และเอนโทรปีของแนบนอน (เรียกอีกอย่างว่าเอนโทรปีระดับสีเทา) [33] เมตริกเหล่านี้สามารถสรุปได้โดยทั่วไปสำหรับภาพในขนาดตามอำเภอใจ [34] และง่ายต่อการคำนวณ นอกจากนี้ เรายังทราบด้วยว่าแต่ละแบบการประเมินคุณภาพของภาพ 2 มิติที่เพิ่งพัฒนาขึ้นเมื่อเร็ว ๆ นี้ จะอิงตามความเข้าใจปัจจุบันของระบบการมองเห็นของมนุษย์ [30; 33] ฟูลอนแล้วมีประสิทธิผลมากกว่าเมตริกแบบคลาสสิก

เราเลือกที่จะหาปริมาณคอนทราสต์ ลักษณะทั่วไปและความเกี่ยวข้องกับการประเมินภาพที่มีมิติสูงซึ่งได้รับจากวิทยาศาสตร์ธรรมชาติและการตั้งคำถามทางวิศวกรรม ซึ่งยังไม่มีการสำรวจถึง 10 ภาพโดยไม่มีการอ้างอิงที่ไม่บิดเบือน ดังนั้นจึงไม่ได้ใช้ที่นี่เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์

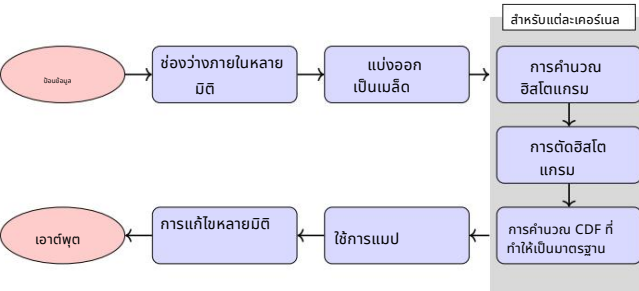
สาม. วิธีการ

ก. ภาพรวม

การขยาย CLAHE ไปสู่มิติต่างๆ โดยพลการจำเป็นต้องมีข้อจำกัดบางอย่างที่มีอยู่ของอัลกอริทึมเวอร์ชัน 2D (หรือ 3D) (1) สูตรของ 2D [4; 5] และ 3D CLAHE [19] เกี่ยวข้องกับการแจกแจงขอบเขตของภาพอย่างชัดเจน ซึ่งกลายเป็นเรื่องน่าเบื่อและไม่สามารถปรับขนาดได้ตามอำเภอใจเนื่องจากจำนวนของ $dis \propto 1$ กับ re

ขอบเขตสีอ่อนจะขยายแบบทวีคูณเป็น 3 สเปกตรัมตามจำนวน มิติ D เราแก้ไขปัญหานี้โดยแนะนำการเติมข้อมูลใน MCLAHE เป็นขั้นตอนเริ่มต้น เพื่อให้ฟังก์ชัน D-มิติทุกฟังก์ชันมีขนาดใกล้เคียงกับข้อมูลเสริม (ดูส่วน III.ข). การเติมข้อมูลยังช่วยให้สามารถเลือกเคอร์เนลที่มีขนาดเล็กกว่าข้อมูลต้นฉบับได้ตามอำเภอใจ (2)

ระเบียบแบบแผนสำหรับการคำนวณและการแสดงแทรกการกำหนดที่ความหนาแน่นจำเป็นต้องได้รับการทำให้เป็นภาพรวมโดยพลการ เรานำเสนอสูตรที่เป็นเอกภาพโดยใช้รูปแบบ Lagrange ของการแก้ไขแบบหลายเส้น [35] ซึ่งรวมถึงการใช้การแก้ไขแบบสองเส้นและสามเส้นตามลำดับใน 2 มิติ [4; CLAHE รุ่น 5] และ 3D [19] เป็นกรณีพิเศษในมิติที่ต่ำกว่า (ดูส่วน III.C) (3) เพื่อลดการขยายสัญญาณรบกวนเพิ่มเติมในการประมวลผลข้อมูลภาพที่มีคุณลักษณะความเข้มต่างกันอย่างมาก เราขอแนะนำช่วงฮิสโตแกรมแบบปรับได้ (AHR) ซึ่งขยายการปรับเชิงพื้นที่ของอัลกอริทึม CLAHE ตั้งแต่ไม่ยังโตแม้นความเข้ม AHR อนุญาตให้เลือกช่วงฮิสโตแกรมเฉพาะที่ตามช่วงความเข้มของแต่ละเคอร์เนล แทนที่จะใช้ช่วงโทแกรมของเขาทั่วโลก (GHR) (ดูส่วน III.D)



รูปที่ 1: แผนผังของอัลกอริทึม MCLAHE

อัลกอริทึม MCLAHE ถูกสรุปเป็นกราฟิกในรูปที่ 1 และในรหัสเทียมในอัลกอริทึม 1 มันทำงานบนข้อมูลอินพุตของมิติ D โดยที่ D เป็นจำนวนเต็มบวก ให้ s_i เป็นขนาดของข้อมูลตาม มิติที่ i ดังนั้น $i \in \{0, \dots, D-1\}$ อัลกอริทึมเริ่มต้นด้วยการเติมข้อมูลอินพุตรอบ ขอบมิติ D จากนั้นข้อมูลที่เฉพาะจะถูกทำให้เป็นเคอร์เนล หรือแบ่งออกเป็นเคอร์เนลเรียงเส้นตรงที่อยู่ติดกันด้วยมิติ D และขนาด $2a$ โดย ตาม

มิติ ที่ i th กำหนดโดยผู้ใช้ ต่อไป ในแต่ละเคอร์เนล เราจะแยกคำนวณและคลิป์ความเข้มของฮิสโตแกรม และรับค่า CDF ที่ปรับให้เป็นมาตรฐาน การกำหนดที่ความเข้มที่แต่ละฟังก์ชัน D-มิติคำนวณโดยการแทรกสอดแบบหลายเส้นของความเข้มที่แปลงระหว่าง CDF ที่ทำให้เป็นมาตรฐานในเคอร์เนลเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดของฟังก์ชัน สุดท้าย ข้อมูลเอาต์พุตที่ปรับปรุงคอนทราสต์จะถูกสร้างขึ้นโดยการแปลงความเข้มกับทุกฟังก์ชันในข้อมูลอินพุต

อัลกอริทึม 1 การกำหนดอัลกอริทึม MCLAHE ในรหัสเทียม ที่นี่ // หมายถึงโอเปอเรชันหารจำนวนเต็ม cdf ฟังก์ชันการกระจายสะสม และแมปการแมปความเข้มที่ใช้กับฟังก์ชันมิติสูง

อินพุต: ข้อมูลใน a
พารามิเตอร์: ขนาดเคอร์เนล (อาร์เรย์ของจำนวนเต็มสำหรับขนาดเคอร์เนลทั้งหมด), clip limit (ค่าเกณฑ์ใน $[0, 1]$ สำหรับการตัดฮิสโตแกรมในเครื่อง), n bins (จำนวนของช่องในฮิสโตแกรมในเครื่อง)

เอาต์พุต: data out 1:
 $pad\ len \equiv 2 \cdot \text{ขนาดเคอร์เนล} - 1 + ((\text{shape}(\text{data in}) - 1) \bmod \text{kernel size})$
2: data hist = สมมาตร padding(data in, [pad len // 2, (pad len + 1) // 2])
3: b list = แยก data hist ออกเป็นเมสิดขนาด kernel.size 4: สำหรับแต่ละ b ใน b list ทำ 5: h = histogram(b, n bins)

6: กระจายน้ำหนักในชั่วโมงเหนือขีดจำกัดคลิปต่างๆ กันตลอดช่วง 7: cdf b = cdf(h)
8: map[b] = (cdf b - min(cdf b)) / (max(cdf b) - min(cdf b)) 9: จบ
ด้วย 10: สำหรับแต่ละ เคอร์เนลข้างเคียง ทำสำหรับแต่ละ ฟังก์ชัน p ในข้อมูลในการ ทำ
11: $u = \text{map}[b]$ ในเคอร์เนลข้างเคียงของ p(p) สำหรับ $d = 0 \dots D-1$ do $u \equiv u \cdot$
(ค่าสัมประสิทธิ์ของเคอร์เนลข้างเคียงในมิติ d) สิ้นสุดสำหรับ กำหนด n ให้กับฟังก์ชัน p ในข้อมูลออก

12:

13:14:

15:

16:17: สิ้นสุดสำหรับ 18:

สิ้นสุดสำหรับ 19: ส่งคืน

ข้อมูลออก

ข. การเติมหลายมิติ

เนื่องจากมาตราส่วนแบบเอกซโพเนนเชียลของขอบเขตที่ต่างกันเป็น 3 เราจึงใช้การเติมหลายมิติเพื่อหลีกเลี่ยงการบิดเบือนของระบบแบ่งเขตและทำให้แน่ใจว่าข้อมูลสามารถแบ่งออกเป็นจำนวนเต็มทวีคูณของขนาดเคอร์เนลที่ผู้ใช้กำหนด แผนรองประกอบด้วยสองส่วน เราจะหารือเกี่ยวกับกรณีของ มิติ D และแสดงตัวอย่างสำหรับ $D = 2$ ในรูปที่ 2 ประการแรก เราต้องการให้ฮิสโตแกรมความเข้มของแต่ละเคอร์เนลถูกคำนวณด้วยจำนวน ฟังก์ชันมิติมิติเท่ากัน ดังนั้นขนาดของข้อมูลที่เสริมควรเป็นจำนวนเต็มทวีคูณของขนาดเคอร์เนล สำหรับแต่ละมิติ ถ้า s_i ไม่ใช่จำนวนเต็มทวีคูณ

ของ b_i จำเป็น ต้องมีการเติมของ $b_i \square (s_i \bmod b_i)$ ในการรับกรณีเมื่อ $s_i \bmod b_i \square 0$ เราเพิ่มการเลื่อนเป็น $\square 1$ ให้กับนิพจน์ ดังนั้น การเติมที่จำเป็นตามมิตที่ i ของเคอร์เนลเพื่อให้ขนาดข้อมูลหารด้วยขนาดเคอร์เนลคือ $b_i \square 1 \square ((s_i \square 1) \bmod b_i)$ ประการที่สอง เรากำหนดให้ทุก พิกเซล D-มิติในข้อมูลต้นฉบับมีจำนวนเมล็ดข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดเท่ากัน โดยที่พิกเซลที่เส้นขอบไม่จำเป็นต้องได้รับการดูแลเป็นพิเศษในขั้นตอนการแก้ไข ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องเสริมด้วยขนาดเคอร์เนล b_i ตาม มิตที่ i เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดทั้งสอง ความยาวการเติมทั้งหมดตาม มิตที่ i , p_i คือ

$$p_i = 2b_i \square 1 \square ((s_i \square 1) \bmod b_i) \quad (1)$$

ความยาวนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน p_{i0} และ p_{i1} และแนบกับจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแต่ละมิติ ตามลำดับ

$$\begin{aligned} p_{i0} &= p_i // 2, \\ p_{i1} &= (p_i + 1) // 2 \end{aligned} \quad (2)$$

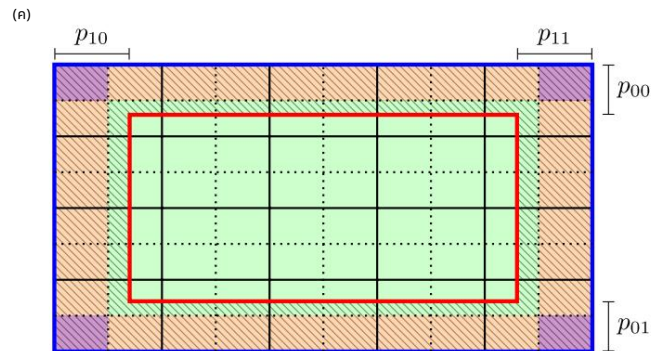
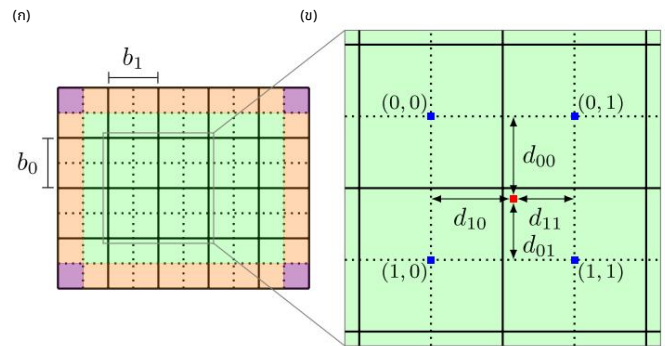
ที่นี้ เครื่องหมาย $//$ หมายถึงการหารจำนวนเต็ม เพื่อให้การกระจายความเข้มเฉพาะที่ขอบของภาพไม่เปลี่ยนแปลง การเติมจะดำเนินการโดยการสะท้อนความเข้มตามขอบเขตของข้อมูล (การเติมแบบสมมาตร) ขั้นตอนการเติมอธิบายไว้ในบรรทัดที่ 1-2 ในอัลกอริทึม 1

ค. การแก้ไขหลายมิติ

เพื่อให้ได้นิพจน์ทั่วไปสำหรับการแมปความเข้มในมิติตามอำเภอใจ เราเริ่มต้นด้วยตัวอย่างใน 2D CLAHE ซึ่งแต่ละความเข้มของพิกเซล In (n เป็นดัชนีพิกเซล) จะถูกแปลงโดยการประมาณค่าแบบทวิแยร์ของความเข้มที่แมปซึ่งได้รับจาก CDF ที่ทำให้เป็นมาตรฐานของ เมล็ดเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด [4; 5]. เราแนะนำดัชนีเคอร์เนล $i = (i_0, i_1) \square \{0, 1\}$ ตัวอักษร nary $\{0, 1\}$ แทนทั้งสองด้าน (เช่น ด้านบนและด้านล่าง) ตามลำดับ ในมิติที่หารด้วยพิกเซลในการพิจารณา สำหรับกรณี 2 มิติ ดัชนี (i_0, i_1) สามารถรับค่าได้เพียง $\{0, 1\}$, $(0, 1)$, $(1, 0)$ และ $(1, 1)$ ดังแสดงในรูปที่ 2(b). ให้ m_i เป็นการแมปความเข้มที่ได้จากเคอร์เนลด้วยดัชนี i แล้ว

$$\text{โมส(เข้า)} = \text{CDF พน(เข้า)}, \quad (3)$$

โดยที่ CDF i แสดงถึง CDF ที่ทำให้เป็นมาตรฐานซึ่งได้รับจากฮิสโตแกรมที่ถูกตัดของเคอร์เนลด้วยดัชนี i ดังที่แสดงในรูปที่ 2(b) การประมาณค่า bilinear สำหรับพิกเซลที่อยู่ในการพิจารณา ซึ่งอยู่ที่เครื่องหมายสี่เหลี่ยมสีแดงนั้นถูกคำนวณโดยใช้เมล็ดข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดสี่อันที่อยู่ทั้งกลางเครื่องหมายสี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน ค่าสัมประสิทธิ์การแก้ไข c_i จะแสดงเป็นพหุนาม Lagrange [36; 35] โดยใช้ขนาดเคอร์เนล (b_0, b_1) และระยะทาง $(d_{00}, d_{01}, d_{10}, d_{11})$ ทั่วทุก พิกเซลและเคอร์เนลตรงกลางในสองมิติ



รูปที่ 2: ภาพประกอบของแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึม MCLAHE ในรูปแบบ 2 มิติ ใน (a)-(c) ภาพจะถูกแบ่งส่วนออกเป็นเมล็ดขนาด (b_0, b_1) ซึ่ง ล้อมรอบด้วยเส้นทึบสีดำ เส้นประสีดำนกมีพิกเซลซึ่งมีเมล็ดข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดเหมือนกัน รหัสสีใช้เพื่อระบุประเภทของพื้นที่ชายแดน โดยพื้นที่สีเขียว สีส้ม และสีม่วงแดงจะมีเมล็ดเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดสี่ สาม และสองเมล็ดตามลำดับ (a) ข้อมูลภาพต้นฉบับในแบบ 2 มิติที่แบ่งออกเป็นเมล็ด (b) พื้นที่ขอบของ (a) เครื่องหมายสี่เหลี่ยมสีแดงใน (b) แสดงถึงพิกเซลที่กำลังพิจารณา และเครื่องหมายสี่เหลี่ยมสีน้ำเงินแสดงถึงศูนย์กลางเคอร์เนลที่ใกล้ที่สุดถัดจากสีแดง

ระยะห่างระหว่างพิกเซลสีแดงและศูนย์เคอร์เนลเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดจะมีป้ายกำกับเป็น $d_{00}, d_{01}, d_{10}, d_{11}$ ตามลำดับ (c) รูปภาพที่เสริมด้วยภาพต้นฉบับตอนนี้ล้อมรอบด้วยเส้นทึบสีแดงและช่องว่างภายในที่ระบุโดยการแก้ไข ความยาวการเติมใน 2D มีป้ายกำกับเป็น $p_{00}, p_{01}, p_{10}, p_{11}$ ใน (c) และค่าจะคำนวณโดยใช้สมการ (2).

ไข่ออน

$$c_{00} = \frac{(b_0 \square d_{00})(b_1 \square d_{10}) b_0 b_1}{(b_0 \square d_{00})(b_1 \square d_{10}) b_0 b_1}, \quad (4)$$

$$c_{01} = \frac{d_{11} b_0 b_1 (b_0 \square d_{01})(b_1 \square d_{10})}{d_{10} b_0 b_1 (b_0 \square d_{01})(b_1 \square d_{10})}, \quad (5)$$

$$c_{10} = \frac{d_{01}(b_1 \square d_{11}) b_0 b_1}{d_{01}(b_1 \square d_{11}) b_0 b_1}, \quad (6)$$

$$c_{11} = \frac{d_{11}(b_1 \square d_{11}) b_0 b_1}{d_{11}(b_1 \square d_{11}) b_0 b_1}. \quad (7)$$

ความเข้มที่เปลี่ยน \tilde{In} จาก In กำหนดโดย

$$\tilde{\text{เข้า}} = c_{00}m_{00}(\text{เข้า}) + c_{01}m_{01}(\text{เข้า}) + c_{10}m_{10}(\text{เข้า}) + c_{11}m_{11}(\text{เข้า})$$

(8)

เท่ากับ (4)-(7) และ (8) สามารถเขียนใหม่ในรูปแบบกะทัดรัดโดยใช้ดัชนีเคอร์เนลที่ i แทน i ไปก่อนหน้านี้

$$\tilde{u}_i = \sum_{j \in \{0,1\}^2} c_{ij} u_j, \quad (9)$$

$$c_{ij} = \frac{b_j - d_{ij}}{d_j}, \quad (10)$$

ในกรณี 2 มิติ คำว่า d_{ij} จะแทนค่า d_{i0} หรือ d_{i1} ทางเลือกของ $i0$ และ $i1$ จากอักขระไบนารี $\{0, 1\}$ ใน d_{ij} ตามหลังดัชนีเคอร์เนล i คุณสมบัติพิเศษของการแปลงพิกเซลเส้นขอบในภาพจะได้รับการแก้ไขโดยธรรมชาติในกรณีของเราหลังจากการเติมข้อมูล (ดูส่วน III.B)

ในมิติ D ดัชนีเคอร์เนล $i = (i_0, i_1, \dots, i_{D-1}) \in \{0, 1\}^D$ คล้ายกับกรณีสองมิติที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ การแมปความเข้มของพิกเซลมิติ D แต่ละพิกเซลคือ c_i ตอนนี้คำนวณโดยการแก้ไขแบบหลายเส้นระหว่างเมล็ดเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด 2 เมล็ด v ในทุกมิติ ในทางคณิตศาสตร์

$$\tilde{u}_i = c_{i0} \dots u_{00} \dots u_{00} + c_{i1} \dots u_{10} \dots u_{10} + \dots + c_{i1} \dots u_{11} \dots u_{11} + c_{i1} \dots u_{11} \dots u_{11} + \dots \quad (11)$$

ในทำนองเดียวกันสมการ (11) และมีพจน์ที่เกี่ยวข้องสำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแก้ไขที่สามารถเขียนในรูปแบบกะทัดรัดโดยใช้ดัชนีเคอร์เนล i เป็น

$$\tilde{u}_i = \sum_{j \in \{0,1\}^D} c_{ij} u_j, \quad (12)$$

$$c_{ij} = \frac{b_j - d_{ij}}{d_j}, \quad (13)$$

พิธีการที่แนะนำสำหรับกรณี 2 มิติในสมการ (8)-(10) สรุปลงเป็นมิติโดยพลการ โดยมีเพียงการอัปเดตดัชนีเคอร์เนล i . ในอัลกอริทึม 1 การคำนวณการแมปความเข้มผ่านการแก้ไขอธิบายไว้ในบรรทัดที่ 12-15

D. ช่วงฮิสโตแกรมที่ปรับได้

ในสูตรดั้งเดิมของ CLAHE ในแบบ 2 มิติ [4; 5] ช่วงฮิสโตแกรมเฉพาะที่สำหรับเมล็ดทั้งหมดจะเหมือนกัน ซึ่งทำงานได้ดีเมื่อเมล็ดมีความเข้มในช่วงกว้างที่ใกล้เคียงกัน การปรับแต่งการแลกเปลี่ยนระหว่างการขยายสัญญาณรบกวนและการปรับปรุงสัญญาณทำได้โดยการเลือกขนาดของเคอร์เนลและขีดจำกัดของคลิป [31] อย่างไรก็ตาม หากแพตช์ต่างๆ ของข้อมูลรูปภาพมีฟีเจอร์เฉพาะที่ภายใน ช่วงความเข้มต่างกันมากแต่แคบ แพตช์เหล่านั้นอาจสะสมอยู่ในฮิสโตแกรมจำนวนน้อยมากที่มีค่าที่ระบุโดยรวม การคำนึงถึงความแตกต่างใน CLAHE จะต้องใช้ขีดจำกัดของคลิปที่สูงเพื่อปรับปรุง ดังนั้นจึงมาพร้อมกับราคาของการขยายสัญญาณรบกวนในหลายส่วนของข้อมูล ปัญหานี้อาจแก้ไขได้ด้วยการเลือกช่วงฮิสโตแกรมเฉพาะที่เพื่อให้อยู่ภายในค่าความเข้มต่ำสุดและสูงสุดของเคอร์เนล ในขณะที่รักษาจำนวนของช่องเก็บค่าเดิมสำหรับเมล็ดทั้งหมด ตัวอย่างกรณีการใช้งานของ AHR แสดงอยู่ในส่วนที่ IV.A.

IV. แอปพลิเคชัน

ตอนนี้เราใช้อัลกอริทึม MCLAHE กับสองกรณีในวิทยาศาสตร์ธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับข้อมูล 4 มิติ (3 มิติ+เวลา) ที่สุ่มตัวอย่างหนาแน่นจำนวนมาก แต่ละตัวอย่างประกอบด้วยการแนะนำสั้นๆ เกี่ยวกับความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับประเภทของการวัด คุณสมบัติข้อมูลรูปภาพที่เป็นผลลัพธ์ และแรงจูงใจในการใช้การปรับปรุงคอนทราสต์ ตามด้วยการอภิปรายและการเปรียบเทียบผลลัพธ์โดยใช้ MCLAHE รายละเอียดต่อ formance ระบุไว้ที่ส่วนท้ายของแต่ละตัวอย่าง

น. สเปกโทรสโกปีแบบโพโตมิชัน

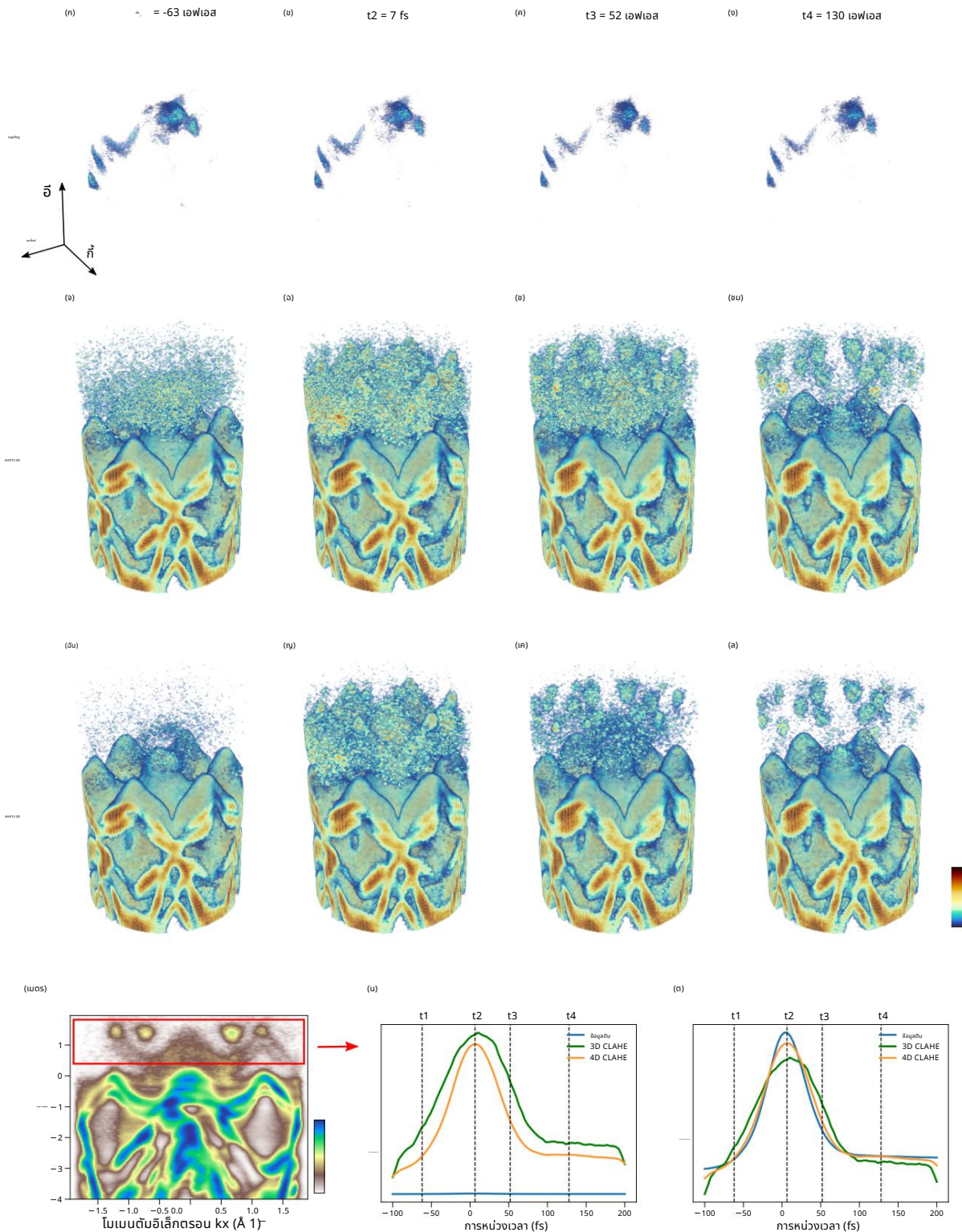
ข้อมูลพื้นฐาน. ในสเปกโทรสโกปีแบบโพโตมิชัน เครื่องตรวจจับจะลงทะเบียนอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยโดยพัลส์ UV หรือ X-ray สุนัขวิทยาศาสตร์เข็มนาฬิกาตัวอย่างวัสดุที่เป็นของแข็ง [20] การวัดจะดำเนินการในพื้นที่ที่เรียกว่าโมเมนต์ 3 มิติ ซึ่งครอบคลุมด้วยพิกัด (k_x, k_y, E) โดยที่ k_x, k_y คือโมเมนต์ของอิเล็กตรอน และ E คือพลังงาน

อิเล็กตรอนที่ตรวจพบก่อให้เกิดรูปแบบที่มีข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายความหนาแน่นทางอิเล็กทรอนิกส์แบบแอนไอโซทรอปิกภายในวัสดุ มิติที่สี่ในสเปกโทรสโกปีของโพโตมิชันขึ้นที่แก้ไขด้วยเวลาแสดงถึงเวลารอคอยในการเฝ้าสังเกตการณ์ โดยการปล่อยแสง เนื่องจากระบบอิเล็กทรอนิกส์อยู่ภายใต้การรบกวนจากภายนอก (เช่น การกระตุ้นด้วยแสง)

กรอบเวลาเชิงลบแสดงถึงการสังเกตที่เกิดขึ้นก่อนการกระตุ้นเล็กน้อย ในข้อมูลภาพที่ได้มาจากโพโตมิชันสเปกโทรสโกปี การมอดูเลตความเข้มที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันจากรูปร่างเรขาคณิตทดลอง การโต้ตอบของสสารแสง [37] และพื้นหลังที่กระจัดกระจายจะสร้างความแตกต่างของคอนทราสต์ภายในและระหว่างแถบพลังงานที่เรียกว่าแถบพลังงาน ซึ่งแสดงออกเป็นเส้นโค้งที่ตัดกัน (ในแบบ 2 มิติ) หรือพื้นผิว (ในแบบ 3 มิติ) เบลอโดยการบิดด้วยฟังก์ชันการตอบสนองของเครื่องมือ และได้รับผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ เช่น คุณภาพของตัวอย่างและความเป็นมิติของระบบอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น [20] การแสดงภาพและการแบ่งเขตของลักษณะภาพที่เหมือนวงดนตรีมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจการกระจายโมเมนต์-อวกาศ อิเล็กทรอนิกส์ และไดนามิกในสเปกโทรสโกปีของโพโตมิชันแบบหลายมิติ [17] อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากข้อจำกัดทางกายภาพของความไม่สม่ำเสมอของคอนทราสต์ที่ระบุไว้ก่อนหน้านี้แล้ว ความแตกต่างของความเข้มระหว่างแถบความถี่ต่ำ (หรือแถบเวเลนซ์) และแถบด้านบน (หรือแถบการนำไฟฟ้า) ในระดับพลังงานจะอยู่ที่ลำดับที่ 100 หรือสูงกว่าและแตกต่างกันไป โดยวัสดุภายใต้การศึกษาและสภาวะกระตุ้นแสง เพื่อปรับปรุงคอนทราสต์ของภาพในหลายมิติ เราใช้ MCLAHE กับชุดข้อมูล 4 มิติ (3 มิติ+เวลา) ที่วัดสำหรับไดนามิกทางอิเล็กทรอนิกส์ที่แก้ไขตามเวลาและโมเมนต์ของทั้งสเปกตรัมเชเลนโด (WSe2) ซึ่ง เป็นวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ที่มีแถบอิเล็กทรอนิกส์กระจายตัวสูง [38].

ข้อมูล 4 มิติได้มาจากการตั้งค่าการทดลองที่มีอยู่ [39] และประมวลผลโดยใช้ไปป์ไลน์แบบกำหนดเอง [40; 41] จากเหตุการณ์โพโตอิเล็กตรอนเดี่ยวที่ตรวจพบ สำหรับการเปรียบเทียบการปรับปรุงคอนทราสต์ เราใช้ทั้ง 3D และ 4D CLAHE กับข้อมูล 4D photoemission spectroscopy ในกรณีของ 3D CLAHE อัลกอริทึมถูกนำไปใช้กับข้อมูล 3 มิติในแต่ละกรอบเวลาแยกกัน

ผลลัพธ์และการอภิปราย ภาพนิ่งจากข้อมูลดิบและผลลัพธ์จะถูกเปรียบเทียบในรูปแบบที่ 3 พร้อมกันก่อน



รูปที่ 3: การประยุกต์ใช้ MCLAE กับข้อมูลสเปกโทรสโกปีการปล่อยแสงแบบ 4 มิติ (3 มิติ+เวลา) ซึ่งมีการวัดการชั่วคราวของโครงสร้างวงดนตรีอิเล็กทรอนิกส์ของเซมิคอนดักเตอร์ WSe₂ ในระหว่างและหลังการกระตุ้นด้วยแสง (ดูหัวข้อ IV.A) ขั้นตอนเวลาสี่ขั้นตอนในอนุกรมเวลา 4 มิติถูกเลือกสำหรับการแสดงภาพ รวมถึงข้อมูลดิบใน (a)-(d) ข้อมูลที่ประมวลผล 3D CLAHE ใน (e)-(h) และข้อมูลที่ประมวลผล 4D CLAHE ใน (i)-(l). การตั้งค่าช่วงฮิสโทแกรมแบบปรับได้ (AHR) ในอัลกอริทึม MCLAE ถูกรวมอยู่ในการประมวลผลข้อมูล ภาพ 3D เรนเดอร์ทั้งหมดใน (a)-(l) ใช้สเกลสีเดียวกันกับที่แสดงใน (i) โดนามิกแบบรวมใน (n)-(o) เหนือพื้นที่ที่ระบุโดยช่องใน (m) เหนือพื้นที่โมเมนต์ 3 มิติแสดงให้เห็นว่า 4D CLAHE ขยายสัญญาณรบกวนน้อยลงในขณะที่รักษาระดับเวลาไดนามิกได้ดีกว่า 3D CLAHE เมื่อเปรียบเทียบกับ ข้อมูลเดิม

เมตริก trast ที่คำนวณและแสดงรายการในตารางที่ 1 โฟล์เสริมประกอบด้วยวิดีโอ 1-3 และวิดีโอ 4 สำหรับการเปรียบเทียบข้อมูลที่ยังไม่ได้ประมวลผลและประมวลผลที่แสดงผลในส่วน 2D และ 3D ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 3(a)-(d) ข้อมูลสเปกโทรสโกปีการปล่อยโฟโตมิขึ้นตั้งแต่นั้น vi sualized ได้ไม่ดีในระดับพลังงานที่ครอบคลุมทั้งแถบ val ence (ล่าง) และ conduction (บน) สถานการณ์ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นมากในข้อมูลที่ประมวลผลโดย MCLAHE ด้วยการตั้งค่า AHR ที่แสดงในรูปที่ 3(e)-(l) ซึ่งไดนามิกของประชากรในแถบการนำไฟฟ้าของ WSe₂ [42; 43] และแถบเวเลนซ์ที่กว้างขึ้นนั้นสามารถมองเห็นได้เพียงพอที่จะวางในระดับเดียวกัน ทำให้สามารถระบุและเชื่อมโยงคุณลักษณะที่ดีของไดนามิกของโมเมนตัมและปริภูมิได้ การปรับปรุงความคมชัดยังสะท้อนให้เห็นในเชิงปริมาณในตารางที่ 1 ในการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน [32] ระหว่างข้อมูลที่ไม่ได้รับการปรับแต่ง (ปรับให้เรียบ) และข้อมูลที่ผ่านการประมวลผล ในทางกลับกัน การตั้งค่า GHR ของ MCLAHE ไม่สามารถแสดงภาพแถบด้านบนได้ดี (ดูการเปรียบเทียบในวิดีโอเสริม 1-3) เนื่องจากแถบด้านล่างและแถบบนมีคุณสมบัติความเข้มที่แตกต่างกันอย่างมาก ต่อไป เราจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง 3D และ 4D CLAHE ภายใต้การตั้งค่า AHR การลดลงของ MSE (0.1121 ± 0.1050) หรือเทียบเท่าคือการเพิ่มขึ้นของ PSNR (147.98 ± 148.26) ที่แสดงในตารางที่ 1 บ่งชี้ว่า 4D CLAHE เหมาะสมกว่าที่นี่ เนื่องจาก MSE ที่ลดลงแสดงถึงความคล้ายคลึงที่ใกล้ชิดกับข้อมูลต้นฉบับมากขึ้น [31] Fur thermore การตรวจสอบด้วยสายตาของผลลัพธ์ในรูปที่ 3(e)-(l) และวิดีโอเสริม 1-4 พบว่ามีสัญญาณรบกวนที่รุนแรงน้อยกว่าเมื่อใช้ 4D CLAHE กับชุดข้อมูลทั้งหมดมากกว่า 3D CLAHE ในแต่ละกรอบเวลา

ตารางที่ 1: เมตริกความคมชัดสำหรับข้อมูลสเปกโทรสโกปีการปล่อยแสง

Dataset	MSE	PSNR	STD	ENT	Raw	0.0667	2.294	Smoothed
0.0015	166.63	0.0938	2.615	3D CLAHE (GHR)	0.0429	152.048	4D CLAHE (GHR)	0.0428
0.0015	166.63	0.0938	2.615	3D CLAHE (AHR)	0.0428	152.048	4D CLAHE (AHR)	0.1050
0.0015	166.63	0.0938	2.615	3D CLAHE (AHR)	0.0428	152.048	4D CLAHE (AHR)	0.1050

MSE: หมายถึงข้อผิดพลาดกำลังสอง PSNR: อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงสุด STD: ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ENT: เอนโทรปีของแซนบอน

ในการหาปริมาณอิทธิพลของการเพิ่มคอนทราสต์ที่มีต่อคุณสมบัติไดนามิกในข้อมูล เราคำนวณความเข้มของ inte grated ในแถบการนำไฟฟ้าของข้อมูลในทั้งสามกรณี และสรุปผลลัพธ์ไว้ในรูปที่ 3(m)-(o) คะแนนมาตรฐานในรูปที่ 3(o) ใช้เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณรวมในรูปแบบที่ไม่ขึ้นกับขนาด ไดนามิกที่แสดงในการเปลี่ยนแปลงความเข้มจะได้รับการเก็บรักษาไว้ใน 4D ตีกว่าข้อมูลที่ประมวลผลด้วย 3D CLAHE และสำหรับ mer นั้นได้รับอิทธิพลน้อยกว่าจากสิ่งประดิษฐ์ของขอบเขตในจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของช่วงการช่วงเวลา ความสำคัญของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นโดย 3D CLAHE ในการเริ่มต้นและการกู่คืนของการเปลี่ยนแปลง ประมาณ t1 และ t3 ในรูปที่ 3(o) แสดงให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นในวิดีโอเสริม 1-4 ข้อสังเกตเหล่านี้ช่วยเสริมข้อโต้แย้งที่ว่า 4D

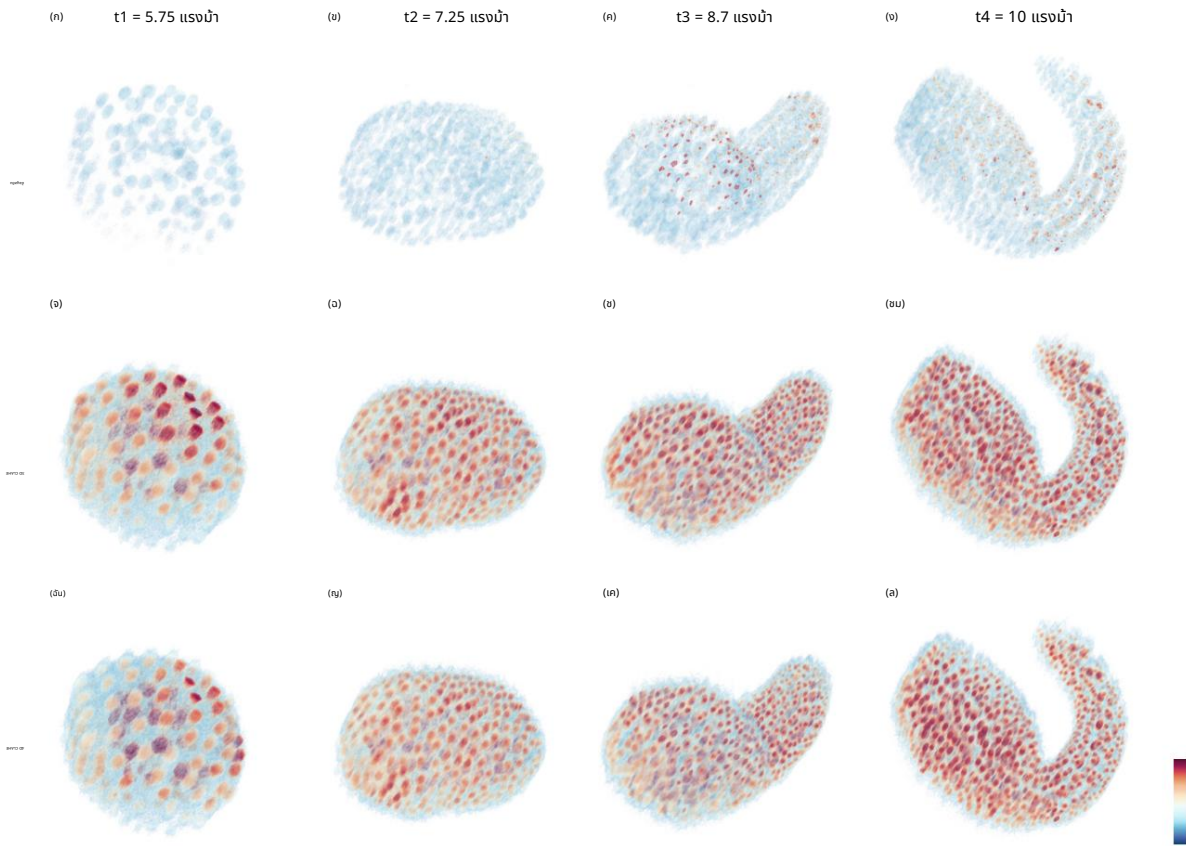
CLAHE เหนือกว่า 3D โดยรวมในเนื้อหาที่รักษาการปรับปรุงคอนทราสต์

รายละเอียดการประมวลผล ข้อมูล troscopy 4D photoemission spec แบบ raw มีขนาด 180×180×300×80 ในขนาด (kx, ky, E, t) พวกมันถูกแยกสัญญาณครั้งแรกโดยใช้ตัวกรองแบบเกาส์เซียนโดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.7, 0.9 และ 1.3 ตามมิติของโมเมนตา พลังงาน และเวลา ตามลำดับ ในการใช้งานทั้ง 3D และ 4D CLAHE เราตั้งค่าขีดจำกัดของคลิปที่ 0.02 และกำหนด 256 ถึงขยระดับสีเทาให้กับฮิสโตแกรมในเครื่องขนาดเครื่องสำหรับ 4D CLAHE คือ (30, 30, 15, 20) และสำหรับ 3D CLAHE จะใช้ขนาดเครื่องเดียวกันสำหรับสามมิติแรก หรือ (kx, ky, E) การตั้งค่าทั้ง GHR และ AHR ได้รับการทดสอบสำหรับการเปรียบเทียบเปรียบเทียบ การประมวลผลทำงานบนเซิร์ฟเวอร์ที่มี 64 Intel Xeon CPUs ที่ 2.3 GHz และ 254GB RAM รับโทรมรวมในการรวมการดำเนินการคัดลอกหน่วยความจำ สำหรับการประมวลผลชุดข้อมูลทั้งหมดด้วย 4D CLAHE คือประมาณ 5.3 นาที นอกจากนี้ เรายังเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ 4D CLAHE บน GPU (NVIDIA GeForce GTX 1070, 8GB RAM) ของเซิร์ฟเวอร์โดยใช้กรอบเวลา 25 แรกของชุดข้อมูล รับโทรมทั้งหมดคือ 34 วินาทีเมื่อใช้ GPU เทียบกับ 104 วินาทีที่ไม่มี GPU ซึ่งคิดเป็น 3.1 เท่าของความเร็วที่เพิ่มขึ้น

ข. กล้องจุลทรรศน์เรืองแสง

ข้อมูลพื้นฐาน. ในกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์แบบ 4 มิติ การวัดจะดำเนินการในพิกัดคาร์ทีเซียนของกรอบห้องปฏิบัติการ หรือ (x, y, z) โดยมีมิติที่สี่แสดงถึงเวลาการสังเกต t นับตั้งแต่เกิดการปฏิสนธิ ในทางปฏิบัติ โพโตโฟธิสของฟลูออโรฟอร์ [44] พื้นหลังออโตฟลูออเรสเซนซ์ [21] จากส่วน la beled และ unlabeled ของตัวอย่าง และวิธีการตรวจจัน เช่น ผลการลดทอนจากการสแกนการวัดค่าที่ระดับความลึกต่างๆ หรือการส่องสว่างที่ไม่สม่ำเสมอของฟลูออโรฟอร์ [45] ก่อให้เกิดขีดจำกัดของคอนทราสต์ของภาพที่ทำได้ในการทดสอบ ลักษณะเด่นของภาพในข้อมูลกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์มักประกอบด้วยเซลล์และส่วนประกอบของเซลล์ที่ติดลากอย่างเบาบาง เช่น นิวเคลียส เยื่อหุ้มเซลล์ โครงสร้างเดนไดรต์ และออร์แกเนลล์อื่นๆ คอนทราสต์ที่จำกัดอาจทำให้งานค่าอธิบายประกอบข้อมูลดาวนัสตรัม เช่น การแบ่งกลุ่ม การติดตาม และการติดตามสายเลือด [46; 47], ทำกาย. ดังนั้น วิธีการปรับปรุงคอนทราสต์แบบดิจิทัลอาจมีประโยชน์ในการปรับปรุงการมองเห็นของเซลล์และไดนามิกที่สอดคล้องกัน เราสธิตการใช้ MCLAHE เพื่อจุดประสงค์นี้ในชุดข้อมูลกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์แบบ 4 มิติ (3 มิติ+เวลา) ที่เปิดเผยต่อสาธารณะ [22] ของการพัฒนาตัวอ่อนของแอสซีเดียน (Phallusia mamillata) หรือหมวดทะเล สิ่งมีชีวิตถูกย้อมและถ่ายภาพใน toto เพื่อเปิดเผยการพัฒนาจากกระเพาะอาหารไปจนถึงการก่อตัวของหางด้วยความละเอียดระดับเซลล์ [22] ในระหว่างการพัฒนาของเอ็มบริโอ คอนทราสต์ของแสงเรืองแสงจะแสดงการขึ้นต่อกันของเวลาเนื่องจากกระบวนการของเซลล์ เช่น การแบ่งตัวและการแยกส่วน เราใช้ข้อมูลจากช่วงเวลาแสงเรืองแสงหนึ่งช่องที่มีนิวเคลียสและประมวลผลผ่านท่ MCLAHE

ผลลัพธ์และการอภิปราย ผลลัพธ์จะถูกเปรียบเทียบกับข้อมูลต้นฉบับในระดับเดียวกันในรูปที่ 4 และเมตริกคอนทราสต์ที่เกี่ยวข้องแสดงในตารางที่ 2 โฟล์เสริมประกอบด้วยวิดีโอ 5 และวิดีโอ 6 เพื่อเปรียบเทียบ



รูปที่ 4: การประยุกต์ใช้ข้อมูลกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ของ MCLAE กับ 4D (3D+time) ของการพัฒนาเอ็มบริโอของแอสซีเดียน (*Phallusia mammillata*) หรือ sea squirt สี่รอบเวลา (hpf = ชั่วโมงหลังการปฏิสนธิ) ในอนุกรมเวลา 4 มิติจะแสดงให้เห็นที่นี่เพื่อการเปรียบเทียบ รวมถึงข้อมูลดิบใน (a)-(d) ข้อมูลที่ประมวลผล 3D CLAHE ใน (e)-(h) และ ข้อมูลที่ประมวลผล 4D CLAHE ใน (i)-(l) ภาพทั้งหมดใน (a)-(l) แสดงผลในรูปแบบ 3 มิติโดยมีแกน การวางแนว และสเกลเดียวกันกับใน (l) ข้อมูลที่ประมวลผลทั้งแบบ 3D และ 4D CLAHE แสดงการปรับปรุงอย่างมากในด้านคอนทราสต์ของภาพ ในขณะที่ผลลัพธ์จาก 4D CLAHE จะรักษาคุณสมบัติความเข้มของโดนามิกจากกระบวนการระดับเซลล์ได้ดีกว่า

นำข้อมูลที่ยังไม่ได้ประมวลผลและประมวลผลเป็นชั้น 2D และ 3D ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 4(a)-(d) ความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นในข้อมูลกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ดิบนั้นกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอในระดับสี่ อนุกรมเวลา 4 มิติที่ประมวลผลโดย MCLAE แสดงการปรับปรุงที่สำคัญในการมองเห็นของเซลล์เทียบกับสัญญาณพื้นหลัง (เช่น การเรืองแสงอัตโนมัติ การนับจำนวนความมืดของเครื่องตรวจจับ ฯลฯ) สิ่งนี้สะท้อนให้เห็นในความแตกต่างที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงโดยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตามที่แสดงในตารางที่ 2 ตรงกันข้ามกับตัวอย่างก่อนหน้านี้ ตัวเลือก AHR ใน MCLAE ไม่ได้ใช้ในการประมวลผลชุดข้อมูลการพัฒนาของตัวอ่อนเนื่องจากขนาดคุณลักษณะของเซลล์และความเข้มของการเรืองแสงมีความคล้ายคลึงกัน ผ่านทางร่างกาย นอกจากนี้ ช่วงโดนามิกของข้อมูลยังมีจำกัด (ดูรายละเอียดการประมวลผลต่อไปนี้) และการเปลี่ยนแปลงของฟลูออเรสเซนซ์ระหว่างการพัฒนานั้นค่อนข้างน้อย ค่าเอนโทรปีของแผนตอนเริ่มต้นสูงของข้อมูลดิบในตารางที่ 2 เกิดจากสัญญาณรบกวนพื้นหลังที่สูง ซึ่งจะลดลงหลังจากการปรับให้เรียบ ดังที่ระบุโดยการลดลงอย่างรวดเร็วของเอนโทรปี ในขณะที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงความสอดคล้องสัมพันธ์ จากนั้น การใช้ MCLAE จะเพิ่มเอนโทรปี

อีกครั้งพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ในเมตริกอื่นๆ ครั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงคอนทราสต์ ในทำนองเดียวกันกับตัวอย่างก่อนหน้านี้ 4D CLAHE มีประสิทธิภาพเหนือกว่า 3D โดยรวมเนื่องจาก MSE ที่ต่ำกว่าหรือเทียบเท่ากับ PSNR ที่สูงกว่าของผลลัพธ์ 4D ซึ่งบ่งชี้ว่ามีความคล้ายคลึงกันสูงกว่ากับข้อมูลดิบ ในมาตรวัดคอนทราสต์อื่นๆ เช่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเอนโทรปีของแผนตอน ผลลัพธ์ 4 มิติและ 3 มิติมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งบ่งชี้ความซับซ้อนของการตัดสินใจคอนทราสต์ของภาพด้วยเมตริกเดียว การแสดงโดนามิกในรูปที่ 4(e)-(l) ยังแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ประมวลผลด้วย 4D CLAHE รักษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มของฟลูออเรสเซนซ์ได้มากกว่าส่วนเคาน์เตอร์ 3 มิติ ในขณะที่ยังคงความเปรียบต่างระหว่างเซลล์กับพื้นหลังในระดับสูง

การเปรียบเทียบที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นของข้อมูลที่ยังไม่ได้ประมวลผลและข้อมูลที่ประมวลผลจะแสดงอยู่ในวิดีโอเสริม 5-6 ข้อมูลการพัฒนาเอ็มบริโอที่ปรับปรุงคอนทราสต์อาจทำให้ติดตามเชื้อสายและพลวัตของเซลล์ได้ดีขึ้น [47; 48] ซึ่งมีความท้าทายเนื่องจากการติดตามการเรืองแสงที่เบาบาง

ตารางที่ 2: เมตริกความคมชัดสำหรับข้อมูลกล้องจุลทรรศน์เรืองแสง

ชุดข้อมูล	MSE($\times 10^3$) PSNR	STD	ENT	0.0316	1.1284	173.7
Raw	-	-	-	0.0265	0.5141	159.6
Smoothed 0.300 3D			0.1048	0.5262	160.9	0.0921
CLAHE 7.767 4D CLAHE			0.5241			
5.667						

รายละเอียดการประมวลผล ข้อมูลกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนต์ 4D มีขนาด 512×512×109×144 ใน ขนาด (x, y, z, t) พวกมันถูกแยกออกก่อนโดยตัวกรองมัลติสเกลที่มีขนาดเคอร์เนล (2, 2, 2, 1) ในการประยุกต์ใช้ 4D CLAHE ขนาดเคอร์เนลที่เลือกคือ (20, 20, 10, 25) และใช้ขนาดเคอร์เนลเดียวกันในสามมิติแรกสำหรับ 3D CLAHE เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบโดยตรงได้ สำหรับขั้นตอน MCLAHE ทั้งสอง ขั้นตอนจำกัดของคลื่นถูกตั้งไว้ที่ 0.25 และจำนวนของช่องเก็บฮิสโตแกรมที่ 256 ความเข้มในข้อมูลดิบถูกกำหนดเป็นจำนวนเต็ม 8 บิตที่ไม่ได้ลงนาม ซึ่งส่งผลให้มีค่าที่เป็นไปได้เพียง 256 ค่าเท่านั้น ดังนั้น จึงใช้การตั้งค่า GHR เท่านั้น เนื่องจากการตั้งค่า AHR จะส่งผลให้ถึงขีดขนาดเล็กลงกว่าความละเอียดของข้อมูล การประมวลผลด้วย MCLAHE ทำงานบนเซิร์ฟเวอร์เดียวกันกับข้อมูลสเปกโทรสโกปี การแผ่รังสีด้วยแสง (ดูหัวข้อ IV.A) รับโหม้ทั้งหมดสำหรับการประมวลผลชุดข้อมูลทั้งหมดโดยใช้ซีพียูเพียงอย่างเดียวนี้อาจประมาณ 26 นาที

คล้ายกับกรณีศึกษาการปล่อยแสง มีการติดตามความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ GPU รับโหม้ทั้งหมดสำหรับการประมวลผลเฟรมเวลา 8 เฟรมแรกของชุดข้อมูลคือ 32 วินาทีบน GPU เทียบกับ 85 วินาทีบน CPU เท่านั้น ซึ่งคิดเป็นความเร็วที่เพิ่มขึ้น 2.7 เท่า

V. มุมมอง

แม้ว่าเราได้นำเสนอแอปพลิเคชันของอัลกอริทึม MCLAHE กับชุดข้อมูลในโลกแห่งความจริงที่มีขนาดสูงสุดหลายทศวรรษ แต่ข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพหลักในปัจจุบันอยู่ที่การใช้หน่วยความจำ เนื่องจากข้อมูลจำเป็นต้องโหลดทั้งหมดลงใน RAM (ของ CPU หรือ GPU)) ซึ่งอาจเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับชุดข้อมูลการถ่ายภาพและสเปกโทรสโกปีขนาดใหญ่มากในระดับหลายเทราไบต์ที่มีให้ใช้งานอย่างแพร่หลาย [13] การปรับปรุงการใช้ฮาร์ดแวร์ในอนาคตรวมถึงการจัดการแบบกระจายของชุดข้อมูลที่เป็นก้อนๆ เพื่อให้สามารถดำเนินการบนทรัพยากรฮาร์ดแวร์ที่จำกัดได้ โดยการโหลดแต่ละครั้งจะเป็นเพียงส่วนย่อยของข้อมูลเท่านั้น นอกจากนี้จำนวนของเคอร์เนลเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดในปัจจุบันซึ่งจำเป็นสำหรับการแก้ไขการกำหนดที่ความเข้มเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณด้วยค่า dimensionality D ของข้อมูล (ดูส่วน III.C) สำหรับชุดข้อมูลที่มี $D < 10$ สิ่งนี้อาจไม่ก่อให้เกิดปัญหาที่โดดเด่น แต่สำหรับชุดข้อมูลที่มีมิติสูงขึ้น อาจมีการพัฒนากลยุทธ์ใหม่สำหรับการแก้ไขโดยประมาณของเคอร์เนลที่อยู่ใกล้เคียงที่เลือกไว้เพื่อลดการปรับขนาดแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

ในทางกลับกัน แอปพลิเคชันของ MCLAHE ไม่ได้ถูกจำกัดด้วยตัวอย่างที่ใหไว้ในงานนี้ แต่เปิดกว้างสำหรับข้อมูลประเภทอื่นๆ เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการประมวลผลล่วงหน้าของข้อมูลมิติสูงด้วยการสุ่มตัวอย่างหนาแน่นซึ่งผลิตโดยเทคนิคการถ่ายภาพและการถ่ายภาพเชิงปริมาตรอย่างรวดเร็วแบบต่างๆ [49; 50; 51; 52; 53] เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของงานการเพิ่มความคิดเห็นและการแยกคุณลักษณะ

นอกจากนี้การเรียกร้องให้มีการขยายโปรรูปภาพ

การเลือกใช้ชุดเครื่องมือใน 2D และ 3D ไปยังชุดข้อมูลการถ่ายภาพในมิติที่สูงขึ้นยังกระตุ้นการขยายมิติของขั้นตอน CE ล่าสุด เช่นใน [8; 54; 55] ซึ่งจะให้ทางเลือกที่กว้างขึ้นของอัลกอริทึมสำหรับการประมวลผลภาพหลายมิติและการเปรียบเทียบที่ครอบคลุมของประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในข้อมูลที่มีลักษณะต่างๆ

5.โอ. บทสรุป

เรานำเสนอการวางทั่วไปที่ยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพของอัลกอริทึม CLAHE ให้เป็นมิติตามอำเภอใจเพื่อเพิ่มความคมชัดของการถ่ายภาพหลายมิติที่ซับซ้อนและชุดข้อมูล spectroscopy อัลกอริทึมของเรา CLAHE หลายมิติ ปรับปรุงจากเลนส์เทียบเท่ามิติล่างก่อนหน้านี้ [4; 5; 19] โดยการจัดการขอบเขตภาพแบบรวม การเลือกขนาดเมล็ดที่ยืดหยุ่น การสิ้นสุดช่วงฮิสโตแกรมแบบปรับได้ การใช้งานแบบขนานใน Tensorflow ทำให้สามารถเร่งการประมวลผลด้วย CPU และ GPU หลายตัว เราแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ CLAHE แบบหลายมิติโดยการวิเคราะห์ด้วยภาพและปริมาณคอนทราสต์ในกรณีศึกษาที่มาจากเทคนิคเฉพาะด้านการวัดที่แตกต่างกัน ได้แก่ 4D (3D+time) photoemission spectroscopy และ 4D fluorescent microscopy พร้อมความสามารถในการผลิตข้อมูลมิติสูงที่มีการสุ่มตัวอย่างหนาแน่น . ในแอปพลิเคชันตัวอย่าง อัลกอริทึมของเราปรับปรุงและสร้างความสอดคล้องอย่างมากในการมองเห็นคุณลักษณะภาพหลายมิติในช่วงความเข้มและสภาพพื้นที่ใกล้เคียงที่หลากหลาย

นอกจากนี้ เรายังแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีที่สุดในแต่ละกรณีมาจากการประยุกต์ใช้ CLAHE แบบหลายมิติพร้อมกับกับมิติข้อมูลทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับการสังเกตสำหรับการใช้ CLAHE กับข้อมูล 3 มิติ [19] นอกจากนี้ เรายังมีการใช้งาน CLAHE แบบหลายมิติในโค้ดเบสแบบโอเพ่นซอร์สเพื่อช่วยนำกลับมาใช้ใหม่และบูรณาการเข้ากับขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพที่มีอยู่ในโดเมนต่างๆ ของวิทยาศาสตร์ธรรมชาติและวิศวกรรม

กิตติกรรมประกาศ

เราขอขอบคุณ S. Schulke, G. Schnapka ที่ GNZ (Gemein- sames Netzwerkzentrum) ในเบอร์ลิน และ M. Rampp ที่ MPCDF (Max Planck Computing and Data Facility) ใน Garching ที่ให้การสนับสนุนด้านคอมพิวเตอร์ ขอขอบคุณ S. Dong และ S. Beaulieu ที่ทำการวัดโฟโตมิชันสเปกโทรสโกปีในตัวอย่างกึ่งสแตนด์เซเลไนต์สถาบัน Fritz Haber V. Stimper ขอคุณ U. Gerland สำหรับการสนับสนุนด้านการดูแลระบบ งานนี้ได้รับเงินทุนจาก Max Planck Society รวมถึง BiGmax, เครือข่ายการวิจัยของ Max Planck Society เกี่ยวกับวิทยาศาสตร์วัสดุขนาดใหญ่ที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูล และเงินทุนจาก European Research Council (ERC) ภายใต้โครงการวิจัยและนวัตกรรม Horizon 2020 ของสหภาพยุโรป (ข้อตกลงการให้สิทธิ์เลขที่ ERC-2015- CoG-682843)

อ้างอิง

[1] B. Olshausen และ D. Field, “Vision and the coding of natural images,” American Scientist,

- ฉบับ 88 ไม่ 3 หน้า 238, 2543. [ออนไลน์]. ที่ มีอยู่: <http://www.americanscientist.org/issues/feature/2000/3/vision-and-the-coding-of-natural-images> [2] WK Pratt, Digital Image Processing, 4th ed. ไวลีย์ อินเทอร์เน็ตแอนด์, 2550.
- [3] EL Hall, “การกระจายเกือบสม่ำเสมอสำหรับการปรับปรุงภาพคอมพิวเตอร์” ธุรกรรม IEEE บนคอมพิวเตอร์, vol. ซี-23 หมายเลข 2 หน้า 207–208 ก.พ. 2517
- [4] SM Pizer, EP Amburn, JD Austin, R. Cromartie, A. Geselowitz, T. Greer, B. ter Haar Romeny, JB Zimmerman และ K. Zuiderveld, “การทำให้เท่าเทียมกันของฮิสโตแกรมแบบปรับได้และการเปลี่ยนแปลงของ มัน” คอมพิวเตอร์วิทัศน์ กราฟิก และการประมวลผลภาพ เล่มที่ 39 ไม่ 3, หน้า 355–368, 2530. [ออนไลน์]. <http://www.sciencedirect.com/S0734189X8780486X> [5] K. Zuiderveld, “การปรับแต่งฮิสโตแกรมแบบปรับความคมชัดที่จำกัด” ใน Graphics Gems เอลส์วีเยร์ 1994 หน้า 474–485 [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://linkinghub.Elsevier.com/retrieve/pii/B9780123361561500616> [6] MS Hitam, WNJHW Yussof, EA
- Awalludin และ Z. Bachok, “การผสมคอนทราสต์ที่จำกัดการปรับฮิสโตแกรมให้เท่าเทียมกันสำหรับการปรับปรุงภาพได้น้ำ” ในการประชุมนานาชาติเรื่องเทคโนโลยีการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ (ICCAT) ปี 2013
- IEEE, ม.ค. 2013, หน้า 1–5 [ออนไลน์]. ที่ มีอยู่: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6522017/> [7] ED Pisano, S. Zong, BM Hemminger, M. DeLuca, RE Johnston, K. Muller, MP Braeuning และ SM Pizer, “การประมวลผลภาพการปรับค่าฮิสโตแกรมแบบปรับคอนทราสต์ที่จำกัด เพื่อปรับปรุงการตรวจจบบริเวณที่ผิดปกติในแบบโมเดลแนบแน่น” Journal of Digital Imaging, vol. 11 ไม่ 4 หน้า 193 พ.ย. 2541. [ออนไลน์]. สามารถ ดูได้ที่: <https://doi.org/10.1007/BF03178082> J. Dabass, S. Arora, R. Vig และ M. Hanmandlu, “การปรับปรุงภาพแบบโมเดลโดยใช้ Entropy และ
- [8] CLAHE Based Intuitionistic Fuzzy Method” ในปี 2019 การประชุมนานาชาติครั้งที่ 6 เรื่อง การประมวลผลสัญญาณและเครือข่ายระบบ (SPIN) IEEE, ม.ค. 2019, หน้า 24–29. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8711696/> [9] MZ Yildiz, OF Boyraz, E. Guleryuz, A. Akgul และ I. Hussain, “วิธีการเข้ารหัสแบบใหม่สำหรับภาพหลอดเลือดดำมือหลังบน a โมเดลคอมพิวเตอร์” IEEE Access ฉบับที่ 7, หน้า 60 850–60 867, 2019. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8705292/> [10] J. Xiao, S. Li และ Q. Xu, “Video-Based Evidence Analysis and Extraction in Digital Forensic Investigation,” IEEE Access, vol. 7, หน้า 55 432–55 442, 2019. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8700194/> [11] K. Sim, Y. Tan, M. Lai, C. Tso และ W. Lim, “ลดการซารจกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยใช้เลขชี้กำลัง เทคนิคการยึดคอนทราสต์บนภาพหลังการประมวลผล” Journal of Microscopy, vol. 238,
- เลขที่. 1, pp. 44–56, เมษายน 2010. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน : <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2818.2009.03328.x> [12] A. McCollum และ W. Clocksin, “การปรับและแก้ไขฮิสโตแกรมหลายมิติ,” ในการประชุมนานาชาติครั้งที่ 14 เรื่องการวิเคราะห์ภาพและ การประมวลผล (ICIAIP 2007) IEEE, ก.ย. 2550, หน้า 659–664. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4362852/> [13] W. Ouyang และ C. Zimmer, “The imaging tsunami: Computational Opportunity and Challenges,” Current Opinion in Systems Biology, vol. 4, pp. 105–113, ส.ค. 2017. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452310017300537> [14] P. Pantazis และ W. Supatto, “ความก้าวหน้าในการถ่ายภาพเอ็มบริโอทั้งหมด: การเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณกำลังดำเนินอยู่” Nature Reviews Molecular Cell Biology, vol. 15 ไม่ 5, pp. 327–339, พฤษภาคม 2014. [ออนไลน์].
- มีจำหน่าย: <http://www.nature.com/articles/nrm3786> [15] L. Gao และ LV Wang, “A review of snapshot multidimensional optical imaging: Measuring photon tags in parallel,” Physics Reports, vol. 616, pp. 1–37, ก.พ. 2016. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0370157315005025> [16] O. Ersen, I. Florea, C. Hirlimann และ C. Pham Huu, “การสำรวจวัสดุนาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสามมิติ” Materials Today, vol. 18 ไม่ 7, pp. 395–408, ก.ย. 2558. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369702115001200> [17] G. Schönhense, K. Medjanik และ H.-J. Elmers, “การปล่อยภาพถ่ายที่แก้ไขโดยอวกาศ เวลา และการหมุน”
- วารสารสเปกโทรสโกปีอิเล็กตรอนและปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้อง ฉบับที่ 200 หน้า 94–118 เมษายน 2015
- [ออนไลน์]. ที่ มีอยู่: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0368204815001243> [18] JH Moore, CC Davis, MA Coplan และ SC
- เกรียร์, การสร้างเครื่องมือวิทยาศาสตร์, 4th ed. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแคมบริดจ์, 2552.
- [19] P. Amorim, T. Moraes, J. Silva และ H. Pedrini, “3D Adaptive Histogram Equalization Method for Medical Volumes,” ใน รายงานการประชุมประชุมนานาชาติครั้งที่ 13 เรื่อง Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory และ แอปพลิเคชัน 2018 หน้า 363–370 [ออนไลน์]. มีจำหน่าย: <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006615303630370> [20] S. Hufner, “Photoelectron Spectroscopy : Principles and Application, 3rd ed. สปริงเกอร์, 2546.
- [21] U. Kubitschek, Ed., Fluorescence Microscopy: From Principles to Biological Applications, 2nd ed. Weinheim เยอรมนี: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA พฤษภาคม 2017 [ออนไลน์] มีจำหน่าย: <http://doi.wiley.com/10.1002/9783527687732> [22] E. Faure, T. Savy, B. Rizzi, C. Melani, O. Stařov’a, Cunderl’ D. Fabr’eges, R. Spir, M. Hammons, Recher, B. Lombardot, L. Duloquin, I. Colin, R. řik, G.

J. Koll'ar, S. Desnoullez, P. Affaticati, B. Maury, A. Boyreau, J.-Y. Nief, P. Calvat, P. Vernier, M. Frain, G. Lutfalla, Y. Kergosien, P. Suret, M. Reme's'ikov'a, R. Doursat, A. Sarti, K. Mikula, N. Peyri 'Eeras และ P. Bourguine, "เวิร์กโฟลว์ในการประมวลผลภาพ 3D+time microscopy ของสิ่งมีชีวิตที่กำลังพัฒนาและสร้างสายเลือดของเซลล์ขึ้นมาใหม่" *Nature Communications*, vol. 7 ไม่ 1 หน้า 8674 เมษายน 2559

[ออนไลน์]. ที่ มีอยู่: <http://www.nature.com/articles/ncomms9674>

- [23] M. Abadi, A. Agarwal, P. Barham, E. Brevdo, Z. Chen, C. Citro, GS Corrado, A. Davis, J. Dean, M. Devin, S. Ghemawat, I. Goodfellow, A. Harp, G. Irving, M. Isard, Y. Jia, R. Jozefowicz, L. Kaiser, M. Kudlur, J. Levenberg, D. Man'e, R. Monga, S. Moore, D. Murray, C. Olah, M. Schuster, J. Shlens, B. Steiner, I. Sutskever, K. Talwar, P. Tucker, V. Vanhoucke, V. Vasudevan, F. Vi'egas, O. Vinyals, P. Warden, M. Wattenberg, M. Wicke, Y. Yu และ X. Zheng, "TensorFlow: แมชชีนเลิร์นนิงขนาดใหญ่บนระบบที่แตกต่างกัน" ปี 2015 ซอฟต์แวร์จาก tensorflow.org [ออนไลน์].

พร้อมใช้งาน: <http://tensorflow.org/> [24]

- V. Stimper และ RP Xian, "การปรับฮิสโตแกรมอีควาไลเซชันแบบปรับคอนทราสต์แบบจำกัดหลายมิติ," <https://github.com/VincentStimper/mclahe>, 2019
- [25] PK Sinha การได้มาซึ่งภาพและการประมวลผลล่วงหน้าสำหรับระบบวิชันซิสเต็มชื่อ SPIE, 2012
- [26] DJ Ketcham, "เทคนิคการปรับปรุงภาพแบบเรียลไทม์" ในสัมมนาเรื่องการประชุมผลภาพ, vol. 0074, 1976, หน้า 1-6. [ออนไลน์]. ที่ มีอยู่: <https://doi.org/10.1117/12.954708> [27] R. Hummel, "Image enhancement by histogram transform," *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 6 ไม่ 2 หน้า 184 - 195, 2520

[ออนไลน์]. ที่ มีอยู่: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146664X77800117> [28] R. Dale-Jones และ T. Tjahjadi, "การ

ศึกษาและการปรับเปลี่ยนอัลกอริธึมการทำให้เท่าเทียมกันของฮิสโตแกรมในพื้นที่"

การรู้จำรูปแบบ ฉบับ 26 ไม่ 9, pp. 1373-1381, กันยายน 1993.

[ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://linkinghub.Elsevier.com/retrieve/pii/003132039390143K> [29] J. Stark, "การปรับปรุงคอนทราสต์ของ

ภาพแบบปรับได้โดยใช้การทำให้เท่าเทียมกันของฮิสโตแกรมโดยทั่วไป"

ธุรกรรม IEEE ในการประมวลผลภาพ ฉบับที่ 9 ไม่ 5, pp. 889-896, พฤษภาคม 2000. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <http://ieeexplore.ieee.org/document/841534/> [30] Z. Wang, A. Bovik, H. Sheikh และ E.

Simoncelli, "การประเมินคุณภาพของภาพ: จากการมองเห็นข้อผิดพลาดไปถึงความคล้ายคลึงกันของโครงสร้าง" IEEE ธุรกรรมเกี่ยวกับการประมวลผลภาพ เล่มที่ 13 ไม่ 4, pp. 600-612, เม.ย. 2547. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1284395/> [31] GFC Campos, SM Mastelini, GJ Aguiar, RG Mantovani, LF de Melo และ S. Barbon, "การเลือกพารามิเตอร์การเรียนรู้ของเครื่องสำหรับ

การทำให้เท่าเทียมกันของฮิสโตแกรมแบบปรับคอนทราสต์จำกัด" วารสาร EURASIP เกี่ยวกับการประมวลผลภาพและวิดีโอ ฉบับที่ พ.ศ. 2562 ไม่มี 1 หน้า 59 ธ.ค. 2562. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://jivp-eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13640-019-0445-4> [32] E. Peli, "Contrast in

complex image," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 7 ไม่ 10 หน้า 2575 ต.ค. 2533. [ออนไลน์]. มีจำหน่าย: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josaa-7-10-2032>

URI=josaa-7-10-2032

- [33] K. Gu, G. Zhai, W. Lin และ M. Liu, "การวิเคราะห์คอนทราสต์ของภาพ: จาก การประเมินคุณภาพไปจนถึงการปรับปรุงอัตโนมัติ" ธุรกรรม IEEE บนไซเบอร์เนติกส์ ฉบับที่ 46 ไม่ 1, pp. 284-297, ม.ค. 2016. [ออนไลน์]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7056527/> [34] A. Kriete, "การพิจารณาคุณภาพของภาพในกล้องจุลทรรศน์แบบ 2 มิติและสามมิติด้วยคอนฟิวเตอร์" ในกล้องจุลทรรศน์หลายมิติ นิวยอร์ก นิวยอร์ก: Springer New York, 1994, หน้า 209-230 [ออนไลน์]. ใช้ได้: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4613-8366-6_12 [35] GM Phillips การแก้ไขและการประมาณค่าโดยพหุนาม ser หนังสือ CMS ในวิชาคณิตศาสตร์

นิวยอร์ก นิวยอร์ก: Springer New York, 2003. [ออนไลน์].

ที่ มีอยู่: <http://link.springer.com/10.1007/b97417> [36] E.

Kreyszig, H. Kreyszig และ EJ Norminton, *Advanced Engineering Mathematics*, 10th ed. ไวลีย์, 2011.

- [37] S. Moser, "คำแนะนำของนักทดลองเกี่ยวกับองค์ประกอบเทริกซ์ในรูปที่แก้ไขการปล่อยแสง" วารสารสเปกโทรสโกปีอิเล็กทรอนิกส์และปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้อง ฉบับที่ 214, pp. 29-52, ม.ค. 2017. [ออนไลน์]. ที่ มีอยู่: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0368204816301724> [38] JM Riley, F. Mazzola, M. Dendzik, M.

Michiardi, T. Takayama, L. Bawden, C. Granerød, M. Lean Dersson, T. Balasubramanian, M. Hoesch, TK

Kim, H. Takagi, W. Meevasana, P. Hofmann, MS Bahramy, JW Wells และ PDC King, "การสังเกตโดยตรงของแถบสปีนโพลาไรซ์จำนวนมากในเซมิคอนดักเตอร์สมมาตรผกผัน" *Nature Physics*, vol. 10 ไม่ 11, pp. 835-839, พ.ย. 2014. [ออนไลน์]. มีจำหน่าย: <http://www.nature.com/articles/nphys3105> [39] M. Puppini, Y. Deng, CW Nicholson, J. Feldl, NBM Schr"oter, H. Vita, PS Kirchmann,

C. Monney, L. Rettig, M. Wolf และ R. Ernstorfer, "โฟโตอิมิตชันสเปกโทรสโกปีของแข็งที่แก้ไขด้วยเวลาและมุมของแข็งในรังสีอัลตราไวโอเลตมากที่อัตราความถี่ 500 kHz" การทบทวนเครื่องมือวิทยาศาสตร์ ฉบับที่ 90 ไม่ 2 หน้า 023104 ก.พ. 2562. [ออนไลน์]. ที่ มีอยู่: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5081938> [40] RP Xian, L. Rettig และ R. Ernstorfer, "Symmetry guided nonrigid register: The case for แก้ไขการบิดเบือนใน multidimensional photoemission spectroscopy" *อัลตร้าจูลทรรศน์ฉบับ* 202 น. 133-139 ก.ค.

2562. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304399118303474> [41] RP Xian, Y. Acremann, SY Agustsson, M. Dendzik, K. Buhlmann, D. Curcio, D. Kutnyakhov, F. Pressacco, M. Heber, S. Dong, J. Demsar, W. Wurth, P. Hofmann, M. Wolf, L. Rettig และ R. Ernstorfer, “เวิร์กโฟลว์โอเพ่นซอร์สแบบกระจายสำหรับข้อมูลการทำแผนที่แบบดิสเพกโตรสโกปีการปล่อยแสงแบบหลายมิติ” ก.ย. 2019 [ออนไลน์]
- มีจำหน่าย: <http://arxiv.org/abs/1909.07714> [42] R.
- Bertoni, CW Nicholson, L. Waldecker, H. Hubener, C. Monney, U. De Giovannini, M. Puppini, M. Hoesch, E. Springate, RT Chapman, C. Cacho, M. Wolf, A. Rubio และ R. Ernstorfer, “การสร้างและวิวัฒนาการของพาหะที่นำขึ้นต้นแบบสปีน หุ่น และเลเซอร์โฟลาร์โซใน WSe₂ แบบผกผันสมมาตร” จดหมายทบทวนทางกายภาพ ฉบับ 117 เลขที่ 27 หน้า 277201 ร.ค. 2559. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.117.277201> [43] M. Puppini, “โฟโตเอมิชันสเปกโตรสโกปีแบบแก้ไขเวลาและแบบขนานกึ่งตัวนำสองมิติที่มีแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตมาก 500 kHz,” Ph. D. วิทยาลัยฟรี, Free University of Berlin, กันยายน 2017
- [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/23006?show=full> [44] B. Valeur และ MN Berberan-Santos, การเรืองแสงของโมเลกุล: หลักการและการใช้, 2nd ed., Wiley-VCH, 2006. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://www.wiley.com/en-us/Molecular+Fluorescence+%3A+Principles+and+Applications+for+Biologists+and+Physicists/p078392328376-45110> Waters, “ความแม่นยำและความแม่นยำในกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์เชิงปริมาณ” The Journal of Cell Biology, vol. 185 ไม่ 7, pp. 1135–1148, มิถุนายน 2009. [ออนไลน์].
- พร้อมใช้งาน: <http://www.jcb.org/lookup/doi/10.1083/jcb.200903097> [46] TA Nketia, H. Sailem, G. Rohde, R. Machiraju และ J. Rittscher, “การวิเคราะห์ภาพเซลล์ที่มีชีวิต : วิธีการ เครื่องมือ และโอกาส” Methods, vol. 115, pp. 65–79, ก.พ. 2017. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://linkinghub.Elsevier.com/retrieve/pii/S104620231730083X> [47] K. Kretschmar และ FM Watt, “การติดตามสายเลือด,” เซลล์ฉบับ 148 ไม่ 1-2, pp. 33–45, ม.ค. 2012. [ออนไลน์]. ที่ มีอยู่: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0092867412000037> [48] F. Amat, W. Lemon, DP Mossing, K. McDole, Y. Wan, K. Branson, EW Myers และ PJ Keller “การสร้างสายเลือดของเซลล์ใหม่อย่างรวดเร็วและแม่นยำจากข้อมูลกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ขนาดใหญ่” Nature Methods, vol. 11 ไม่ 9, pp. 951–958, กันยายน 2014
- [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <http://www.nature.com/articles/nmeth.3036>
- [49] DJ Flannigan และ AH Zewail, “4D electron microscopy: Principles and Applications,” Accounts of Chemical Research, vol. 45 ไม่ 10 หน้า
- พ.ศ. 2371–2382 ค.ศ. 2555. [ออนไลน์]. ที่ มีอยู่: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/ar3001684> [50] G. Lu and B. Fei, “Medical hyperspectral imaging a review,” Journal of Biomedical Optics, ing: vol. 19 ไม่ 1 หน้า 010901 ม.ค. 2557. [ออนไลน์].
- ที่ มีอยู่: <http://biomedicaloptics.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.JBO.19.1.010901> [51] W. Jahr, B. Schmid, C. Schmied, FO Fahrbach และ J. Huiskens, “กล้องจุลทรรศน์แผ่นแสงไฮเปอร์สเปกตรัม” เเนเจอร์ คอมมูนิตีเคชั่นส์ ฉบับ 6 ไม่ 1 หน้า 7990, พ.ย. 2558. [ออนไลน์]. ที่ มีอยู่: <http://www.nature.com/articles/ncomms8990>
- ..
- [52] A. Ozbek, XL De ´an-Ben และ D. Razansky, “Optoacoustic imaging ที่อัตราเฟรมปริมาตรทีโอเอโรตซ์” Optica, vol. 5 ไม่ 7 หน้า 857 ค.ศ. 2561. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=optica-5-7-857> [53] MK Miller และ RG Forbes, Atom-Probe Tomography บอสตัน, แมสซาชูเซตส์: Springer US, 2014. [ออนไลน์]. ที่ มีอยู่: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4899-7430-3>
- [54] A. Mehrish, AV Subramanyam และ S. Emmanuel, “ร่วมเชิงพื้นที่และโคไซน์แบบไม่ต่อเนื่องแปลงมิติวิศวกรรมเคาน์เตอร์ตามโดเมนเพื่อการปรับปรุงความคมชัดแบบปรับได้” IEEE Access, vol. 7, หน้า 27 183– 27 195, 2019. [ออนไลน์]. พร้อมใช้งาน: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8658078/>
- [55] SF Tan และ NAM Isa, “การปรับปรุงคอนทราสต์คิวโคโลเซชันหลายฮิสโตแกรมตามค่าแสงสำหรับรูปภาพที่มีแสงไม่สม่ำเสมอ” IEEE Access, vol. 7, pp. 70 842–70 861, 2019. [ออนไลน์]. ใช้ได้: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8721128/>