

อัลกอริทึมการประมาณการเคลื่อนไหว สำหรับการประมวลผลด้วยฮาร์ดแวร์

มานะ ทรัพย์ประพันธ์* อภินันท์ อุณากร*

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการพัฒนาหน่วยประมวลผลเฉพาะทางได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความเร็วให้กับงานประมวลผลที่ต้องมีการประมวลผลข้อมูลจำนวนมาก เช่น การเข้ารหัสวิดีโอ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาหน่วยประมวลผลเฉพาะทางเพื่อเพิ่มความเร็วให้กับงานเข้ารหัสวิดีโอ โดยมีการพัฒนาเฉพาะในส่วนของการประมาณการเคลื่อนไหว ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีผลการประมวลผลมากที่สุดในงานเข้ารหัสวิดีโอที่ใช้ในปัจจุบันในการเพิ่มความเร็วให้กับงานประมวลผลด้วยวิธีนี้ การเลือกอัลกอริทึมการประมาณการเคลื่อนไหวให้เหมาะสมกับการนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ ก็เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของหน่วยประมวลผลได้อีกระดับหนึ่ง โดยพัฒนาอัลกอริทึมที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นฮาร์ดแวร์ที่มีชื่อว่า Two-Level Parallel Hierarchical One-Dimensional Search (2LPHODS) โดยปรับปรุงมาจากอัลกอริทึม Parallel Hierarchical One-Dimensional Search (PHODS) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่มีความเร็วสูง ไม่ซับซ้อน และยังมีรูปแบบอัลกอริทึมแบบขนาน ทำให้มีประสิทธิภาพสูงเมื่อนำไปสร้างเป็นฮาร์ดแวร์ แต่ในด้านความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ยังมีมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้พัฒนาอัลกอริทึมดังกล่าวขึ้นมาโดยลดความเร็วในการประมวลผลลงเล็กน้อย แต่เพิ่มความถูกต้องของผลลัพธ์ให้มากขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง และยังคงคุณสมบัติเด่นของอัลกอริทึมดั้งเดิมเอาไว้

คำสำคัญ: การประมาณการเคลื่อนไหว การเปรียบเทียบ บล็อก เอฟพีจีเอ

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีในงานทางด้านมัลติมีเดียบนอุปกรณ์พกพาขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์มือถือ และ PDA ได้มีการพัฒนา

ไปอย่างมาก อย่างไรก็ตามงานที่เกี่ยวข้องกับวิดีโอบนอุปกรณ์เหล่านี้ก็ยังมีปัญหาอีกมากในงานที่ต้องการคุณภาพสูง และต้องการความเร็วระดับเรียลไทม์ มาตรฐานการเข้ารหัสวิดีโอมีอยู่ด้วยกันหลายมาตรฐาน ซึ่งเมื่อนำมาใช้บนอุปกรณ์พกพาเหล่านี้จะมีปัญหาข้อจำกัดหลัก 2 ประการ คือข้อจำกัดทางด้านพลังงานที่มีอยู่จำกัด และข้อจำกัดทางทรัพยากรของระบบ เช่น ขนาดของหน่วยความจำ และความเร็วของหน่วยประมวลผลที่ไม่สูงมากนัก ถ้าวิเคราะห์ขั้นตอนในการเข้ารหัสวิดีโอแล้วจะพบว่าในขั้นตอนการเข้ารหัสวิดีโอมากกว่า 60% จะถูกใช้ไปในการคำนวณการประมาณการเคลื่อนไหว (Motion Estimation) [1], [2], [3] ดังนั้นการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพในส่วนของการประมาณการเคลื่อนไหวจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเข้ารหัสวิดีโอโดยรวมเป็นอย่างมาก วิธีที่นำมาใช้ประมาณการเคลื่อนไหวที่ใช้กันมากในมาตรฐานต่าง ๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบันคือ Block Matching Algorithm (BMA)

การพัฒนาอัลกอริทึมการค้นหาจากเดิมที่ใช้วิธีการที่เรียกว่า Full Search ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบทุก ๆ ตำแหน่งในพื้นที่ที่กำหนดเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด มาเป็นการเลือกเปรียบเทียบเป็นบางตำแหน่งภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ทำการค้นหาแบบเป็นลำดับขั้นไปจนกระทั่งได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดที่หาด้วยวิธีการ Full Search (FS) เช่นอัลกอริทึม Three-Step Search (3SS) และ Two-Dimensional Logarithm Search (2DLS) วิธีการเหล่านี้ช่วยลดการเวลาประมวลผลในขั้นตอนนี้ลงเป็นอย่างมาก รวมทั้งลดการใช้พลังงานของระบบ อันเนื่องมาจากขั้นตอนการทำงานที่ลดลง นอกจากการพัฒนาในด้านอัลกอริทึมแล้ว การพัฒนาหน่วยประมวลผลเฉพาะทางก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ วิธีการนี้จะให้ผลลัพธ์ในด้านความเร็วที่ค่อนข้างสูง เพราะเป็นการประมวลผลด้วยฮาร์ดแวร์โดยตรง รวมทั้งยังเป็นการลดภาระของหน่วยประมวลผลของระบบลงด้วย แต่วิธีการนี้เป็นการเพิ่มภาระทางด้านพลังงานให้กับระบบ

* ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เพราะฮาร์ดแวร์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้วิธีนี้จึงต้องคำนึงถึงเรื่องขนาดของวงจรและความซับซ้อนของขั้นตอนในการคำนวณ เพื่อให้เกิดภาวะในการใช้พลังงานน้อยที่สุด

การพัฒนาการคำนวณหาค่าการประมาณการเคลื่อนไหวด้วยวงจรดิจิทัลนั้นมีด้วยกันหลายแนวทางไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาทางด้านสถาปัตยกรรมของการประมวลผล และการพัฒนาอัลกอริทึมที่นำมาใช้สร้างเป็นวงจร ในส่วนของการพัฒนาสถาปัตยกรรมจะเป็นการนำเสนอเกี่ยวกับโครงสร้างข้อมูลขนาดของข้อมูล โครงสร้างเส้นทางของข้อมูล การจัดเก็บข้อมูลรูปแบบคำสั่ง โครงสร้างหน่วยประมวลผลทางคณิต และลำดับขั้นตอนการประมวลผล ในส่วนของการพัฒนาอัลกอริทึมนั้นเนื่องจากอัลกอริทึมที่ใช้ในการประมาณการเคลื่อนไหวมีเป็นจำนวนมาก การเลือกอัลกอริทึมเพื่อนำมาสร้างเป็นวงจรให้เหมาะสมกับการประมวลผลที่เป็นวงจรดิจิทัลจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับหน่วยประมวลผลที่สร้างขึ้นด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะเมื่อมีเทคโนโลยีของชิพ FPGA (Field Programmable Gate Array) [4] ซึ่งเป็นไอซีที่สามารถนำมาโปรแกรมโครงสร้างภายในให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้ตามที่ต้องการ ทำให้การพัฒนาไอซีเฉพาะด้านนั้น มีความง่าย สะดวก และรวดเร็ว รวมทั้งสามารถรองรับวงจรที่มีขนาดใหญ่ มากได้ จึงทำให้เหมาะที่จะนำไปพัฒนาเป็นหน่วยประมวลผลเฉพาะทางเพื่อเพิ่มความเร็ว ให้กับการประมวลผลที่ค่อนข้างซับซ้อน

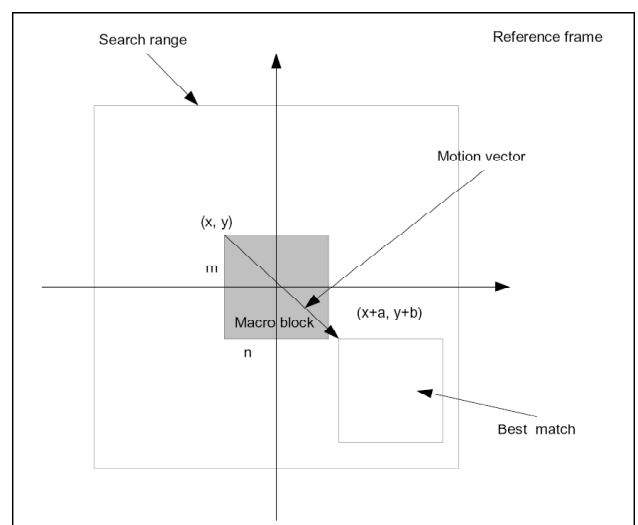
งานวิจัยนี้เสนอการพัฒนาอัลกอริทึมการประมาณการเคลื่อนไหวที่เหมาะสมกับการนำไปสร้างเป็นหน่วยประมวลผลเฉพาะทาง เพื่อนำไปใช้ในงานเข้ารหัสภาพวิดีโอ เพื่อให้ได้ความเร็วที่สูงขึ้น และใช้ทรัพยากรในการเข้ารหัสน้อยลง โดยเลือกใช้วิธีการปรับปรุงอัลกอริทึมที่มีอยู่แล้วที่มีความเหมาะสมในหลาย ๆ ด้าน แต่แล้วยังมีจุดบกพร่องอยู่มาก มาแก้ไขปรับปรุงให้เหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น

2. การประมาณการเคลื่อนไหว (Motion Estimation)

การประมาณการเคลื่อนไหวเป็นกระบวนการหาความเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของส่วนต่าง ๆ ในภาพระหว่างภาพ 2 ภาพที่มีความต่อเนื่องกัน เช่น ภาพเคลื่อนไหวต่าง ๆ ซึ่งวิธีการประมาณการเคลื่อนไหวนี้ได้ถูกนำมาใช้ในงานเข้ารหัสภาพวิดีโอเพื่อลดขนาดของข้อมูลภาพวิดีโอซึ่งเป็นข้อมูลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง โดยอาศัยหลักการพื้นฐานที่ภาพวิดีโอที่มีลำดับใกล้เคียงกัน จะมีความแตกต่างกันน้อยมาก การจัดเก็บภาพ

วิดีโอทุกภาพจึงถือเป็นการจัดเก็บที่มากเกินความจำเป็น จึงได้เกิดแนวคิดที่จะจัดเก็บเต็มภาพเฉพาะบางภาพ เป็นช่วง ๆ เวลา และจัดเก็บภาพที่เหลือเฉพาะส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงเท่านั้น วิธีการนี้จะเป็นการลดขนาดของข้อมูลวิดีโอลงได้อย่างมาก ซึ่งวิธีการที่นำมาใช้เพื่อหาส่วนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างภาพดังกล่าวคือ การประมาณการเคลื่อนไหว (Motion Estimation) [1], [2], [3]

วิธีการประมาณการเคลื่อนไหวที่ใช้มากในมาตรฐานการเข้ารหัสวิดีโอในปัจจุบันคือ อัลกอริทึมเปรียบเทียบบล็อก (Block matching algorithm) [4] ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือการค้นหา และการเปรียบเทียบ การค้นหาเป็นการคำนวณเพื่อหาตำแหน่งพิกัดต่าง ๆ ในภาพอ้างอิงที่ต้องทำการเปรียบเทียบในแต่ละขั้นตอน ตามแต่อัลกอริทึมที่ใช้จะกำหนด อัลกอริทึมที่ใช้ทำการเปรียบเทียบเรียกว่าอัลกอริทึมค้นหา (Search algorithm) ขั้นตอนการค้นหาอย่างรวดเร็ว ๆ จะเริ่มจากการแบ่งภาพปัจจุบันที่ต้องการจะหาการเคลื่อนไหวเป็นบล็อกขนาด $m \times n$ ที่เรียกว่ามาโครบล็อก (Macro block) จากนั้นจึงนำบล็อกดังกล่าวไปเปรียบเทียบ เพื่อหาตำแหน่งที่ใกล้เคียงที่สุดในภาพอ้างอิง โดยจะเริ่มจากการเปรียบเทียบจากตำแหน่งเดิมของบล็อกนั้น จากนั้นจึงเปรียบเทียบกับพิกัดอื่นรอบ ๆ ตำแหน่งดั้งเดิมภายในรัศมีที่กำหนดซึ่งเรียกว่าระยะค้นหา เส้นที่ลากจากตำแหน่งเดิมของมาโครบล็อกไปยังตำแหน่งที่ใกล้เคียงที่สุดนั้นเรียกว่าเวกเตอร์การเคลื่อนไหว (Motion vector) ของมาโครบล็อกดังกล่าวที่ 1



ภาพที่ 1 การประมาณการเคลื่อนไหว

การเปรียบเทียบจะใช้ฟังก์ชันที่เรียกว่าโคไซน์ฟังก์ชัน (Cosine function) การหาค่าความแตกต่างระหว่างบล็อก



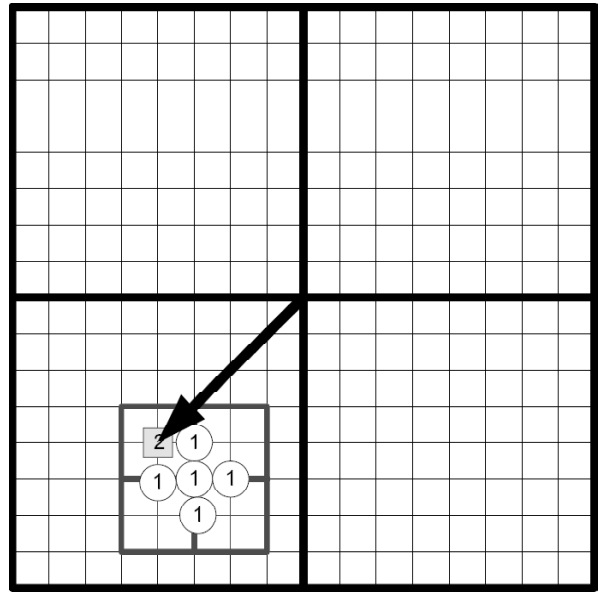
3. อัลกอริทึม Two-Level Parallel Hierarchical One-Dimensional Search (2LPHODS)

อัลกอริทึม PHODS เป็นอัลกอริทึมที่มีจุดเด่นในแง่ของความเร็ว มีจำนวนพิกัดที่ต้องทำการเปรียบเทียบน้อยมาก เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีลักษณะที่เป็นอัลกอริทึมแบบขนานซึ่งเมื่อนำไปสร้างเป็นวงจรดิจิทัลที่ใช้สถาปัตยกรรมที่เป็นแบบขนาน ก็จะช่วยให้ได้ความเร็วในการคำนวณที่สูงมากขึ้นดังที่กล่าวข้างต้นอัลกอริทึมนี้ยังมีจุดด้อยในแง่ของความถูกต้อง ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานจะทำให้ได้คุณภาพของภาพที่ต่ำกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ ที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งหากปรับปรุงในด้านของความถูกต้องให้กับอัลกอริทึมดังกล่าว โดยที่ไม่สูญเสียจุดเด่นของอัลกอริทึมเดิมมากเกินไป ก็จะได้อัลกอริทึมที่เหมาะสมสำหรับนำมาสร้างเป็นวงจรดิจิทัลเพื่อนำไปสร้างเป็นหน่วยประมวลผลเฉพาะทางสำหรับการประมาณการเคลื่อนไหว

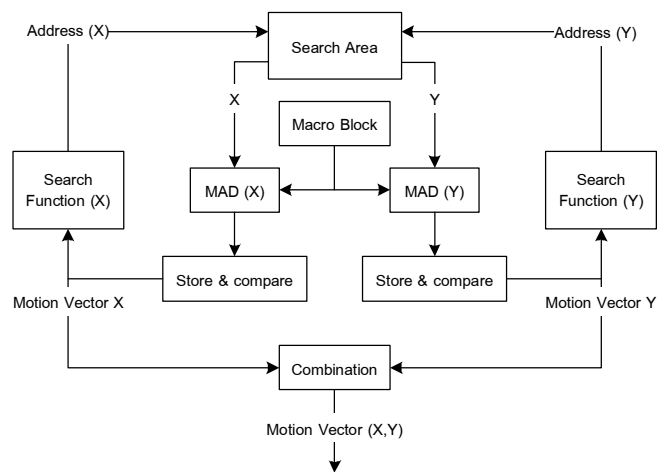
อัลกอริทึม 2LPHODS เป็นการปรับปรุงอัลกอริทึม PHODS ในด้านของความถูกต้องของผลลัพธ์ ให้สูงขึ้นกว่าเดิม โดยการเพิ่มจำนวนพิกัดที่ต้องเปรียบเทียบอีกเล็กน้อยจากอัลกอริทึมเดิม ทำให้ความเร็วลดลงเพียงเล็กน้อยในขณะที่ความถูกต้องสูงขึ้น ภาพรวมของอัลกอริทึมนี้จะเป็นการหาเวกเตอร์การเคลื่อนไหวด้วยอัลกอริทึม PHODS เป็นจำนวน 2 ครั้ง ในพื้นที่ค้นหาที่มีขนาดต่างกัน และมีจุดเริ่มต้นที่ต่างกัน ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าเป็นระดับที่ 1 และระดับที่ 2 โดยในระดับที่ 1 นั้นจะทำการเปรียบเทียบด้วยวิธีการ PHODS ตามปกติซึ่งเมื่อได้ผลลัพธ์จากการค้นหาในระดับที่ 1 แล้วก็จะใช้ค่าผลลัพธ์ดังกล่าว เพื่อทำการกำหนดขอบเขตการค้นหาในระดับที่ 2 ต่อไป

ซึ่งในการค้นหาระดับที่ 2 จะใช้ผลลัพธ์จากระดับที่ 1 เป็นจุดเริ่มต้น จากนั้นจึงกำหนดขอบเขตการค้นหาขนาดเล็กรอบจุดดังกล่าว แล้วทำการเปรียบเทียบด้วยวิธีการ PHODS อีกครั้งหนึ่ง เส้นเวกเตอร์จากจุดเริ่มต้นในระดับที่ 1 ไปยังผลลัพธ์ของระดับที่ 2 คือเวกเตอร์การเคลื่อนไหวของวิธีการ 2LPHODS ดังภาพที่ 4

ในส่วนของการนำไปสร้างเป็นวงจรดิจิทัลเพื่อนำไปใช้เป็นหน่วยประมวลผลเฉพาะทางนั้น จะใช้โครงสร้างการประมวลผลที่แยกค่าแกน X และแกน Y ออกจากกัน แล้วจึงนำผลลัพธ์ที่ได้มารวมกันในภายหลังดังภาพที่ 5 ซึ่งการออกแบบบนพื้นฐานของแผนผังดังกล่าวจะช่วยเพิ่มความเร็วในการค้นหาด้วยวิธีการนี้เป็นอย่างมาก



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบด้วยวิธี 2LPHODS ระยะ 8 พิกเซล



ภาพที่ 5 แผนภาพการประมวลผลแบบขนานของ 2LPHODS

4. ผลการทดลอง

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการประมาณการเคลื่อนไหวนั้น ประกอบไปด้วยการเปรียบเทียบในด้านของความเร็ว พิจารณาจากจำนวนพิกัดที่ต้องทำการเปรียบเทียบ และการเปรียบเทียบในด้านของความถูกต้องของผลลัพธ์ โดยจะใช้ค่า PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงความถูกต้องของผลลัพธ์ มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

ข้อมูลที่ใช้ทดสอบจะใช้ลำดับภาพมาตรฐานจำนวน 4 ชุดที่มีลักษณะของการเคลื่อนไหวที่แตกต่างกัน ได้แก่ Akiyo เป็นลำดับภาพที่มีพื้นหลังนิ่ง มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพน้อย Coastguard เป็นลำดับภาพที่มีพื้นหลังเคลื่อนไหวตลอดเวลา การเคลื่อนไหวของวัตถุค่อนข้างเร็ว Mobile เป็นลักษณะของ



ลำดับภาพที่มีการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 รูปแบบในภาพ คือมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง การเคลื่อนที่ในแนวนอน และการเคลื่อนที่แบบหมุน และ Tempete เป็นลำดับภาพที่มีการเคลื่อนที่แบบบนลงล่างอย่างรวดเร็วทั้งทั้งภาพ และมีการซูมกล้องถอยห่างออกมา ลำดับภาพทั้งหมดที่ใช้เป็นมาตรฐาน CIF ซึ่งมีขนาด 352 X 288 พิกเซล

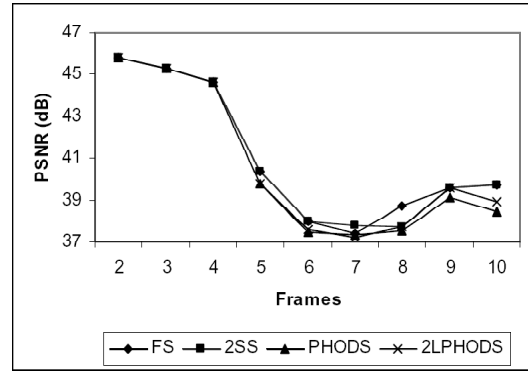
อัลกอริทึมที่นำมาใช้เปรียบเทียบมีอยู่ด้วยกัน 4 อัลกอริทึม คือ FS เป็นอัลกอริทึมที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด, 2SS เป็นอัลกอริทึมที่มีผู้นำเสนอมาก่อนหน้า, PHODS เป็นอัลกอริทึมที่เป็นต้นแบบ และ 2LPHODS เป็นอัลกอริทึมที่เสนอในบทความนี้ ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนพิกัดที่ต้องทำการเปรียบเทียบของภาพที่มาตรฐาน CIF และอัตราส่วนของจำนวนพิกัดเมื่อเทียบกับวิธี FS

ตารางที่ 1 จำนวนพิกัดที่ต้องเปรียบเทียบ

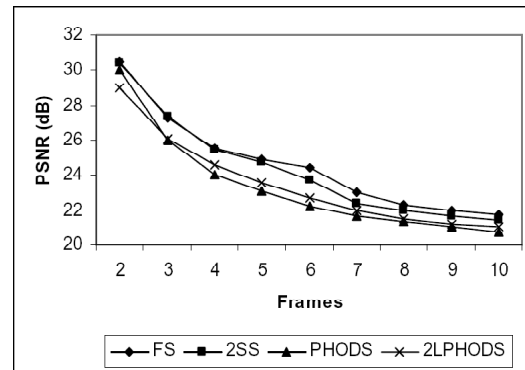
	FS	2SS	PHODS	2LPHODS
CIF	114444	13464	5148	8316
Ratio	100%	11.76%	4.50%	7.27%

ในส่วนของการวัดความถูกต้องของผลลัพธ์ จะใช้ลำดับภาพที่ 1 เป็นภาพอ้างอิง จากนั้นจึงเปรียบเทียบผลลัพธ์กับลำดับภาพที่ 2 ถึงลำดับภาพที่ 10 เพื่อให้เห็นถึงทิศทางการเปลี่ยนแปลง ดังภาพที่ 6 ถึง 9

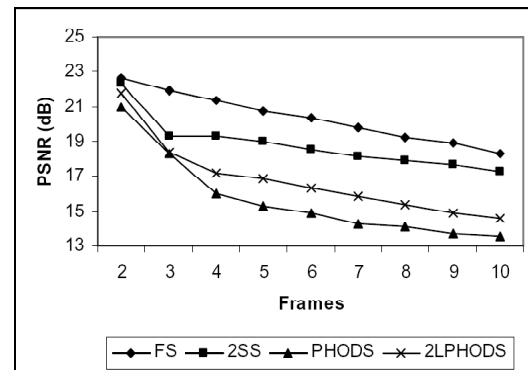
จากผลลัพธ์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่า 2LPHODS มีจำนวนพิกัดที่ต้องเปรียบเทียบมากกว่าอัลกอริทึมต้นแบบ แต่น้อยกว่าวิธีการ 2SS ในส่วนของค่า PSNR ซึ่งเป็นค่าความถูกต้องของผลลัพธ์จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างภาพมีมากขึ้น ความถูกต้องของ PHODS จะมีแนวโน้มต่ำลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่นที่นำมาเปรียบเทียบโดยเฉพาะในภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นจำนวนมากอย่างภาพ Mobile และ Tempete แต่ในอัลกอริทึมที่ปรับปรุงขึ้นมานั้นแนวโน้มการเกิดความผิดพลาดจะมีน้อยกว่ามาก แต่ไม่น้อยเท่ากับวิธีการ 2SS ซึ่งเมื่อพิจารณาทั้งในแง่ของความเร็ว และความถูกต้องแล้ว อัลกอริทึม 2LPHODS จัดได้ว่าเป็นอัลกอริทึมที่มีความสมดุลในด้านของความเร็วและความถูกต้อง นอกจากนี้ยังมีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนในส่วนของการคำนวณหาตำแหน่งนั้นมีการลบ และหารเท่านั้น โดยการหารเป็นเพียงแค่การหาร 2 ซึ่งเมื่อนำไปสร้างเป็นวงจรดิจิทัลแล้วเป็นเพียงแค่การเลื่อนบิตเท่านั้น อีกทั้งอัลกอริทึมนี้ยังรองรับการประมวลผลแบบขนานอีกด้วย



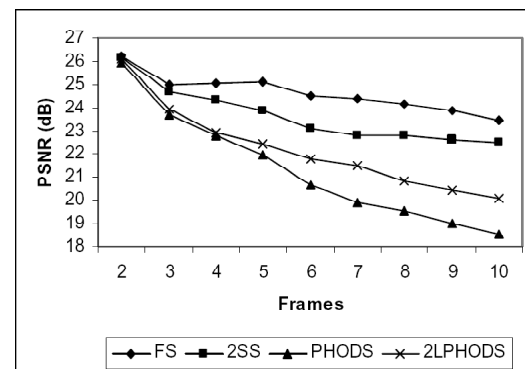
ภาพที่ 6 ค่า PSNR ของลำดับภาพ Akiyo



ภาพที่ 7 ค่า PSNR ของลำดับภาพ Coastguard



ภาพที่ 8 ค่า PSNR ของลำดับภาพ Mobile



ภาพที่ 9 ค่า PSNR ของลำดับภาพ Tempete



5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงอัลกอริทึมการประมาณการเคลื่อนไหวสำหรับการนำไปสร้างเป็นหน่วยประมวลผลเฉพาะทางเพื่อนำไปใช้ในการเพิ่มความเร็วให้กับการเข้ารหัสวิดีโอในมาตรฐานการบีบอัดภาพวิดีโอหลายมาตรฐานที่ใช้กันในปัจจุบัน สำหรับระบบประมวลผลที่มีความเร็วไม่สูงมาก โดยอัลกอริทึมดังกล่าวมีจุดเด่นในด้านของความเร็วที่สูง ในขณะที่ความผิดพลาดของผลลัพธ์มีไม่มากเกินไป อีกทั้งยังมีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน และสามารถรองรับการประมวลผลแบบขนานอีกด้วย

สำหรับการวิจัยในอนาคตสามารถพัฒนาเพิ่มฟังก์ชันพื้นฐานที่ใช้ในการบีบอัดภาพวิดีโอ เช่น DCT/IDCT เข้าไปในหน่วยประมวลผลเฉพาะทางให้พัฒนากลายเป็นหน่วยประมวลผลวิดีโอ (Video Processing Unit) ทำให้มีประโยชน์ในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Borko Furht, Joshua Greenberg, Raymond Westwater, "Motion Estimation Algorithms for Video Compression" Massachusetts : Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [2] Liang-Gee Chen, Wai-Ting Chen, Yeu-Shen Jehng, Tzi-Dar Chiuch "An Efficient Parallel Motion Estimation Algorithm for Digital Image Processing" *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol.1, Issue 4, pp.378 – 385, Dec. 1991.
- [3] Nan Yu, Kichul Kim, Salcic Z., "A New Motion Estimation Algorithm for Mobile Real-Time Video and its FPGA Implementation" *TENCON*, Vol. 1, pp 383 – 386, Nov. 2004.
- [4] Rangarajan P., Prashanth G., Harish P.S. "FPGA Implementation of High Speed Parallel Architecture for Block Motion Estimation" *SIPS*, pp. 245 – 250, 2004.

