



อัลกอริทึมตัวกรองดิจิตอลสำหรับการลดทอนสัญญาณรบกวนในระบบการวัดการแกว่งของเครน

Digital Filter Algorithm for Noise Reduction in Crane Sway Measurement Systems

กัญญ์ โปษะลิ*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถนนห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

*ผู้ประพันธ์บทความ pinyo@dome.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

ในการควบคุมเครนเพื่อทำการเคลื่อนย้ายวัตถุจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยทำให้เกิดการแกว่งตัวในระบบเครนน้อยที่สุดนั้น ข้อมูลที่บ่งบอกถึงการเคลื่อนที่ของเครนเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการควบคุม ทั้งนี้การได้มาซึ่งข้อมูลการวัดที่ถูกต้องจะช่วยให้การประมวลผลการควบคุมทำได้มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามข้อมูลการวัดการเคลื่อนที่ของเครนซึ่งมักจะอยู่ในรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์จะมีสัญญาณรบกวน (noise) ปนมาด้วยเสมอ หากระดับของสัญญาณรบกวนมีค่ามากจะทำให้การประเมินการแกว่งในระบบเครนผิดพลาดได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการสร้างอัลกอริทึมตัวกรองดิจิตอลแบบเวียนเกิด (recursive digital filter algorithm) เพื่อใช้ในการกำจัดสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณการวัดการแกว่งที่ได้จากเครื่องมือวัด การทดสอบอัลกอริทึมดังกล่าวกับสัญญาณรบกวนจำลองแสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่ถูกลดทอนให้น้อยลงอย่างมาก การลดทอนสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการทางซอฟต์แวร์ (software filtering) ในลักษณะนี้ทำให้ไม่จำเป็นต้องสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติมเพื่อกรองสัญญาณรบกวนสำหรับระบบควบคุมเครน ซึ่งมีประโยชน์ในแง่ของการลดความซับซ้อน (complexity) ของฮาร์ดแวร์ในระบบควบคุมเครนลง

คำหลัก: การควบคุมด้านการแกว่ง, การควบคุมเครน, การแกว่งของเครน, ตัวกรองดิจิตอล, ตัวกรองแบบเวียนเกิด

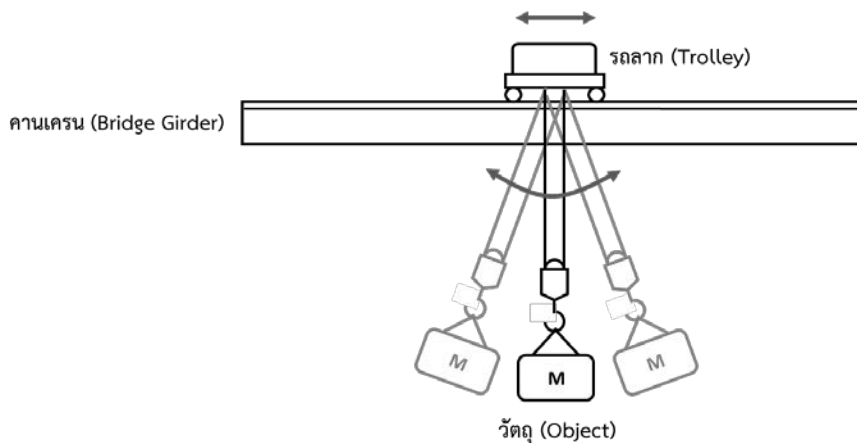
ABSTRACT

To control a crane for moving an object from place to place with minimal oscillation, the information of the crane's motion is significant. Acquiring accurate measurements leads to effective motion control of the crane. However, such measurements, which are usually available in the form of electrical signals produced by electronic instruments, commonly contain noise. If the magnitude of the noise is high, the evaluation of the crane's oscillatory movement may contain large errors. This research, thus, aims at applying a recursive digital filter algorithm to remove noise from sway measurement signals obtained from instruments. Evaluation tests of this algorithm with simulated noise demonstrate that the noise can be greatly reduced. Reducing noise based on this software filtering scheme provides the benefit that no additional electronic circuit for noise filtering is needed for the crane control system. This leads to a decrease in the complexity of the crane control system's hardware.

Keywords: anti-sway control, crane control, crane sway, digital filter, recursive filter

1. บทนำ

เครนเป็นเครื่องจักรที่จำเป็นต้องใช้ในการเคลื่อนย้ายวัตถุที่มีน้ำหนักมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมและการขนส่ง การเคลื่อนย้ายวัตถุที่มีน้ำหนักมากด้วยเครนมักเกิดปัญหาเนื่องจากการแกว่งตัวของวัตถุที่เคลื่อนย้ายดังแสดงในรูปที่ 1 ยิ่งอัตราเร็วในการเคลื่อนย้ายสูงก็ยิ่งทำให้การแกว่งตัวสูงตามไปด้วย หากการแกว่งตัวมีมากก็อาจทำให้เกิดความไม่ปลอดภัย เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ และความเสียหายต่อทรัพย์สินได้ นอกจากนี้การแกว่งที่เกิดขึ้นขณะทำการเคลื่อนย้ายวัตถุก็ยังสร้างความยุ่งยากในการจัดวางวัตถุให้ตรงตำแหน่งที่ต้องการอีกด้วย โดยเฉพาะในกระบวนการเคลื่อนย้ายวัตถุที่ต้องทำอย่างเร่งรีบภายในระยะเวลาจำกัด เช่น ในกรณีของการขนถ่ายตู้คอนเทนเนอร์จำนวนมากออกจากเรือสินค้าให้ทันก่อนกำหนดการออกเรือ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการแกว่งตัวในระบบเครนมากจนเกินไปจนทำให้การขนถ่ายและการจัดวางวัตถุล่าช้า ผู้ควบคุมเครนจำเป็นต้องใช้ทักษะและความระมัดระวังอย่างมากในการควบคุมและบังคับเครนด้วยตัวเอง



รูปที่ 1 การแกว่งตัวของวัตถุเมื่อใช้เครนขนย้าย

โดยทั่วไปแล้ว การแกว่งตัวของวัตถุที่ถูกเคลื่อนย้ายด้วยเครนเกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงเฉื่อย (inertia force) การลดการแกว่งในระบบเครนสามารถทำได้โดยควบคุมให้เกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางที่สามารถชดเชยผลของการแกว่งตัว ณ เวลาที่ต้องการให้วัตถุที่แขวนอยู่กับตัวเครนหยุดการเคลื่อนที่ (หากหยุดเครนอย่างทันทีทันใดจะทำให้วัตถุแกว่งตัวไปมา ไม่หยุดนิ่ง) ในปัจจุบันมีการนำเอาระบบควบคุมคอมพิวเตอร์ (computer control system) มาใช้ในการควบคุมการแกว่งในระบบเครนมากขึ้น [1-6] ซึ่งในกรณีนี้คอมพิวเตอร์ถูกใช้ในการประมวลผลข้อมูลต่างๆ จากเครื่องมือวัดที่บ่งบอกขนาดการแกว่งแล้วจึงออกคำสั่งเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของเครนโดยอัตโนมัติ อย่างไรก็ตาม พบว่าข้อมูลสำคัญที่ได้จากเครื่องมือวัดมักจะเต็มไปด้วยสัญญาณรบกวน (noise) ซึ่งอาจทำให้การประมวลผลข้อมูลการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครนผิดพลาดได้ ดังนั้นก่อนที่จะทำการประมวลผลข้อมูลเพื่อควบคุมการแกว่งจึงต้องมีการกำจัดสัญญาณรบกวนออกไปให้ได้มากที่สุด จากการศึกษาพบว่าตัวกรองดิจิตอลมีคุณสมบัติเด่นที่สามารถใช้ในกระบวนการปรับปรุงสัญญาณของระบบเครื่องมือวัดต่างๆ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาอัลกอริทึมตัวกรองดิจิตอลที่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนออกจากระบบการวัดการแกว่ง (sway measurement) การกำจัดสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองดิจิตอลในรูปแบบซอฟต์แวร์ (software filtering) เช่นนี้ทำให้ไม่จำเป็นต้องสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการกรองสัญญาณ ดังนั้นจึงมีผลในแง่ของการลดความซับซ้อนของฮาร์ดแวร์ในระบบควบคุมเครนลง อีกทั้งยังช่วยลดโอกาสของการทำงานผิดพลาดเนื่องจากการเสื่อมสภาพหรือการพังเสียหายของฮาร์ดแวร์ (hardware failure) ในระยะยาวด้วย

2. การวัดการแกว่งในระบบเครน

ในระบบควบคุมเครนอัตโนมัติที่ทำให้เครนสามารถเคลื่อนย้ายวัตถุไปยังเป้าหมายได้อย่างแม่นยำและทำให้เกิดการแกว่งตัวน้อยที่สุด (anti-sway control) นั้น ข้อมูลที่บ่งบอกถึงการเคลื่อนที่ของเครนถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการควบคุม [1-6] ในหลายกรณี

ขนาดการแกว่งในระบบครนถูกตรวจวัดด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล (digital camera) ที่มีอัลกอริทึมการวัดค่าการแกว่ง [1, 2] หรือตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ที่ทำการวัดขนาดการแกว่งในรูปแบบของขนาดการเอียงตัว (inclination) ของวัตถุที่แกว่งตัว [3] เช่น Hyla ได้นำเสนอวิธีการวัดขนาดการแกว่งตัวในระบบครนโดยใช้กล้องดิจิทัลซึ่งติดตั้งไว้กับส่วนฐานเลื่อนของครน [1] เนื่องจากในกรณีนี้หน้ากล้องถูกติดตั้งในแนวหันลงล่างสำหรับถ่ายภาพของส่วนจับยึดวัตถุที่ห้อยอยู่ใต้ฐานเลื่อนของครน จึงทำให้สามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นขณะที่วัตถุมีการแกว่งตัวได้ ซึ่งการตรวจจับการเคลื่อนที่อาศัยการสังเกตการเปลี่ยนตำแหน่งของส่วนจับยึดวัตถุซึ่งถูกติดเครื่องหมาย (marker) ไว้สำหรับการระบุตำแหน่ง แม้ว่าการประมวลผลภาพ (image processing) จะสามารถให้ข้อมูลเพื่อประเมินขนาดการแกว่งตัวในระบบครนได้ดี แต่ก็ยังมีข้อเสียเนื่องจากความแม่นยำไม่ค่อยดีนักในสภาวะที่แสงสว่างในพื้นที่ทำงานมีการผันแปรมาก [2] นอกจากนี้ การนำเอากล้องดิจิทัลสมรรถนะสูงที่สามารถให้สัญญาณภาพด้วยความเร็วและความละเอียดสูงมาใช้ก็ทำให้ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาระบบควบคุมครนสูงตามไปด้วย Kim และคณะจึงได้นำเสนอทางเลือกของการวัดขนาดการแกว่งในระบบครนด้วยเครื่องมือวัดที่ให้สัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ได้แก่ เครื่องมือวัดความเอียง (inclinometer) [3] ในกรณีนี้ค่าเอาต์พุตที่ได้จากเครื่องมือวัดถูกนำไปประมวลผลร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพื่อประเมินขนาดการแกว่ง ทิศทางการแกว่ง และความเร็วของการแกว่ง การประเมินค่าต่างๆ ดังกล่าวนี้นี้จำเป็นต้องอาศัยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีคุณภาพสูง กล่าวคือต้องมีระดับสัญญาณรบกวนในระดับต่ำ ดังนั้นการกำจัดสัญญาณรบกวนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวัดขนาดการแกว่งด้วยเครื่องมือวัดที่ให้เอาต์พุตในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อก

ในปัจจุบัน เทคนิคการกำจัดสัญญาณรบกวนในระบบเครื่องมือวัดแบบอนาล็อก เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบต่างๆ มีหลายวิธี แต่ละวิธีก็มีลักษณะ คุณสมบัติ ตลอดจนข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ในระบบเครื่องมือวัดโดยทั่วไปนั้น การกำจัดสัญญาณรบกวนมักจะทำโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วงจรตัวกรองแบบพาสซีฟ (passive filter) หรือวงจรตัวกรองแบบแอคทีฟ (active filter) อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบควบคุมเครื่องจักรต่างๆ ที่ส่วนใหญ่ใช้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการประมวลผลข้อมูลนั้น การกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองดิจิทัลถือเป็นทางเลือกที่ทำได้โดยไม่ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อพ่วงเพิ่มเติม ด้วยเหตุนี้ จึงมีการพัฒนาตัวกรองดิจิทัลรูปแบบต่างๆ ขึ้นมาใช้งาน เช่น ตัวกรองดิจิทัลแบบที่ไม่มีการป้อนกลับค่าเอาต์พุตหรือแบบไม่เวียนเกิด (non-recursive filter) [7] เช่น ตัวกรองแบบหาค่าเฉลี่ย (moving average filter) [8] หรือตัวกรองเอฟไออาร์ (FIR filter) [7, 9, 10, 11] ส่วนอีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ ตัวกรองดิจิทัลแบบที่มีการป้อนกลับค่าเอาต์พุตหรือแบบเวียนเกิด (recursive filter) [7, 12] เช่น ตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) [12] และตัวกรองไอโออาร์ (IIR filter) [4, 5, 7, 9] ชนิดต่างๆ เป็นต้น ทั้งนี้เทคนิคใหม่ๆ ได้ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวกรองดิจิทัลอย่างต่อเนื่อง เช่น การพัฒนาตัวกรองเอฟไออาร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural networks) ที่นำเสนอโดย Zeng และคณะ [11] และการพัฒนาตัวกรองดิจิทัลแบบที่มีการป้อนกลับค่าเอาต์พุตด้วยหลักการของคาลมานซึ่งนำเสนอโดย Okatan และคณะ [12] สำหรับการควบคุมครนนั่น มีการศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวกรองไอโออาร์แบบต่างๆ ร่วมกับเทคนิคการควบคุมเพื่อลดการแกว่งของครนโดย Ahmad และคณะ [4, 5] เป็นต้น

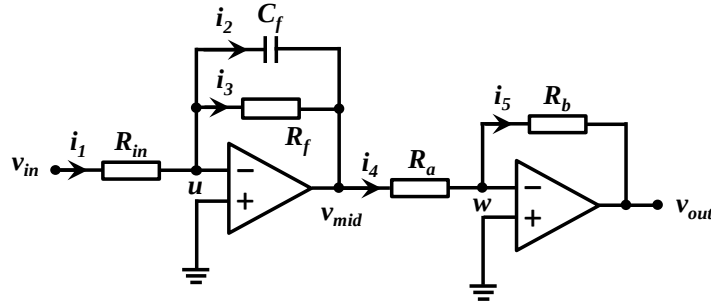
3. การออกแบบตัวกรองดิจิทัล

สำหรับงานวิจัยนี้ ตัวกรองดิจิทัลแบบที่มีการป้อนกลับค่าเอาต์พุตหรือแบบเวียนเกิดได้ถูกศึกษาเปรียบเทียบกับตัวกรองแบบอนาล็อก (ในรูปแบบของวงจรอิเล็กทรอนิกส์) การออกแบบตัวกรองดิจิทัลนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรตัวกรองอนาล็อกต้นแบบและขั้นตอนการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ในการแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวให้เป็นอัลกอริทึมตัวกรองดิจิทัลที่สามารถทำงานได้ด้วยโค้ดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (computer codes)

3.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรตัวกรองอนาล็อกต้นแบบ

รูปที่ 2 แสดงวงจรตัวกรองอนาล็อกแบบผ่านความถี่ต่ำชนิดแอคทีฟ (low-pass active filter) ที่ใช้เป็นต้นแบบสำหรับการออกแบบอัลกอริทึมตัวกรองดิจิทัลแบบเวียนเกิด วงจรนี้มีคุณสมบัติเด่นคือ สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนความถี่สูง ขณะเดียวกันก็สามารถขยายสัญญาณ

ได้ด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรดังกล่าวสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ตามทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐานซึ่งพบว่ากระแสไฟฟ้า i_1 มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้า i_2 และ i_3 รวมกัน นั่นคือ



รูปที่ 2 วงจรตัวกรองนาล็อกที่เป็นต้นแบบของการแปลงเป็นอัลกอริทึมตัวกรองดิจิทัลแบบเวียนเกิด

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (1)$$

หรือ

$$\frac{v_{in} - u}{R_{in}} = C_f \frac{d(u - v_{mid})}{dt} + \frac{u - v_{mid}}{R_f} \quad (2)$$

เมื่อ v_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจร R_{in} คือ ความต้านทาน (resistance) ของตัวต้านทานขาเข้า (input resistor) ของวงจร u คือ แรงดันไฟฟ้า (voltage) ที่ตำแหน่งหลังตัวต้านทานดังกล่าว C_f คือ ความจุไฟฟ้า (capacitance) ของตัวเก็บประจุที่ต่อคร่อมออปแอมป์ (op-amp หรือ operational amplifier) R_f คือ ความต้านทานของตัวต้านทานที่ต่อคร่อมออปแอมป์ และ V_{mid} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งเอาต์พุตของออปแอมป์ หากไม่คิดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งแรงดันไฟฟ้า u เนื่องจากมีค่าน้อยมาก จะพบว่า

$$\frac{v_{in}}{R_{in}} = -C_f \frac{dv_{mid}}{dt} - \frac{v_{mid}}{R_f} \quad (3)$$

สมการดังกล่าวอยู่ในรูปแบบของสมการอนุพันธ์ เมื่อทำการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) เพื่อเปลี่ยนรูปแบบให้ง่ายต่อการวิเคราะห์โดยกำหนดให้เงื่อนไขตั้งต้นต่างๆ เป็นศูนย์ทั้งหมด จะได้ว่า

$$\frac{V_{in}(s)}{R_{in}} = -sC_f V_{mid}(s) - \frac{V_{mid}(s)}{R_f} \quad (4)$$

และเมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\frac{V_{mid}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{R_f}{R_{in}} \cdot \frac{1}{sC_f R_f + 1} \quad (5)$$

ในการวิเคราะห์วงจรส่วนหลังพบว่ากระแสไฟฟ้า i_4 และ i_5 มีค่าเท่ากัน ซึ่งเขียนได้ว่า

$$i_4 = i_5 \quad (6)$$

หรือ

$$\frac{v_{mid} - w}{R_a} = \frac{w - v_{out}}{R_b} \quad (7)$$

เมื่อ R_a คือ ความต้านทานของตัวต้านทานขาเข้าของออปแอมป์ตัวที่สอง R_b คือ ความต้านทานของตัวต้านทานที่ต่อคร่อมออปแอมป์ตัวที่สอง w คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งหลังตัวต้านทานขาเข้าของออปแอมป์ตัวที่สอง v_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร หากไม่คิดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่ง w เนื่องจากมีค่าน้อยมาก จะได้ว่า

$$\frac{v_{mid}}{R_a} = -\frac{v_{out}}{R_b} \quad (8)$$

และเมื่อทำการแปลงลาปลาซ จะได้

$$\frac{V_{mid}(s)}{R_a} = -\frac{V_{out}(s)}{R_b} \quad (9)$$

หรือ

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{mid}(s)} = -\frac{R_b}{R_a} \quad (10)$$

นำสมการ (10) คูณกับ (5) จะได้ผลลัพธ์ที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรตัวกรองแบบอนาล็อกต้นแบบดังนี้

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{R_b R_f}{R_a R_{in}} \cdot \frac{1}{s C_f R_f + 1} \quad (11)$$

เพื่อพัฒนาตัวกรองดิจิตอลที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับวงจรกรองอนาล็อกต้นแบบ สมการ (11) จึงถูกจัดรูปใหม่เป็น

$$s R_a R_{in} C_f R_f V_{out}(s) + R_a R_{in} V_{out}(s) = R_b R_f V_{in}(s) \quad (12)$$

และเมื่อทำการแปลงลาปลาซกลับ (inverse Laplace transform) แล้วจัดรูปสมการอีกครั้ง จะได้สมการอนุพันธ์ดังนี้

$$R_b R_f v_{in} - R_a R_{in} v_{out} = R_a R_{in} C_f R_f \frac{dv_{out}}{dt} \quad (13)$$

3.2 การสร้างตัวกรองดิจิตอลด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

จากสมการ (13) หากกำหนดให้ตัวแปรอินพุต x_i แทน v_{in} ตัวแปรเอาต์พุต y_i แทน v_{out} และประมาณเทอมอนุพันธ์ด้วยอัตราส่วนระหว่างผลต่างของค่าเอาต์พุต $y_i - y_{i-1}$ และการเปลี่ยนแปลงขั้นเวลา ΔT ตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จะได้ว่า

$$R_b R_f x_i - R_a R_{in} y_i = R_a R_{in} C_f R_f \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta T} \quad (14)$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$y_i = \frac{R_b}{R_a} \cdot \frac{R_f}{R_{in}} \cdot \alpha x_i + (1 - \alpha) y_{i-1} \quad (15)$$

หรือ

$$y_i = y_{i-1} + \alpha \left(\frac{R_b}{R_a} \cdot \frac{R_f}{R_{in}} \cdot x_i - y_{i-1} \right) \quad (16)$$

เมื่อ

$$\alpha = \frac{\Delta T}{C_f R_f + \Delta T} \quad (17)$$

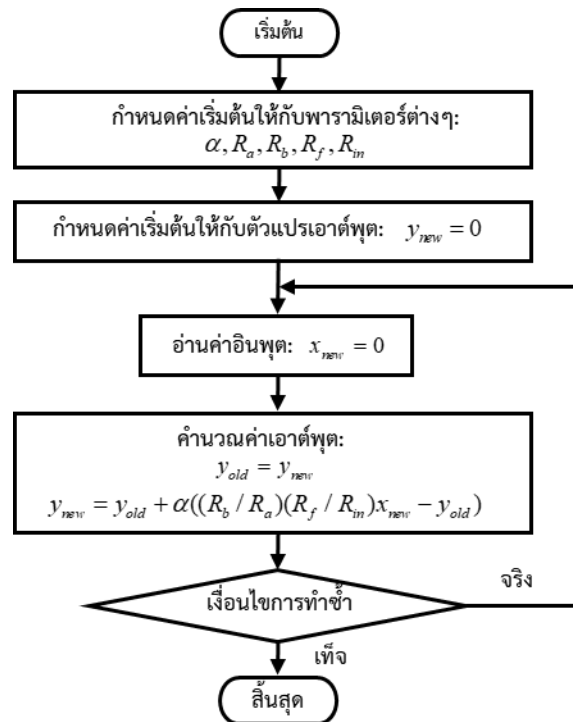
สมการ (16) เป็นอัลกอริทึมตัวกรองดิจิตอลที่สามารถทำงานแทนวงจรตัวกรองอนาล็อกในรูปที่ 2 ทั้งนี้อัลกอริทึมตัวกรองดิจิตอลที่แสดงในสมการ (16) มีความหมายในทางปฏิบัติคือ

$$\text{ค่าเอาต์พุตใหม่} = \text{ค่าเอาต์พุตเดิม} + \text{ส่วนหนึ่งของผลต่างระหว่างค่าอินพุตใหม่ที่ถูกขยายขนาดกับค่าเอาต์พุตเดิม} \quad (18)$$

หรือ

$$y_{new} = y_{old} + \alpha \left(\frac{R_b}{R_a} \cdot \frac{R_f}{R_{in}} \cdot x_{new} - y_{old} \right) \quad (19)$$

เนื่องจากการคำนวณค่าเอาต์พุตใหม่ต้องใช้ค่าเอาต์พุตที่เป็นผลลัพธ์เดิมที่เคยคำนวณมาแล้วก่อนหน้านี้ ดังนั้นจึงถือว่าอัลกอริทึมนี้มีลักษณะของการเวียนเกิด (recursion) ทั้งนี้โปรแกรมการคำนวณค่าเอาต์พุตใหม่ใช้วิธีวนซ้ำ (iterative method) ตามแผนผังที่แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนผังการคำนวณค่าเอาต์พุตตามอัลกอริทึมตัวกรองดิจิทัลแบบเวียนเกิด

สำหรับคุณสมบัติพื้นฐานทั่วไปของตัวกรองสัญญาณ เช่น ค่าความถี่ตัดผ่าน (Cut-off frequency, f_c) นั้นหาได้จากนิยามตามหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ กล่าวคือ $f_c = 1/2\pi R_f C_f$ (สัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงกว่าค่า f_c จะถูกลดขนาดลงหรือแม้กระทั่งถูกกำจัดทิ้งหากเป็นสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงกว่าค่า f_c มากๆ) จากการพิจารณาสมการ (17) ซึ่งแสดงค่า α ทำให้พบว่า

$$C_f R_f = \frac{\Delta T - \alpha \Delta T}{\alpha} \quad (20)$$

ดังนั้น

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f} = \frac{1}{2\pi(\Delta T - \alpha \Delta T) / \alpha} \quad (21)$$

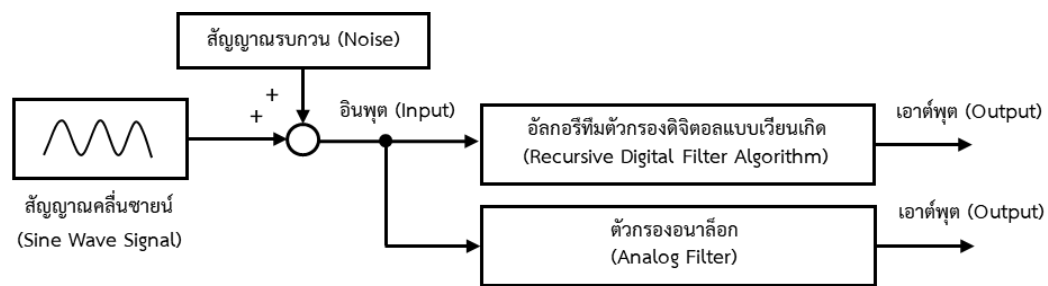
หรือ

$$f_c = \frac{\alpha}{2\pi \Delta T (1 - \alpha)} \quad (22)$$

4. การทดสอบตัวกรองดิจิทัล

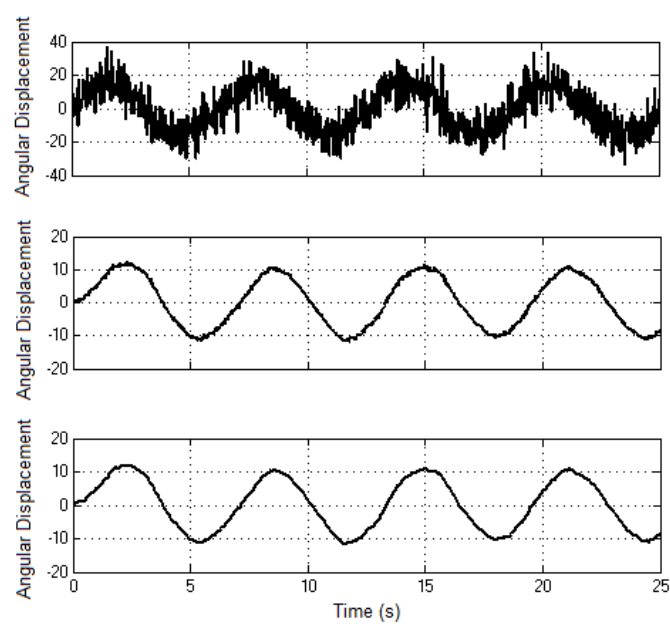
ในเบื้องต้น อัลกอริทึมตัวกรองสัญญาณที่ทำงานตามสมการ (19) ถูกทดสอบโดยอาศัยโปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) เป็นเครื่องมือ ขั้นตอนในการดำเนินการทดสอบประกอบด้วยการเขียนโค้ดโปรแกรมการคำนวณและการสร้างสัญญาณอินพุตที่จำลองสัญญาณการวัดการเคลื่อนที่ (simulated motion measurement signal) ของเครื่องบิน 1 มิติ รูปที่ 4 แสดงแผนผังการทดสอบโค้ดโปรแกรมตัวกรองดิจิทัลแบบเวียนเกิดซึ่งมีแบบจำลองของวงจรตัวกรองอนาล็อกเป็นตัวเปรียบเทียบ (แบบจำลองดังกล่าวสร้างขึ้นจากสมการ (11)) ในการทดสอบนี้ สัญญาณอินพุตจำลองมีลักษณะเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (sine wave) ที่มีสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (random noise) ความถี่สูงรวมอยู่ด้วยดังแสดงในรูปที่ 5 (มีข้อสังเกตว่าสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เป็นสัญญาณการวัดการแกว่งตัวของเครื่องบินสื่อความหมายถึงการแกว่งตัวกลับไปกลับมาของวัตถุที่แขวนอยู่กับเครื่องบิน) ในที่นี้กำหนดให้คาบการแกว่งของสัญญาณเป็น 5 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับการแกว่งตัวที่เกิดขึ้นได้ในระบบเครื่องบินขนาดใหญ่ [3, 6] ทั้งความเร็ว ความเร่ง และการขจัดเชิงมุมของการแกว่งมีลักษณะของสัญญาณเป็นแบบไซน์ทั้งสิ้น แต่แอมพลิจูด (amplitude) และเฟส (phase) ต่างกันไป ซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมของการเคลื่อนที่

แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก (simple harmonic motion) ทั้งนี้สัญญาณการวัดการแกว่งที่ใช้ประเมินความสามารถในการกรองสัญญาณรบกวนในหัวข้อนี้เป็นสัญญาณจำลองการวัดการจัดเชิงมุม (angular displacement)

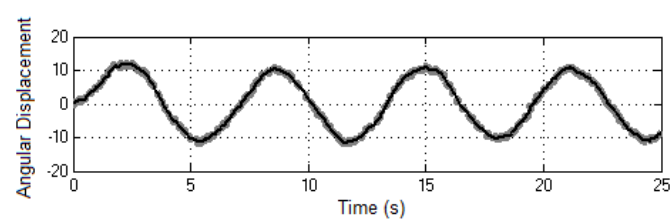


รูปที่ 4 การสร้างสัญญาณเพื่อทดสอบอัลกอริทึมตัวกรองดิจิตอลแบบเวียนเกิด (recursive digital filter algorithm)

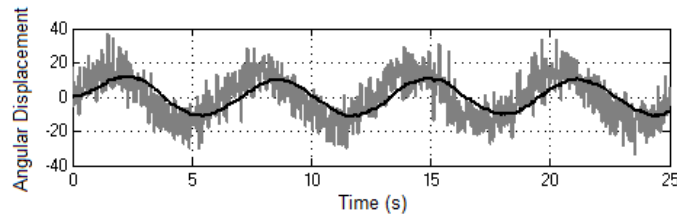
รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลการกรองสัญญาณด้วยตัวกรองดิจิตอลแบบเวียนเกิดและแบบจำลองตัวกรองอนาล็อก ส่วนรูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณที่ได้จากตัวกรองทั้งสองแบบ จะเห็นได้ว่าตัวกรองดิจิตอลที่พัฒนาขึ้นสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ดีเช่นเดียวกับตัวกรองอนาล็อก รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเอาต์พุตของตัวกรองดิจิตอลกับสัญญาณอินพุตที่เต็มไปด้วยสัญญาณรบกวน จะเห็นได้ว่าตัวกรองดิจิตอลสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนไปได้อย่างมาก (แอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนลดลงหลายเท่าตัว) โดยที่มีการเหลื่อมเฟสของสัญญาณเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 5 สัญญาณอินพุตที่ใช้ทดสอบ (บน) เอาต์พุตที่ได้จากการตัวกรองดิจิตอลแบบเวียนเกิด (กลาง) และเอาต์พุตที่ได้จากตัวกรองอนาล็อก (ล่าง)



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบเอาต์พุตที่ได้จากตัวกรองดิจิตอลแบบเวียนเกิดกับเอาต์พุตที่ได้จากตัวกรองอนาล็อก (สัญญาณซ้อนทับกันพอดี)



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบเอาต์พุตที่ได้จากตัวกรองดิจิตอลแบบเวียนเกิดกับสัญญาณอินพุตที่มีสัญญาณรบกวน

5. สรุป

ในการวัดการแกว่งตัวของวัตถุในระบบเครื่อนั้น พบว่าสัญญาณที่ได้จากเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์มักจะมีสัญญาณรบกวนปนมาด้วยเสมอ หากระดับของสัญญาณรบกวนมีค่าสูงอาจทำให้การวัดการแกว่งตัวในระบบเครื่อนผิดพลาดและทำให้การควบคุมเครื่อนเพื่อลดขนาดการแกว่งตัวทำได้ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงมีการทดลองประยุกต์ใช้อัลกอริทึมสำหรับลดทอนสัญญาณรบกวน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาการใช้อัลกอริทึมตัวกรองแบบเวียนเกิดเนื่องจากพบว่ามีความสมบัติใกล้เคียงกับวงจรตัวกรองอนาล็อก การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมดังกล่าวด้วยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (computer simulation) พบว่าตัวกรองดิจิตอลที่สร้างขึ้นสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนไปได้อย่างมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัลกอริทึมตัวกรองดิจิตอลแบบเวียนเกิดมีประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนใกล้เคียงกับตัวกรองอนาล็อก การลดทอนสัญญาณรบกวนด้วยอัลกอริทึมตัวกรองดิจิตอลดังที่กล่าวมานั้นมีประโยชน์ในแง่ที่ทำให้ไม่จำเป็นต้องสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับกำจัดสัญญาณรบกวนที่ไม่พึงประสงค์ แต่สามารถสร้างตัวกรองดิจิตอลในรูปแบบของซอฟต์แวร์ขึ้นมาใช้งานแทนได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hyla. P., 2015. Night Vision Applicability in Anti-Sway Vision-Based Solution. *Proceedings of the 2015 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, Miedzyzdroje, Poland, pp. 358–363.
- [2] Kawai, H., Kim, Y.B. and Choi, Y., 2011. Measurement of a container crane spreader under bad weather conditions by image restoration. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 61(1), pp.35–42.
- [3] Kim, Y., Yoshihara, H., Fujioka, N., Kasahara, H., Shim, H., and Sul, S., 2003. A New Vision-Sensorless Anti-Sway Control System for Container Cranes. *Proceedings of the 2003 IEEE Industry Applications Conference*, pp. 262–269.
- [4] Ahmad, M.A., Raja Ismail, R.M.T., Ramli, M.S., and Hambali, N., 2010. Analysis of IIR Filter with NCTF-PI control for sway and trajectory motion of a DPTOC System. *Proceedings of the 2010 International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications*, pp. 54–58.
- [5] Ahmad, M.A., Misran, F.R., Ramli, M.S., and Raja Ismail, R.M.T., 2010. Experimental investigations of low pass filter techniques for sway control of a gantry crane system. *Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Electronic Computer Technology*, pp. 1–4.
- [6] Enin, S.S. and Omelchenko, E.Y., and Beliy, A.V., 2018. Crane Anti-Sway Control System with Sway Angle Feedback. *Proceedings of the 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, pp. 1–5.
- [7] Hamming, R.W., 1998. *Digital filters*. Courier Corporation.
- [8] Chen, H.C. and Chen, S.W., 2003. A moving average based filtering system with its application to real-time QRS detection. *Computers in Cardiology*, IEEE, pp. 585–588.
- [9] Grout, I., 2011. *Digital system design with FPGAs and CPLDs*. Elsevier.

- [10] Khan, I. R., Okuda, M., and Ohba, R., 2003. New Designs of Frequency Selective FIR Digital Filters. *Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems*, Bangkok, Thailand, pp. 165–168.
- [11] Zeng, Z., Chen, Y., and Wang, Y., 2006. Optimal Design Study of High–Order FIR Digital Filters Based on Neural–Network Algorithm. *Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Dalian, China, pp. 3157–3161.
- [12] Okatan, A., and Aydemir, M. E., 2007. Design and Implementation of a Precision Accelerometer by Recursive Filtering for Spacecraft Instrumentation. *Proceedings of the 3rd International Conference on Recent Advance in Space Technologies*, Istanbul, Turkey, pp. 444–447.