

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

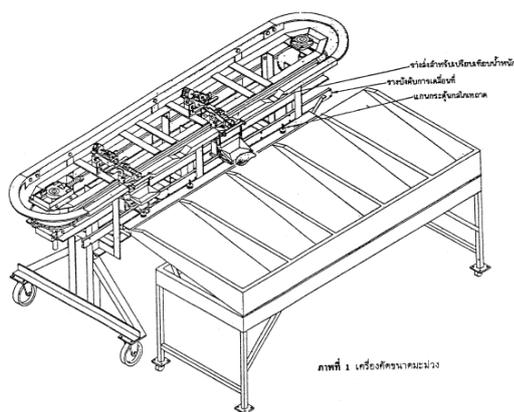
ในบทนี้จะกล่าวถึง เอกสารและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีซึ่งนำหนักที่นำมาใช้ออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดเกรดมะม่วงจากเอกสาร ตำรา และบทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อแสดงให้เห็นถึงพัฒนาการความก้าวหน้าเกี่ยวกับการคัดแยกมะม่วงโดยใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์ในการคัดแยกมะม่วง และเพื่อนำข้อมูลจากการศึกษาการออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดแยกมะม่วงมาช่วยเติมเต็มในการออกแบบเทคโนโลยีในการชั่งมวลโดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเอกสาร ตำรา และวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างเครื่องคัดแยกมะม่วงโดยใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์ในการคัดแยก เพื่อนำแนวคิดที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องคัดแยกมะม่วง ซึ่งจะมีอยู่ 2 ส่วน คือ ระบบชั่งมวลแบบดั้งเดิม (Classical weighting system) และวรรณกรรมเกี่ยวกับแบบจำลองการประมาณค่ามวลของมะม่วง

ระบบชั่งน้ำหนักแบบดั้งเดิม (Classical Weighting System)

ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, ศรีวิชัย สิงหะคเชนทร์ และอนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล (2532) สร้างเครื่องคัดมะม่วงโดยใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์ โดยใช้กลไกในการทำงานทั้งหมด ใช้หลักการเปรียบเทียบน้ำหนักระหว่างผลมะม่วงบนชูดตาซึ่งลำเลียงกับน้ำหนักพิกัดที่ตั้งไว้ที่สถานีซึ่งถ้าผลมะม่วงหนักกว่าพิกัดที่ตั้งไว้ ชูดตาซึ่งจะเทผลมะม่วงลงบนภาชนะรองรับ ถ้าเบากว่าพิกัดที่ตั้งไว้ ชูดตาซึ่งจะพาผลมะม่วงไปเปรียบเทียบน้ำหนักกับสถานีชูดตาต่อไป ความสามารถของเครื่องคัดขนาดที่ความเร็ว 2,400 ผล/ชั่วโมง และ 3,120 ผล/ชั่วโมง ความเที่ยงตรง ± 10 กรัม มีประสิทธิภาพ 98.67% และ 94.86% ตามลำดับ และที่ความเที่ยงตรง ± 5 กรัม มีประสิทธิภาพ 97.73% และ 93.99% ตามลำดับ และจากการสังเกต ผลมะม่วงที่มีมวลต่างกัน 10 กรัม สามารถคัดแยกได้ด้วยตาเปล่า ถ้าผลมะม่วงมีความสุกแก่ต่างกัน และจากผลการทดลองการคัดแยกพบว่าไม่พบความชื้น รอยขีดข่วน ความเสียหายของผลมะม่วงจากการใช้เครื่องคัดขนาดมะม่วงนี้ ซึ่งลักษณะเครื่องคัดขนาดมะม่วงที่ออกแบบมีลักษณะดังภาพ 1



ภาพ 1 แสดงลักษณะเครื่องคัดขนาดมะม่วง โดย ศิวลักษณ์ ปฐวิรัตน์ และคณะ

ที่มา: ศิวลักษณ์ ปฐวิรัตน์, ศรีวิชัย สิงหะคเชนทร์ และอนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, 2532, หน้า 32

ฐรัตน์ ธารารักษ์ (2537) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องคัดขนาดผลมะม่วงโดยการควบคุมของ Microprocessor ใช้หลักการนำมะม่วงวางบนถาดซึ่งที่ละผล จากนั้นระบบจะทำการคำนวณน้ำหนักผลมะม่วงที่ได้จากสัญญาณโหลดเซลล์ นำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของเกรดต่างๆ ที่เก็บไว้ในหน่วยความจำ เมื่อประมวลผลเสร็จจึงสั่งงานให้มอเตอร์หมุนถาดซึ่งไปยังช่องเกรดนั้นๆ และสั่งงานให้ถาดยกเทผลมะม่วงให้ไหลลงถุงผ้าที่รองรับ แล้วจึงสั่งให้ถาดซึ่งหมุนกลับมายังจุดเดิมเพื่อเริ่มต้นซึ่งลูกต่อไป ซึ่งเครื่องคัดสามารถคัดขนาดได้ 5 เกรด ด้วยความเร็ว 514 ผลต่อชั่วโมง โดยมีลักษณะเครื่องคัดขนาดมะม่วงดังภาพ 2



ภาพ 2 แสดงลักษณะเครื่องคัดขนาดมะม่วง โดย ฐรัตน์ ธารารักษ์

ที่มา: ฐรัตน์ ธารารักษ์, 2537, หน้า 20

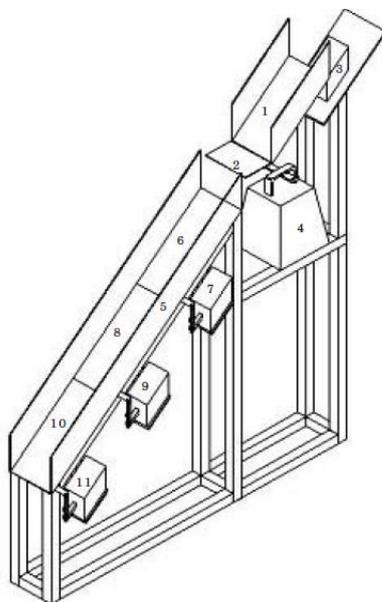
ศิระษา เจ็งสุขสวัสดิ์ (2546) ได้ศึกษาพัฒนาเครื่องคัดขนาดมะม่วงโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมพีแอลซี (Programmable Logic Controller, PLC) โดยมีการศึกษาปัจจัยในการออกแบบเครื่องคัดขนาดมะม่วงแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. การชั่งน้ำหนัก พบว่า ขนาดพิกัดของเครื่องซึ่งที่เหมาะสมสำหรับการคัดขนาดมะม่วงเท่ากับ 2000 กรัม โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์วงจรการกระทำเพื่อทำให้เวลาเข้าสู่สมดุลน้อยลง และติดตั้งสวิทซ์ทำงานด้วยแสงสำหรับส่งสัญญาณการคัดขนาดไปยังพีแอลซี โดยมีความผิดพลาดในการอ่านน้ำหนัก ± 10 กรัม

2. อุปกรณ์คัดขนาด พบว่า มุมที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่ของผลมะม่วงสู่อุปกรณ์คัดขนาดเท่ากับ 40 องศา

3. การประมวลผลด้วยอุปกรณ์ควบคุมพีแอลซี พบว่า เวลาที่ใช้ในการประมวลผลมะม่วง 1 ผล เท่ากับ 1.80 1.60 1.50 และ 2.10 วินาที สำหรับมะม่วงขนาดใหญ่พิเศษ ขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็ก ตามลำดับ

นำปัจจัยที่ได้มาศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิค พบว่า ความสามารถในการคัดขนาดเฉลี่ย 1,390 ผลต่อชั่วโมง ความถูกต้องในการคัดขนาดเฉลี่ย 96% ซึ่งชุดทดสอบการคัดขนาดมะม่วงดังภาพ 3



ภาพ 3 แสดงลักษณะชุดทดสอบการคัดขนาดมะม่วง โดย ศิระษา เจ็งสุขสวัสดิ์

ที่มา: ศิระษา เจ็งสุขสวัสดิ์, 2546, หน้า 43

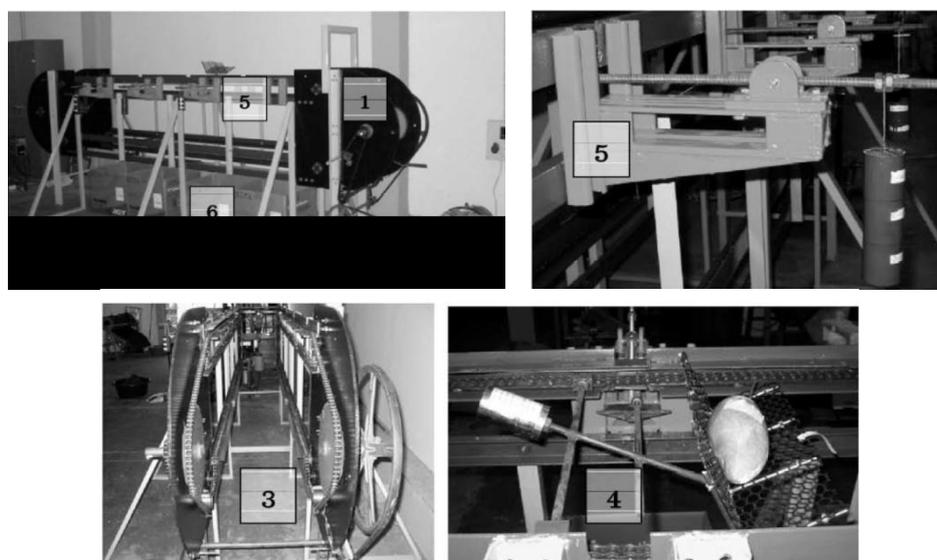
จิรพงษ์ บุตรชาดา (2547) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำในการคัดขนาดมะม่วงด้วยเครื่องคัดขนาดแบบใช้น้ำหนักเปรียบเทียบ (Counter Weight Type) แบบถาดหมุนในแนวตั้ง โดยทำการศึกษา 3 ขั้นตอน คือ

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการคัดขนาด พบว่า ปริมาตรของมะม่วงแต่ละผลมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักมากกว่าความกว้าง ความยาวและความหนา ดังนั้นการคัดขนาดแบบใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์ จึงมีความเหมาะสม

2. การศึกษาการออกแบบและสร้างชุดทดสอบการคัดขนาดมะม่วง พบว่า ควรออกแบบให้ชุดลำเลียงแต่ละชุดมีความยาวแกนลำเลียง 28.8 เซนติเมตร จะทำให้น้ำหนักมะม่วงถูกถ่ายเทไปยังกลไกคัดขนาดได้ถูกต้องมากที่สุด

3. การทดสอบผลการทำงานของชุดทดสอบการคัดขนาดมะม่วง พบว่า ค่าโมเมนต์ของน้ำหนักเปรียบเทียบที่ทำให้เกิดการคัดแยกที่เหมาะสม คือ ที่อัตราเร็วของชุดลำเลียง เท่ากับ 0.38 เมตรต่อวินาที

นำปัจจัยที่ได้มาสร้างชุดทดสอบ พบว่า สามารถคัดแยกมะม่วงในทางทฤษฎีสูงสุดประมาณ 3,000 ผลต่อชั่วโมง อัตราเร็วของชุดลำเลียง 0.38 เมตรต่อวินาที และประสิทธิภาพในการคัดขนาดเมื่อยอมให้ความผิดพลาดในการคัดขนาดได้ไม่เกิน ± 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการคัดขนาดเท่ากับ 94.8% โดยมีลักษณะชุดทดสอบการคัดขนาดมะม่วงดังภาพ 4



ภาพ 4 แสดงลักษณะชุดทดสอบการคัดขนาดมะม่วง โดย จิรพงษ์ บุตรชาดา

วรรณกรรมเกี่ยวกับแบบจำลองการประมาณค่ามวลมะม่วง

Halimic, M. and Balachandran, W. (1995) นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพของการวัดทรงข้อมูลที่ได้จากโพลดิคัลด้วยวงจรรองคาลแมน (Kalman filter) สำหรับระบบซึ่งน้ำหนักแบบไดนามิกผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าวงจรรองคาลแมนมีการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณ 300% สำหรับการวัดการซึ่งครั้งเดียว และ 50% สำหรับการวัดการซึ่งซ้ำ ซึ่งเป็นการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากตัวกรองอื่นๆ อย่างตัวกรองสัญญาณ FIR filter ชนิด Lowpass filter ซึ่งมีการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณ 150% และ 5% สำหรับการวัดการซึ่งครั้งเดียว และการวัดการซึ่งซ้ำ ตามลำดับ

Halimic, M., Balachandran, W. and Enab, Y. (1996) นำเสนอการประมาณค่าสำหรับระบบซึ่งน้ำหนักแบบไดนามิกด้วยวิธีฟัซซีโลจิก (Fuzzy Logic) ซึ่งใช้แนวคิดแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือเพื่อกรองสัญญาณและประมาณค่าของสัญญาณของโพลดิคัลที่ได้จากระบบซึ่งน้ำหนัก การใช้ตัวกรองประเภทนี้สามารถปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณ 20% ซึ่งดีกว่าการกรองดิจิทัลแบบเดิม

Yamazaki, T., Sakurai, Y. and OHNISHI, H. (2002) นำเสนอการพัฒนาอัลกอริทึมวิธีการประมวลผลสัญญาณสำหรับเครื่องตรวจสอบน้ำหนักที่ความเร็วสูงและวัดความถูกต้องแม่นยำของน้ำหนักของวัตถุ โดยใช้วงจรรองผ่านต่ำแบบ FIR เพื่อทำให้สัญญาณราบเรียบและประมาณค่าของมวลที่ได้จากข้อมูลสัญญาณที่ผ่านตัวกรองผ่านต่ำ

Halimic, M., Balachandran, W., Cecelja, F. and Tariq, M. (2003a) นำเสนอวิธีการรวมเทคนิคข่ายงานประสาทเทียม (Artificial neural networks: ANNs) และวิธีฟัซซีโลจิก เรียกว่า ระบบอนุมานฟัซซีข่ายงานปรับตัวได้ (Adaptive network fuzzy inference system: ANFIS) ซึ่งใช้สำหรับการลดสัญญาณรบกวนในระบบซึ่งน้ำหนักแบบไดนามิกส์เปรียบเทียบกับเครื่องซึ่งน้ำหนักแบบพลวัตของเครื่องตรวจสอบน้ำหนักโลมา 600 (Loma Checkweigher 600) พบว่า วิธี ANFIS มีการปรับปรุงความแม่นยำของระบบได้ดีกว่าทั้งสองวิธีคือ ANNs และฟัซซีโลจิก

Halimic, M., Balachandran, W. and Cecelja, F. (2003b) นำเสนอวิธีการเรียงตัวกันระหว่างวงจรรองดีคอนโวลูชันแบบปรับตัวได้ (Adaptive deconvolution filter: ADF) กับวงจรรองผ่านต่ำ เรียกว่าวิธีการรวมวงจรรองแบบการเรียงตัว (Cascaded filtering combination: CFC) เพื่อใช้ในการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งน้ำหนักแบบพลวัต เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธี คือ วิธี ADF และวิธี CFC กับเครื่องตรวจสอบน้ำหนักโลมา 600 พบว่า วิธี CFC มีการให้ผลน้ำหนักได้แม่นยำได้ดีกว่าทั้งวิธี ADC และเครื่องตรวจสอบน้ำหนักโลมา 600

เอกพงษ์ ซีวิตโสภณ (2548) ประมาณค่าน้ำหนักผลมังคุดบนระบบชั่งน้ำหนักแบบไดนามิกส์ ด้วยวิธี Fuzzy C-Means โดยระบบสายพานลำเลียงจะลำเลียงมังคุดเข้าสู่ระบบสายพานชั่งน้ำหนักที่รองรับด้วยโหลดเซลล์ จากนั้นนำสัญญาณค่าน้ำหนักจากโหลดเซลล์ผ่านเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและไม่โครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งใช้วงจรกรองผ่านต่ำแบบ FIR (Finite impulse response) ในการกำจัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงออกและใช้การแบ่งกลุ่มสัญญาณน้ำหนักโดยใช้พีชชีซีมีน เพื่อหาข้อมูลที่คาดว่าเป็นตัวแทนของน้ำหนักจริง โดยน้ำหนักจริงจะอยู่ในกลุ่มข้อมูลที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันน้อยเสมอ

สุชาติ แย้มเม่น, พีระศักดิ์ ฉายประสาธ, ชลิตล อินยาศรี และประทีป สังข์แป้น (2554) ทำการวิจัยพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องคัดแยกมะม่วงแบบอัตโนมัติตามเกณฑ์น้ำหนักแบบพลวัตด้วยอัตราเร็วสายพานสูงสุด 20 เมตรต่อนาที ด้วยค่าความผิดพลาด 15.28% ควบคุมการทำงานและประมวลผลสัญญาณมวลมะม่วงด้วยอุปกรณ์ควบคุมพีแอลซี (PLC) มีการกรองสัญญาณรบกวนด้วยระบบแอนาล็อก วงจรกรองบัตเตอร์เวิร์ธอันดับที่ 2 ความถี่คัตออฟ 3.17 เฮิรตซ์โดยการใช้วิธีประมาณค่ามวลมะม่วงด้วยเทคนิคการหาค่าเฉลี่ย ลักษณะเครื่องคัดแยกมะม่วงอัตโนมัติตามเกณฑ์น้ำหนักแบบพลวัตดังแสดงในภาพ 5



ภาพ 5 แสดงเครื่องคัดแยกมะม่วงแบบอัตโนมัติตามเกณฑ์น้ำหนักแบบพลวัต
โดย สุชาติ แย้มเม่น และคณะ

ที่มา: สุชาติ แย้มเม่น, พีระศักดิ์ ฉายประสาธ, ชลิตล อินยาศรี และประทีป สังข์แป้น, 2554, หน้า 21

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณรบกวน (Noise) คือ พลังงานในรูปแบบต่างๆ มีรูปร่างไม่แน่นอน มีผลกระทบระบบทำให้สัญญาณที่เราต้องการมีค่าผิดพลาดไปจากความเป็นจริง ซึ่งอาจเกิดจากกลไกต่างๆ ภายในอุปกรณ์ตัวต้านทานอาจเป็นแหล่งหนึ่ง เนื่องจากการนำของตัวต้านทานนั้นประกอบด้วยกลุ่มของอะตอมที่ต้องคงสภาพของความนำเอาไว้อะตอมเหล่านี้ จะถูกส่งหรือนำอิเล็กตรอนไปทำให้เกิดกระแสไหลแต่เนื่องจากความเร็วที่เกิดจากการสั่นสะเทือนภายในอะตอมนั้น ทำให้เกิดความร้อนหรืออุณหภูมิการสั่นของอะตอมจะส่งต่อไปยังอิเล็กตรอน ซึ่งอาจเกิดขึ้นร่วมกันกับกระแสที่ไม่ต้องการหรือสัญญาณรบกวน เมื่อสัญญาณรบกวนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเพิ่มขึ้นด้วยค่าสูญเสียในลักษณะของความร้อน หรือในลักษณะสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่า จอห์นสันนอยส์ (Johnson Noise) การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นภายในอะตอมของความต้านทาน ทำให้เกิดความถี่ย่านกว้าง สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น จึงประกอบด้วยสเปกตรัมของความถี่ที่กว้างมาก ซึ่งเรียกว่า ไวต์นอยส์ (White Noise) สามารถลดสัญญาณรบกวนได้ โดยการลดความร้อนของความต้านทานโดยอาจใช้ความต้านทานแบบฟิล์มและแก้วชนิดพิเศษ ซึ่งถ้าสัญญาณรบกวนเกิดจากภายใน การกำบังหรือการเลือกใช้วงจรองจะไม่มีผลในการลดขนาดของสัญญาณรบกวนได้ สัญญาณรบกวนอีกสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากสาเหตุทางไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาอันสั้นในอุปกรณ์แอกทีฟต่างๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ เมื่อมีการชาร์ตหรือต่อในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่ง ทำให้เกิดความถี่เกิดการรบกวนแบบแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งช่วงการเกิดความถี่เป็นช่วงสั้นๆ ทำให้สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเป็นย่านกว้างทันทีทันใด ซึ่งเรียกว่า ชอร์ตนอยส์ (Short Noise) การเลือกใช้วงจรองที่เหมาะสมสามารถช่วยลดสัญญาณรบกวนได้ในระดับหนึ่ง สัญญาณรบกวนอีกอย่างหนึ่ง คือ ความถี่ไฟฟ้าที่ 50 หรือ 60 เฮิรตซ์ เช่น แหล่งจ่ายไฟฟ้าจ่ายสัญญาณที่ความถี่ 60 เฮิรตซ์ นำเข้าสู่ระบบโดยผ่านสายตัวนำไฟฟ้าและส่งถ่ายเข้าสู่อุปกรณ์อื่นในระบบต่อไปหรืออาจแผ่รัศมีไปสู่ระบบโดยผ่านสายตัวนำและจากหม้อแปลง การลดสัญญาณรบกวนนี้สามารถทำได้ยาก อาจแก้ได้ด้วยการใช้ตัวกรองที่เหมาะสมใส่ไว้ที่สายตัวนำเพื่อเป็นกับดักสัญญาณรบกวน แต่ถ้าเกิดสัญญาณรบกวนเกิดจากการแผ่รัศมีอาจแก้ได้ด้วยการวางแนวตัวนำป้องกัน (Shielding) เพื่อลดสัญญาณที่จะแทรกเข้ามาได้ การวางแนวป้องกันจะมีความยุ่งยากสูงเพราะต้องป้องกันที่ตัวนำสายทดสอบสายแหล่งจ่ายไฟฟ้าหรืออาจทำทั้งหมดภายในวงจร (กิตติวุฒิ จินณะบุตร, 2548)

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

ปัจจุบันการประมวลผลสัญญาณเกิดขึ้นมากมายในระบบสื่อสารโทรคมนาคม ระบบวัด และการควบคุมเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม การบังคับหุ่นยนต์ ระบบนำวิถีจรวดในวงทหาร การตรวจจับเครื่องบินด้วยเรดาร์ การพยากรณ์อากาศจากภาพถ่ายดาวเทียมการวินิจฉัยโรคจากภาพถ่ายรังสีเอกซ์ การบีบอัดข้อมูลเพื่อการบันทึกจัดเก็บและอื่นๆ อีกมากมาย

กรรมวิธีการประมวลผลสัญญาณสามารถแบ่งแยกออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่

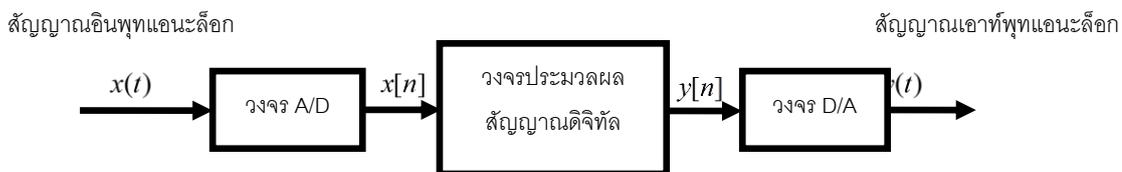
1. กรรมวิธีการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก (analog signal processing)
2. กรรมวิธีการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (digital signal processing)

ในอดีตการประมวลผลสัญญาณแทบทั้งหมดจะอาศัยกรรมวิธีทางแอนะล็อกเป็นหลัก วิศวกรสร้างการทำงานโดยรวมของระบบที่ใช้การประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก สัญญาณแอนะล็อกที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะได้รับการประมวลผลโดยตรงในรูปของสัญญาณที่มีค่าต่อเนื่องทางเวลา โดยอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกที่สำคัญประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ วงจรขยายและไดโอด สัญญาณที่ได้ทางขาออกมักจะอยู่ในรูปของสัญญาณแอนะล็อกด้วยเช่นกัน ข้อดีของการประมวลผลสัญญาณในลักษณะนี้ คือ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการประมวลผลสามารถแทนสมการอนุพันธ์สำหรับจำลองการทำงานของระบบจริงได้ โดยไม่ต้องมีการประมาณค่า นอกจากนี้ระบบสามารถทำงานแบบเรียลไทม์ (realtime) ได้โดยไม่ขึ้นกับความถี่ของสัญญาณแอนะล็อกขาเข้า ดังแสดงภาพ 6



ภาพ 6 แสดงโครงสร้างระบบประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก

ปัจจุบันความก้าวหน้าของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ได้ส่งผลให้การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีบทบาทเพิ่มมากขึ้นและได้เข้ามาแทนที่การประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกลักษณะการทำงานของกรรมวิธีประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสามารถแบ่งแยกออกได้เป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (A/D converter) วงจรประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (D/A converter) ดังแสดงภาพ 7



ภาพ 7 แสดงโครงสร้างระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

จากภาพ 7 แปลงสัญญาณขาเข้า $x(t)$ ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล $x[n]$ ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีค่าติดครีตทางเวลา (discrete time signal) ก่อนจะนำไปผ่านการประมวลผล กรรมวิธีการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีความต่างไปจากกรณีของการประมวลผลสัญญาณแอนะล็อก โดยอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลประกอบด้วย วงจรบวก วงจรลบและหน่วยความจำ ซึ่งก็คือการคำนวณตัวเลขในทางคณิตศาสตร์ผลที่ได้จากการประมวลผล จะยังคงอยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัลดังนั้น ในขั้นตอนท้ายสุด จึงต้องมีกระบวนการแปลงกลับให้ได้เป็นสัญญาณแอนะล็อกเหมือนเดิมโดยใช้วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (D/A)

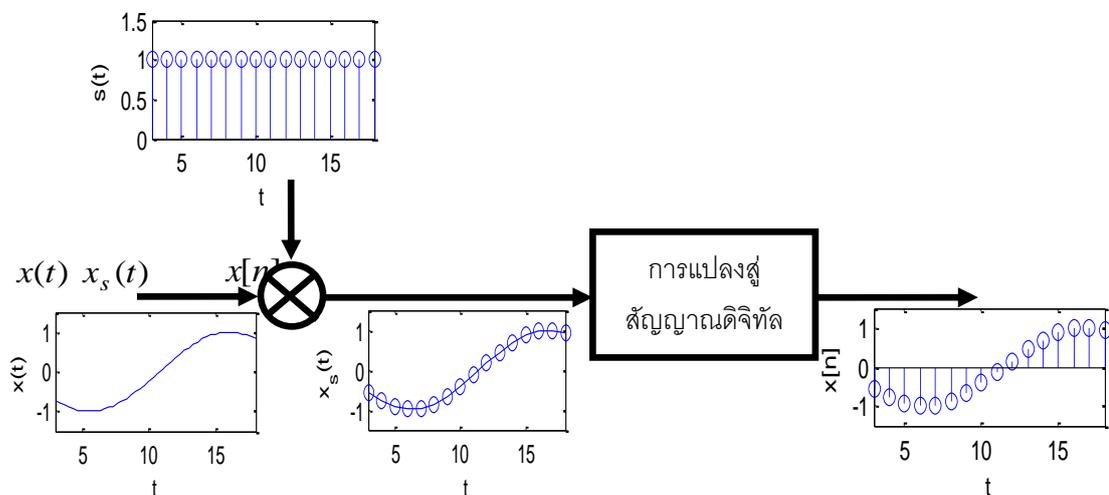
ระบบการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีข้อดีหลายประการดังนี้ คือ ระบบการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลมีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับเปลี่ยนไปตามความต้องการของผู้ออกแบบได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ ยกตัวอย่างเช่น ในการออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำสำหรับใช้งานในระบบสื่อสารหนึ่ง เมื่อมีการระบุข้อกำหนดของวงจรไว้แล้ว สามารถเลือกออกแบบโดยใช้วงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกหรือวงจรประมวลผลสัญญาณดิจิทัลก็ได้และมักให้ผลที่ใกล้เคียงกันแต่อย่างไรก็ตามหากต้องการปรับข้อกำหนดของวงจรกรองใหม่ การออกแบบโดยใช้วงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกจะต้องมีการปรับแก้วงจรใหม่หรือเปลี่ยนอุปกรณ์บางส่วนออก ในขณะที่การออกแบบโดยใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสามารถปรับแก้ค่าตัวเลขในโปรแกรมใหม่บางส่วนเท่านั้น นอกจากนี้หากต้องการออกแบบวงจรกรองรูปแบบอื่นๆ วงจรประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกจะต้องมีการออกแบบใหม่ทั้งหมดและใช้อุปกรณ์ที่ต่างไปจากเดิมแต่สำหรับการออกแบบโดยใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสามารถใช้อุปกรณ์ชุดเดิมได้ เพียงแค่มีการปรับเปลี่ยนโปรแกรมในวงจรใหม่เท่านั้น ข้อได้เปรียบอีกประการของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล คือ ขีดความสามารถในการปรับตัวได้ในขณะใช้งาน เนื่องจากคุณลักษณะของระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยง่ายจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เป็นเพียงการคำนวณตัวเลข ทำให้สามารถสร้างระบบที่สามารถปรับเปลี่ยนคุณลักษณะการทำงานระหว่างการใช้งานจริงได้ เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงไปได้

การสุ่มตัวอย่างรายคาบ

โดยทั่วไปการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลจะใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างรายคาบ (Periodic Sampling) ที่คงที่ ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐาน เป็นไปได้เหมือนกันที่จะใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างรายคาบแบบไม่คงที่เพื่อที่จะปรับตัวตามธรรมชาติของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากระบบควบคุมการเปลี่ยนรายคาบตามลักษณะของสัญญาณเข้ามีความซับซ้อนสูงและทำให้ระบบการประมวลสัญญาณต้องปรับตัวตามไปด้วย (วุฒิพงศ์ อารีกุล, 2548) สมการการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลสามารถเขียนได้ดังนี้

$$x[n] = x(nT), \quad -\infty < n < \infty \quad (2-1)$$

โดยที่ T คือ คาบการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Period) และ $f_s = \frac{1}{T}$ คือ ความถี่การสุ่มตัวอย่าง (Sampling Frequency) โครงสร้างบล็อกพร้อมลักษณะของสัญญาณในแต่ละจุดได้ดังภาพ 8



ภาพ 8 แสดงการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและลักษณะสัญญาณที่เกี่ยวข้อง

จากภาพ 8 จะเห็นได้ว่า สัญญาณ $x(t)$ ซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกหรือสัญญาณต่อเนื่อง จะถูกนำมาคูณกับสัญญาณสุ่มความถี่และคาบคงที่ $s(t)$ จะทำให้กลายเป็นสัญญาณ $x_s(t)$ คือ สัญญาณไม่ต่อเนื่อง ดังต่อไปนี้

$$x_s(t) = x(t)s(t) \quad (2-2)$$

แทนค่าสัญญาณสุ่ม $s(t)$ ด้วยการเขียนในลักษณะอนุกรมของสัญญาณอิมพัลส์

$$x_s(t) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (2-3)$$

สัญญาณ $x(t)$ ไม่เกี่ยวข้องกับผลรวมอนุกรม จึงสามารถดึงเข้าไปอยู่ร่วมในอนุกรมได้

$$x_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT)\delta(t - nT) \quad (2-4)$$

เพื่อความเข้าใจการสุ่มตัวอย่างต้องพิจารณาสัญญาณในเชิงความถี่ด้วยพิจารณาการแปลงฟูริเยร์ของสัญญาณสุ่ม $s(t)$

$$s(t) \xleftrightarrow{F} S(j\Omega) \quad (2-5)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nt) \xleftrightarrow{F} \frac{2\pi}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\Omega - k\Omega_s) \quad (2-6)$$

โดยที่ $\Omega_s = \frac{2\pi}{T}$ radian/second การคูณทางเวลาเทียบเท่ากับการคอนโวลูชันทางความถี่ แต่สัญญาณ $S(j\Omega)$ เป็นลักษณะอิมพัลส์ การคอนโวลูชันกับอิมพัลส์เดี่ยวจะทำให้ได้สัญญาณเหมือนเดิม

$$X_s(j\Omega) = \frac{1}{2\pi} X_c(j\Omega) * S(j\Omega) \quad (2-7)$$

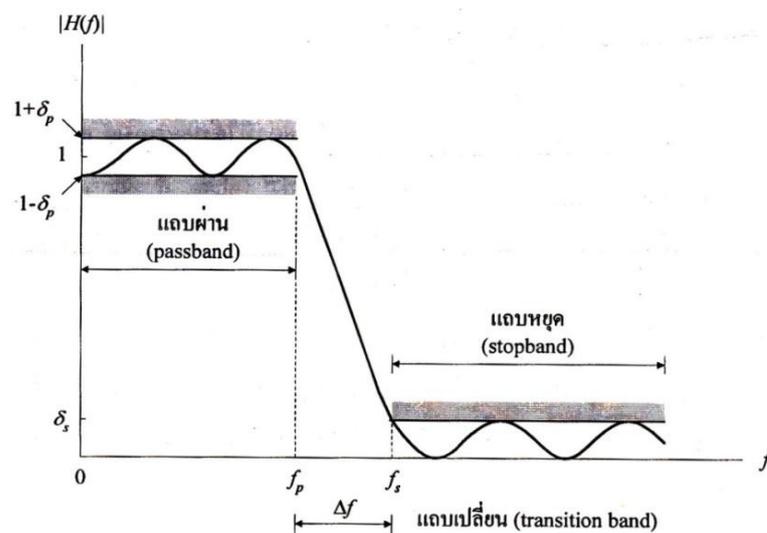
$$= \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_c(j\Omega - k\Omega_s) \quad (2-8)$$

วงจรรองผ่านต่ำ (Lowpass Filter)

วงจรรองผ่านต่ำ (Lowpass Filter) คือ วงจรที่มีคุณสมบัติในการยอมให้ความถี่ต่ำสามารถผ่านได้ คุณสมบัติของผลตอบสนองเชิงขนาดสำหรับวงจรรองผ่านต่ำมีการแบ่งคุณสมบัติทางความถี่แบ่งเป็น 3 ส่วน ดังภาพ 9 ได้แก่ ช่วงแถบผ่าน (Passband) คือ ความถี่ตั้งแต่กระแสตรงไปจนถึงความถี่ f_p จะสามารถผ่านได้ผลตอบสนองเชิงขนาด $|H(f)|$ อยู่ในช่วง $1 - \delta_p$ และ $1 + \delta_p$ กล่าวคือ

$$1 - \delta_p \leq |H(f)| \leq 1 + \delta_p \text{ สำหรับ } |f| \leq f_p \quad (2-9)$$

ช่วงแถบเปลี่ยน (Transition Band) เป็นตัวกำหนดช่วงความกว้างของความถี่สูงสุดที่วงจรรองจะเปลี่ยนจากการทำงานในช่วงของแถบผ่านไปสู่ช่วงของแถบหยุด ซึ่งวงจรรองที่ดีจะต้องกำหนดให้ช่วงเปลี่ยน Δf มีขนาดเล็กและช่วงแถบหยุด (Stopband) เป็นตัวกำหนดค่าความถี่แรกที่วงจรรองจะทำงานในช่วงของแถบหยุดด้วยพารามิเตอร์ f_s



ภาพ 9 แสดงการกำหนดคุณลักษณะของวงจรรองผ่านต่ำ

ที่มา: ลัญฉกร วุฒิสีทิฏกุลกิจ, 2547, หน้า 130

วงจรรองผ่านต่ำแบบแอคทีฟ (Active Low-Pass Filter)

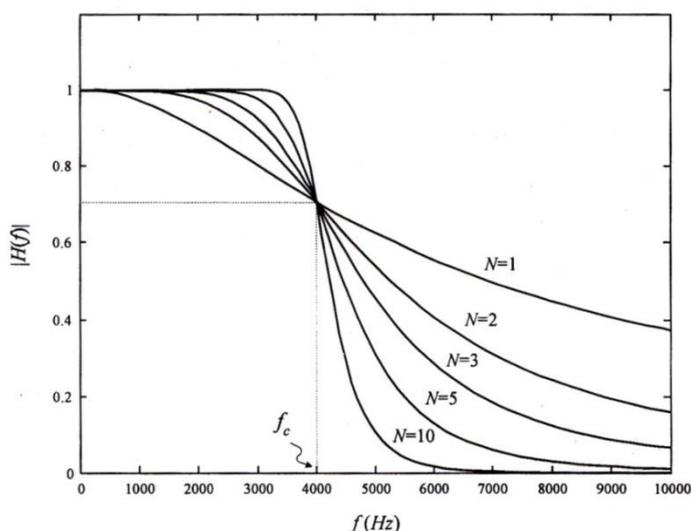
วงจรรองผ่านต่ำแบบแอคทีฟ คือ วงจรที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์ที่ต้องการไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นการทำงานของตัวอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ประเภททรานซิสเตอร์หรือไอซี

วงจรรองผ่านต่ำบัตเทอร์เวิร์ธ (Butterworth Low-Pass Filter) เป็นวงจรรองที่มีคุณลักษณะของฟังก์ชันโมโนโทนิก (Monotonic Function) เป็นวงจรที่ให้ผลตอบสนองทางความถี่ใกล้เคียงกับในทางทฤษฎีมากที่สุด เมื่อวงจรรองมีอันดับเพิ่มขึ้นอัตราขยายมีการเปลี่ยนแปลงได้รวดเร็ว และในช่วงแถบหยุดไม่มีการแกว่งตัวของอัตราขยาย (Maximally Flat) ดังภาพ 10 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงแอมพลิจูดของวงจรรองผ่านต่ำบัตเทอร์เวิร์ธอันดับต่างๆ ที่ได้ในทางปฏิบัติวงจรรองผ่านต่ำบัตเทอร์เวิร์ธอันดับที่ N (Nth Order Butterworth Lowpass Filter) มีผลตอบสนองเชิงแอมพลิจูด (amplitude response) ดังนี้

$$|H(f)| = \frac{G}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2N}}} \quad (2-10)$$

โดยที่ G คือ อัตราขยายแถบผ่าน (Passband Gain)

f_c คือ ความถี่ตัด (Cutoff Frequency) ของวงจรรอง



ภาพ 10 แสดงผลตอบสนองเชิงแอมพลิจูดของวงจรรองผ่านต่ำบัตเทอร์เวิร์ธ

วงจรรองผ่านต่ำบัตเทอร์เวิร์ธอันดับที่สอง (Second-Order Low-Pass Butterworth Filter) ในงานวิจัยนี้เป็นวงจรรองผ่านต่ำแบบแอกทิฟ ประกอบด้วยไอซีออปแอมป์มีความต้านทานและตัวเก็บประจุ ซึ่งมีวงจรดังภาพ 11 มีฟังก์ชันถ่ายโอนได้ว่า (Karki, J., 2000)

$$H(f) = \frac{K}{-\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + j\frac{1}{Q}\left(\frac{f}{f_c}\right) + 1} \quad (2-11)$$

ค่าองค์ประกอบคุณภาพ $Q = 0.707$ คำนวณได้จาก

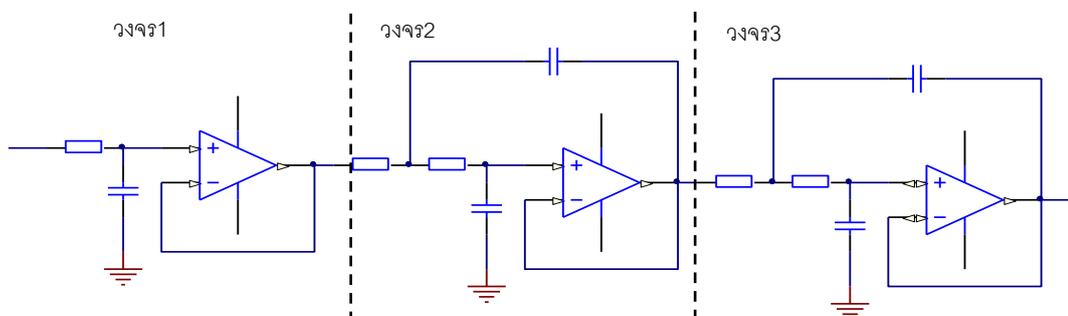
$$Q = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \sqrt{\frac{R_1(C_1 + C_2 + C_3)}{R_2 C_4}} \quad (2-12)$$

ความถี่คัตออฟ f_c คำนวณได้จาก

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 (C_1 + C_2 + C_3) C_4}} \quad (2-13)$$

แนวคิดในการเพิ่มอันดับของวงจร คือ การต่อวงจรรองเป็นแบบอนุกรม เช่น การต่อวงจรบัตเทอร์เวิร์ธอันดับที่ 5 ดังภาพ 11 มีฟังก์ชันถ่ายโอนได้ว่า

$$H(f) = \frac{K}{\left(\frac{jf}{f_c} + 1\right) \left(-\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + j\frac{1}{Q}\left(\frac{f}{f_c}\right) + 1\right) \left(-\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + j\frac{1}{Q}\left(\frac{f}{f_c}\right) + 1\right)} \quad (2-14)$$



ภาพ 11 แสดงวงจรบัตเทอร์เวิร์ธอันดับที่ 5

ตาราง 3 แสดงโครงสร้างการต่ออนุกรมของวงจรกรองผ่านต่ำอันดับที่ 5

วงจร	f_c	Q	K
1	$\frac{1}{2\pi RC}$	NA	1
2	$\frac{1}{2\pi\sqrt{R_{1a}R_{2a}C_{1a}C_{2a}}}$	$\frac{\sqrt{R_{1a}R_{2a}C_{1a}C_{2a}}}{R_{1a}C_{1a} + R_{2a}C_{1a}} = 0.618$	1
3	$\frac{1}{2\pi\sqrt{R_{1b}R_{2b}C_{1b}C_{2b}}}$	$\frac{\sqrt{R_{1b}R_{2b}C_{1b}C_{2b}}}{R_{1b}C_{1b} + R_{2b}C_{1b}} = 1.618$	1

การออกแบบวงจรกรองผลตอบสนองของอิมพัลส์อนันต์ (Design of Discrete-time IIR Filter)

วิธีการออกแบบตัวกรองอิมพัลส์อนันต์เวลาต่อเนื่อง มีสมการพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวกรองแบบต่างๆ เช่น ตัวกรองบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth) เชบปีเชป (Chebyshev) และอิลลิปติก (Elliptic) ซึ่งในการออกแบบจะทำการออกแบบตัวกรองในเวลาต่อเนื่องก่อนแล้วเปลี่ยนให้เป็นเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยมีตารางการปรับเปลี่ยนดังนี้ (วุฒิพงษ์ อารีกุล, 2548)

ตาราง 4 แสดงการปรับเปลี่ยนการออกแบบตัวกรองเวลาต่อเนื่องเป็นตัวกรองเวลาไม่ต่อเนื่อง

ลำดับ	ตัวกรองเวลาต่อเนื่อง (Continuous-time Filter)	ตัวกรองเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete-time Filter)
1	การแปลงลาปลาซ (Laplace Transform)	การแปลงซี (z Transform)
2	แกนจินตภาพของระนาบตัวแปรเชิงซ้อน (Imaginary Axis of the s-plane)	วงกลมหนึ่งหน่วยของระนาบตัวแปรเชิงซ้อน ซี (Unit Circle of the z-plane)
3	ความถี่เสถียรภาพ หรือโพลทางซ้ายมือของ แกนจินตภาพในระนาบตัวแปรเชิงซ้อน เอส	ความถี่เสถียรภาพและคอซอล หรือโพล ในวงกลมหนึ่งหน่วยในระนาบตัวแปร เชิงซ้อน

วงจรกรองด้วยวงจรกรองเชิงเส้นแบบย้อนกลับ (Linear recursive filter) โดยการประยุกต์ใช้วงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ทที่มีขนาดกำลังสอง ซึ่งวงจรมีผลตอบสนองของความถี่อยู่ในรูปของอัตราส่วนพหุนามที่อยู่ในรูปตัวแปร $e^{-j\omega}$ ดังสมการ (สุชาติ แย้มเม่น, 2553)

$$G(e^{j\omega}) = |H(e^{j\omega})|^2 = \frac{\tan^{2m}(\omega_c/2)}{\tan^{2m}(\omega_c/2) + \tan^{2m}(\omega/2)} \quad (2-15)$$

ฟังก์ชันแสดงให้เห็นถึงตัวกรองผ่านต่ำที่ความถี่ ω_c อันดับ m จากสมการที่ (2-15) สามารถแทน $\tan(\omega/2)$ ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันตรีโกณมิติ ดังนั้นผลลัพธ์ตัวกรองแบบย้อนกลับจึงกลายเป็น

$$G(e^{j\omega}) = \frac{(e^{j\omega} + 1)^{2m} \tan^{2m}(\omega_c/2)}{(e^{j\omega} + 1)^{2m} \tan^{2m}(\omega_c/2) + (-1)^m (e^{j\omega} - 1)^{2m}} \quad (2-16)$$

ซึ่งเรียกว่าฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มของลำดับจำกัดพลังงานที่สัมพันธ์สอดคล้องกับการแปลงแซดโดยการแทน $z = e^{j\omega}$ ดังนั้นในสมการที่ (2-16) จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$G(z) = \frac{(z+1)^{2m} \tan^{2m}(\omega_c/2)}{(z+1)^{2m} \tan^{2m}(\omega_c/2) + (-1)^m (z-1)^{2m}} \quad (2-17)$$

ฟังก์ชัน $G(z)$ มีซีโรอยู่ $2m$ ตัวที่ตำแหน่ง $z = -1$ และมีโพลอยู่ $2m$ ตัว ซึ่งสามารถหาโพลได้ดังนี้

$$z = \frac{1 - j2 \tan(\omega_c/2) \cos([2k-1]\pi/2m) - \tan^2(\omega_c/2)}{1 - 2 \tan(\omega_c/2) \sin([2k-1]\pi/2m) + \tan^2(\omega_c/2)} \quad (2-18)$$

เนื่องจาก $G(z^{-1}) = G(z)$ ดังนั้นโพลจำนวน m ตัวที่อยู่ภายในวงกลมหนึ่งหน่วยกำหนดได้ดังนี้

$$p_k = \frac{1 - 2 \tan(\omega_c/2) \sin([2k-1]\pi/2m) + \tan^2(\omega_c/2)}{1 - j2 \tan(\omega_c/2) \cos([2k-1]\pi/2m) - \tan^2(\omega_c/2)} \quad (2-19)$$

สำหรับ $k = 1, 2, 3, \dots, m$

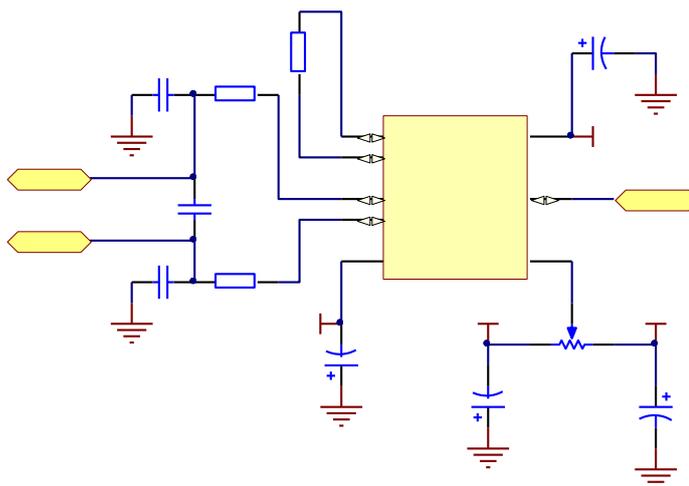
เนื่องจาก $G(z) = H(z)H(z^{-1})$ โดยที่ฟังก์ชัน $H(z)$ กำหนดได้ดังนี้

$$H(z) = \frac{\left(\prod_{k=1}^m \frac{(1-p_k)}{2} \right) (1+z^{-1})^m}{(1-p_1 z^{-1})(1-p_2 z^{-1}) \cdots (1-p_m z^{-1})} \quad (2-20)$$

ดังนั้น ฟังก์ชัน $H(z)$ มีความสอดคล้องกับความเสถียรภาพของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบย้อนกลับ

วงจรรขยายอินสตรูเมนเตชัน (Instrument Amplifier Circuit)

วงจรรขยายอินสตรูเมนท์ (Instrument Amplifier Circuit) เป็นวงจรรขยายสัญญาณในการวัดทางอุตสาหกรรมเป็นวงจรที่มีความสามารถในการขยายสัญญาณขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรรขยายอินสตรูเมนเตชัน เป็นวงจรรวม (Integrated Circuit: IC) สำเร็จรูปเบอร์ INA114 ดังที่แสดงไว้ในภาพ 12 ซึ่งเป็นวิธีการต่อเมื่อนำไปใช้งาน



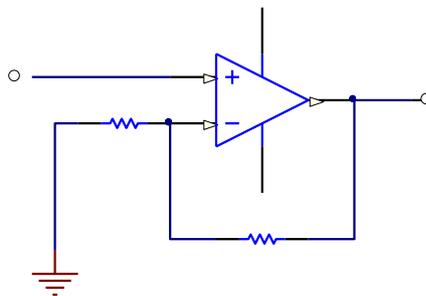
ภาพ 12 แสดงวงจรรขยายอินสตรูเมนเตชัน

ในงานวิจัยนี้ ออกแบบอัตราขยายเท่ากับ 501 เท่า หรือเลือกค่าความต้านทานภายนอกเท่ากับ 100 โอห์ม สามารถกำหนดอัตราขยายได้ด้วยสมการ (2-12)

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad (2-12)$$

R_G คือ ความต้านทานภายนอก

วงจรรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส เป็นวงจรรขยายที่มีคุณสมบัติ คือ เอาต์พุตที่ได้จะมีเฟสเดียวกันกับอินพุต ลักษณะการต่อใช้งานดังภาพ 13 อินพุตจะป้อนเข้าที่ขาบวกของออปแอมป์ สามารถคำนวณอัตราขยายได้ตามสมการ (2-13)



ภาพ 13 แสดงวงจรรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

ออกแบบให้ความต้านทาน R_2 เป็นความต้านทานแบบปรับค่าได้ เพื่อให้สามารถปรับค่าอัตราขยายได้ตามต้องการสามารถคำนวณอัตราขยายได้ดังนี้

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{in} \quad (2-13)$$

วิธีการสำหรับการประมาณค่าน้ำหนัก

สำหรับการประมวลผลสัญญาณ ได้พัฒนาวิธีการประมาณค่ามวลของมะม่วง จำนวน 4 วิธี คือ วิธีการหาค่าเฉลี่ย (Average Method; AVG) วิธีการหาค่าสูงสุด (Maximum Method; MAX) วิธีการหาค่าต่ำสุด (Minimum Method; MIN) และวิธีการหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด (Maximum-Minimum Average Method; MaxMin)

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบโปรแกรมพีแอลซีที่เริ่มเก็บข้อมูลมวลของมะม่วงจากสัญญาณไหลดเซลเมื่อมะม่วงอยู่บนสายพาน สมมุติว่าจำนวนมวลของมะม่วงที่จัดเก็บได้มีจำนวนทั้งหมด N ข้อมูล ซึ่งนิยามได้ว่า

$$x[n] = \{x[0], x[1], x[2], \dots, x[N-1]\} \quad (2-14)$$

โดยที่ $x[n]$ คือ มวลของมะม่วงที่จัดเก็บในแต่ละ n ครั้ง ซึ่งมีการจัดเก็บข้อมูลทั้งหมด N ครั้งและ $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

ถ้าใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ย (Average Method; AVG) สำหรับการประมาณค่ามวลของมะม่วงที่ได้รับลำดับข้อมูลจากสมการที่ (2-14) แล้วสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของมวลมะม่วงได้ว่า

$$\hat{x}_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \quad (2-15)$$

ถ้าใช้วิธีการหาค่าสูงสุด (Maximum Method; MAX) สำหรับการประมาณค่ามวลของมะม่วงที่ได้รับลำดับข้อมูลจากสมการที่ (2-14) แล้วสามารถคำนวณค่าสูงสุดของมวลมะม่วงได้ว่า

$$\hat{x}_{max} = \max \{x[0], x[1], x[2], \dots, x[N - 1]\} \quad (2-16)$$

ถ้าใช้วิธีการหาค่าต่ำสุด (Minimum Method; MIN) สำหรับการประมาณค่ามวลของมะม่วงที่ได้รับลำดับข้อมูลจากสมการที่ (2-14) แล้วสามารถคำนวณค่าต่ำสุดของมวลมะม่วงได้ว่า

$$\hat{x}_{min} = \min \{x[0], x[1], x[2], \dots, x[N - 1]\} \quad (2-17)$$

ถ้าใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด (Maximum-Minimum Average Method; MaxMin) สำหรับการประมาณค่ามวลของมะม่วงที่ได้รับลำดับข้อมูลจากสมการที่ (2-14) แล้วสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดของมวลมะม่วงได้ว่า

$$\hat{x}_{MaxMin} = \frac{\hat{x}_{max} + \hat{x}_{min}}{2} \quad (2-18)$$