

รายการอ้างอิง

- Alan Pugh, "**Robot Sensors Volume 2, Tactile and Non-Vision**", IFS(Publications) Ltd. UK, 1986
- A. Kent Stiffler, "**Design with Microprocessors for Mechanical Engineers**", McGraw-Hill Book Company , 1992.
- C.C. Perry, H.R. Lissner, "**The Strain Gage Primer**", McGraw-Hill Book Company , 1962.
- Dechaumphai P., "**Finite Element Method in Engineering**", Chulalongkorn University, 1994.
- Ernest O. Doebelin, "**Measurement Systems: Application and Design**", McGraw-Hill Book Company , 1990.
- J. Michael Jacob, "**Industrail control electronics: Applications and Design**", Prentice-Hall Inc , 1988.
- John G. Bollinger, Neik A. Duffie, "**Computer Control of Machines and Process**", Addison-Wesley Publishing company , 1988.
- J.N. Reddy, "**An Introduction to The Finite Element Method**", McGraw-Hill Book Company , 1987
- K.S. Fu, R.C. Gonzalez, C.S.G. Lee, "**Control,Sensing,Vision, and Intelligence**", McGraw-Hill Book Company , 1987
- Kenneth H. Huebner, Earl A. Thornton, "**The Finite Element Method for Engineering** ", 2nd edition , John Wileys and Sons, 1982
- Richard D. Klafter, Thomas A.Chmielewski, Michael Negin, "**Robotic Engineering: An integrated approach**", Prentice-Hall Inc , 1989.
- Schuler-McNamee, "**Modern Industrial Electronics**", McGraw-Hill Book Company, 1993.

Stephen C. Gates, Jordan Becker, "**Laboratory Automation Using The IBM PC**",
Prentice-Hall Inc , 1989.

Wesley E. Snyder, "**Industrail Robots: Interfacing and Control**", Prentice-Hall Inc,
1985.

William J. Palm, "**Control Systems Engineerings**", John Wileys and Sons, 1982



ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การตรวจวัดและลดสัญญาณรบกวน

ในปัจจุบันนี้ขณะที่ชิ้นส่วนประกอบของเครื่องคอมพิวเตอร์มีราคาลดลง ทำงานได้เร็วขึ้นและสามารถทำงานได้หลายอย่าง แต่ข้อจำกัดในเรื่องประสิทธิภาพและความถูกต้องแม่นยำของการส่งผ่านข้อมูลเพื่อการสื่อสารและส่งข้อมูลเพื่อการควบคุมระบบยังเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา ข้อจำกัดในเรื่องประสิทธิภาพและความถูกต้องแม่นยำของอุปกรณ์มีสาเหตุสำคัญเกิดจากสิ่งที่เรียกว่า สัญญาณรบกวน (noise) ตัวอย่างเช่น เราไม่จำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณ 16 บิต ซึ่งมีความถูกต้อง 0.01 เปอร์เซ็นต์ กับเครื่องคอมพิวเตอร์ของเรา ถ้าระบบที่เราทำการวัดค่านั้นความต่างศักย์มีค่าของสัญญาณรบกวน ประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ ในสถานะเช่นนี้ 12 บิต จะมีความเหมาะสมกว่าเพราะจะให้ค่าความถูกต้องที่ใกล้เคียงกันกับแบบ 16 บิต

สัญญาณรบกวน สามารถแสดงความหมายได้ว่าเป็น สัญญาณใดๆที่ประกอบรวมเข้าไปกับสัญญาณที่เราสนใจที่จะวัด โดยทั่วไปแล้วสาเหตุหลักๆของการเกิด สัญญาณรบกวน ที่พบในห้องทดลอง มีด้วยกัน 3 สาเหตุด้วยกัน คือ interfering signal ,drift noise และ device noise

1. **อินเตอร์เฟอริง ซิกแนล (Interfering signal)** จะเป็นการรบกวนกันของสัญญาณต่างๆที่เราไม่สนใจเข้ากับ สัญญาณที่เราต้องการวัด ตัวอย่างเช่น ห้องทดลองที่อยู่ติดกับลิฟท์ขนส่ง เมื่อลิฟท์ทำงานจะเกิด เคอเรนจ์เซิร์จ (current surge) ขึ้นที่สายไฟฟ้า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากเคอเรนจ์เซิร์จ นี้จะเข้าไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์วัดทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำให้การวัดโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ผิดพลาดไปจากที่ควรจะเป็นในขณะที่ลิฟท์กำลังทำงาน ตัวอย่างอื่นเช่น สายไฟฟ้าเข้ามอเตอร์ต่างๆ สายไฟของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลรบกวนต่อการทดลองได้ทั้งสิ้น

2. **ดริฟท์นอยส์ (Drift noise)** เกิดขึ้นเนื่องจากเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เสถียรภาพในการวัดเมื่อทำการวัดในช่วงเวลานาน เช่น แอมป์ลิฟายเออร์ หม้อแปลงไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สาเหตุสำคัญเกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและสภาพแวดล้อม

3. **ดีไวซ์ นอยส์ (Device noise)** ส่วนใหญ่แล้วจะเกิดกับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ มีสาเหตุเนื่องมาจาก การนำไฟฟ้าของตัวนำหรืออุปกรณ์ที่ใช้ การชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคอื่นๆในตัวนำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ บางทีเรียกสัญญาณรบกวนแบบนี้ว่า ช็อตนอยส์ (shot noise) ซึ่งการวิเคราะห์สัญญาณรบกวน แบบนี้สามารถทำได้โดยวิธีการทางสถิติศาสตร์

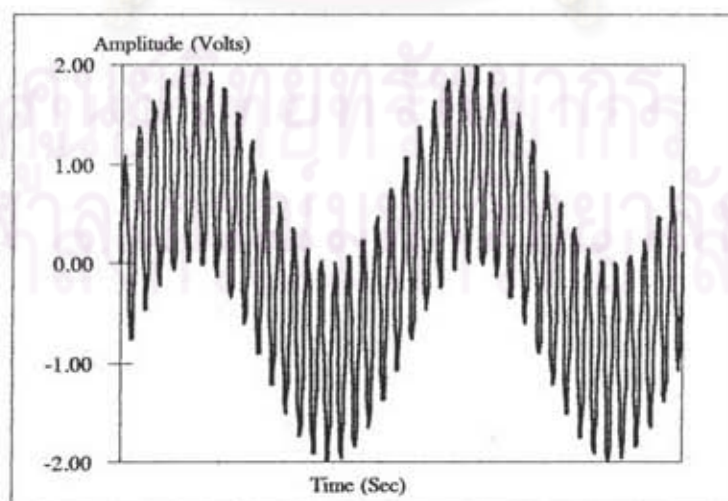
เพื่อต้องการความถูกต้องแม่นยำในการวัดค่า การตอบสนองทางความถี่ และประสิทธิภาพของการสื่อสารข้อมูล เราจำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับชนิดของสัญญาณรบกวน ที่เราต้องการกำจัดและหลังจากนั้นเราสามารถใช่วิธีการหลายๆแบบในการวัดขนาดหรือประมาณค่าระดับของสัญญาณรบกวน และเลือกใช่วิธีการที่เหมาะสมในการกำจัดต่อไป

การจำแนกชนิดของสัญญาณรบกวน

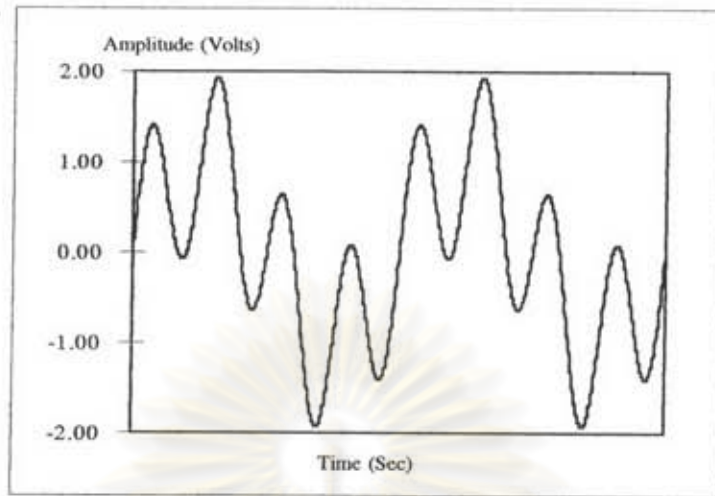
การจำแนกชนิดของสัญญาณรบกวน มีตัวแปรสองตัวที่ใช้ในการพิจารณาคือ แอมพลิจูด (amplitude) หรือพลังงานของสัญญาณรบกวน และการกระจายของความถี่ (frequency distribution) ขนาดของแอมพลิจูดนิยามวัดขนาดในหน่วยของโวลต์และความถี่นิยามวัดในหน่วยของเฮิร์ต (Hertz cycle/sec) โดยสัญญาณรบกวนและสัญญาณที่ทำการวัดต้องอยู่ในหน่วยเดียวกัน จากการพล็อตกราฟแสดงแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณและสัญญาณรบกวนเราก็จะสามารถแยกเห็นความแตกต่างระหว่างสัญญาณรบกวนและสัญญาณที่เราสนใจได้

การวิเคราะห์ทางความถี่ (frequency domain analysis)

การวิเคราะห์โดยการเขียนกราฟระหว่างแอมพลิจูดและเวลาเราเรียกว่าการแสดงผลสัญญาณในรูป time domain representation จากรูปที่ ก.1 แสดงสัญญาณรูปไซน์ (sine wave) ที่มีสัญญาณรบกวนความถี่สูงเป็นองค์ประกอบ ในกรณีนี้ความถี่ของสัญญาณทั้งสองแตกต่างกันมากทำให้เราสามารถแยกสัญญาณทั้งสองได้ง่ายซึ่งขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณทั้งสองก็สามารถอ่านได้โดยตรงจากกราฟ ในรูปที่ ก.2 แสดงสัญญาณรูปไซน์ ที่มีความถี่ 8 เฮิร์ตผสมกับสัญญาณรบกวนที่มีความถี่ 10 เฮิร์ต ในกรณีนี้สัญญาณทั้งสองมีความถี่ใกล้เคียงกันมากจนเราไม่สามารถทำการแยกสัญญาณทั้งสองเมื่อเราพิจารณาจากกราฟได้



รูปที่ ก.1 Time Domain Graph of Noisy Sine Wave



รูปที่ ก.2 Time Domain Graph of Interfering Noise

สัญญาณต่างๆในห้องทดลองจะประกอบด้วยสัญญาณที่มีความถี่แตกต่างกันหลายค่าที่เราสนใจ และขณะเดียวกันสัญญาณรบกวน ก็จะมีการกระจายอยู่ทุกช่วงความถี่ ในการคำนวณหาลักษณะของแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนในแต่ละความถี่ เราต้องทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูป frequency domain โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า สเปกตรัมอนาลิเซอร์ (spectrum analyzers) แปลงไปอยู่ในรูปของแอมพลิจูดกับความถี่ในช่วงเวลาใดๆ แต่เราสามารถทำการแปลงได้จากการใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) และวิธีการดิจิทัลฟิลเตอร์ (digital filter) ซึ่งจะไม่ขอกล่าวในที่นี้

Signal-to Noise Ratio

เพื่อต้องการวัด noise intensity วิธีการที่จะแสดงทำได้โดยการบอกในรูป signal-to noise ratio (SNR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง signal power (P_S) กับ noise power (P_N)

$$\text{Signal to noise ratio (SNR)} = P_S / P_N$$

พลังงานอาจเขียนในรูปของ กระแสและความต่างศักย์ได้ดังนี้

$$\text{Power (P)} = VI = \frac{V^2}{R} = I^2 R$$

และเนื่องจากสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเนื่องจากหลายสาเหตุเพราะฉะนั้นพลังงานของสัญญาณรบกวน จะเป็นผลรวมจากแต่ละแหล่งของพลังงาน ซึ่งเราสามารถเขียนในรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\text{Signal to Noise Ratio (SNR)} = \frac{P_s}{P_{n1} + P_{n2} + \dots + P_{nx}}$$

และโดยทั่วไปจะเขียนในรูปของลอการิทึมหรือเดซิเบล

$$\text{Signal to Noise Ratio (SNR)} = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \text{ (dB)}$$

ถ้ากระแสที่ไหลมีค่าคงที่(ตัวนำตัวเดียวกัน) สามารถเขียนในรูปความต่างศักย์ได้ดังนี้

$$\text{Signal to Noise Ratio (SNR)} = 10 \log \left(\frac{V_s}{V_n} \right) \text{ (dB)}$$

ค่า SNR ควรมีค่ามากกว่าหนึ่ง ซึ่งยิ่งมากเท่าใดการตรวจวัดค่าสัญญาณก็จะทำได้ง่ายมากเท่านั้น
สัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดภายใน

โดยปกติแล้วในการวัดสัญญาณที่ไม่ต้องการความละเอียดมากนักเช่นการวัดด้วยอุปกรณ์แปลงสัญญาณขนาด 8 บิต สัญญาณรบกวนจะไม่มีผลต่อการวัดมากนัก ซึ่งมันจะไปเกี่ยวข้องกับ การวัดที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น การวัดด้วยอุปกรณ์แปลงสัญญาณขนาด 12 บิตและ 16 บิต เนื่องจากค่าของสัญญาณรบกวนจะเป็นผลรวมจากสัญญาณรบกวนแต่ละแหล่งดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาและวิเคราะห์ถึงแหล่งกำเนิดและชนิดของสัญญาณรบกวนชนิดใดที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อระบบ เพื่อหาทางลดหรือกำจัดออกไป ดังนั้นเราจำเป็นต้องศึกษาถึงแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในของระบบ ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1. **พาสซีฟเทอร์มัลนอยส์ (Passive Thermal Noise)** อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพาสซีฟบางประเภท เช่น ตัวเก็บประจุ สามารถทำให้เกิด คริฟท์นอยส์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงค่าไปตามอุณหภูมิหรือตัวนำที่มีคุณสมบัติคล้ายเป็นตัวรับสัญญาณสนามแม่เหล็กและทำให้เกิดกระแสของสัญญาณรบกวน ขึ้นในระบบได้เช่นกัน และโดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวความต้านทานจะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นในระบบ เนื่องจากกระแสของอิเล็กตรอนวิ่งชนกับวัสดุความต้านทานทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เรียกว่าเทอร์มัลนอยส์ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ค่าความต้านทาน และความถี่
2. **แรนดอมชอร์ตนอยส์ (Random Shot Noise)** สัญญาณรบกวนชนิดนี้เกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนภายในตัวความต้านทานที่นำกระแสไฟที่กระแสตรง ซึ่งรู้จักกันในชื่อ ช็อตคีย์ (Shottky) ซึ่งขึ้นอยู่กับ กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานนั้น และผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

เนื่องจากความต้านทานจะเป็นผลรวมแบบเวกเตอร์ของเทอร์มัลนอยส์และแรนคอมนอยส์ ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิและกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน ก็จะสามารถควบคุมสัญญาณรบกวนให้มีค่าน้อยลงได้

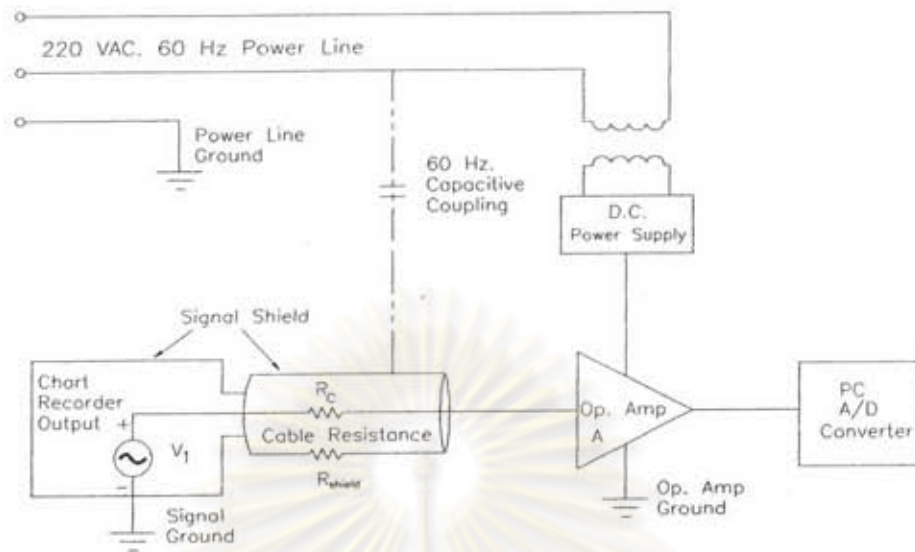
3. **แอกทีฟเทอร์มัลนอยส์ (Active Thermal Noise)** อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบแอคทีฟ เช่น ออปแอมป์ ทรานซิสเตอร์ ไดโอด จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และทำให้เกิดสัญญาณรบกวนได้ง่ายโดยเฉพาะอุปกรณ์แปลงสัญญาณ A/D ซึ่งประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์และไดโอดจำนวนมาก ซึ่งในการพิจารณาเลือกใช้ควรเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพสูง มีการชดเชยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ก็จะทำให้ปัญหาลดน้อยลงได้

4. **เอทาคอนไทเซชันนอยส์ (A/D Quantization Noise)** สัญญาณรบกวนชนิดนี้มีสาเหตุเนื่องจากการวัดค่าแบบอนาล็อกด้วยวิธีการแบบดิจิทัล ซึ่งจะทำให้ขาดความละเอียดในการวัด และการแก้ไขก็ทำได้โดยการใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณ A/D ที่มีความละเอียดมากขึ้น หรือใช้วิธีการดิจิทัลฟิลเตอร์ (digital filter) ก็จะทำให้สามารถวัดค่าสัญญาณได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

สัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดภายนอก

สัญญาณรบกวนนอกจากจะเกิดภายในระบบแล้วยังสามารถเกิดจากสาเหตุภายนอกด้วย เช่น สัญญาณรบกวนจากเครื่องมือชนิดอื่น มอเตอร์ แสงฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะแบ่งออกได้สองประเภทคือ อิเล็กตริกนอยส์ (Electric noise) เกิดเนื่องจากการคับปลิงระหว่างสนามไฟฟ้ากับสายสัญญาณของระบบหรือเครื่องมือวัด และอีกประเภทคือ แมกเนติกนอยส์ (Magnetic noise) เกิดเนื่องจากการกระแสนำในสายสัญญาณที่วางอยู่ใกล้อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า ในการกำจัดหรือลดสัญญาณรบกวนเหล่านี้สามารถทำได้โดยการ แยกไม่ให้สัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบได้ ซึ่งมีวิธีการต่างๆดังต่อไปนี้

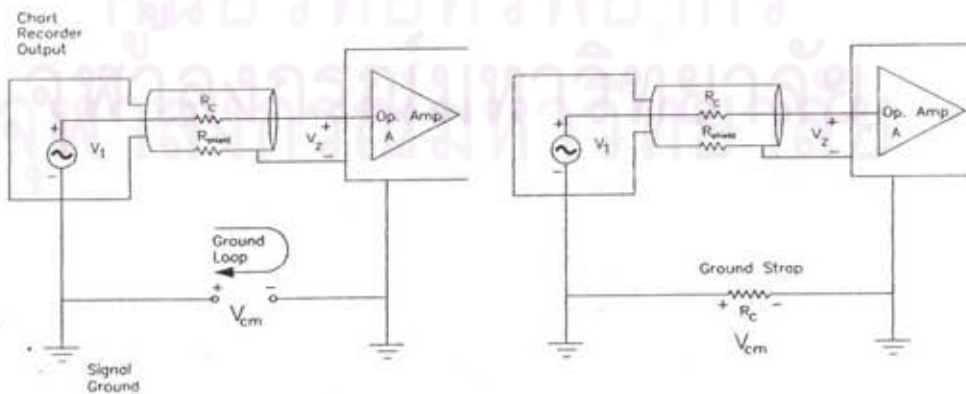
1. **การชิลด์ (Shielding)** การชิลด์ทำได้โดยการใช้วัสดุเหล็กแผ่นบางห่อหุ้มสายสัญญาณก่อนที่จะเข้าออปแอมป์ ตามรูปที่ ก.3 โดยแผ่นชิลด์จะถูกต่อเข้ากับกราวด์ของเครื่องมือวัดซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ไปลดคาปาซิทีฟคับปลิงระหว่างสายไฟฟ้ากำลังกับสายสัญญาณของระบบ และเป็นการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดเนื่องจากความถี่ของระบบไฟฟ้าที่เราใช้ (Line frequency noise) โดยทั่วไปแล้วเราควรกราวด์แผ่นชิลด์ที่จุดที่จะเกิดสัญญาณรบกวนมากที่สุด ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์ตรวจวัด



รูปที่ ก.3 การชิลด์

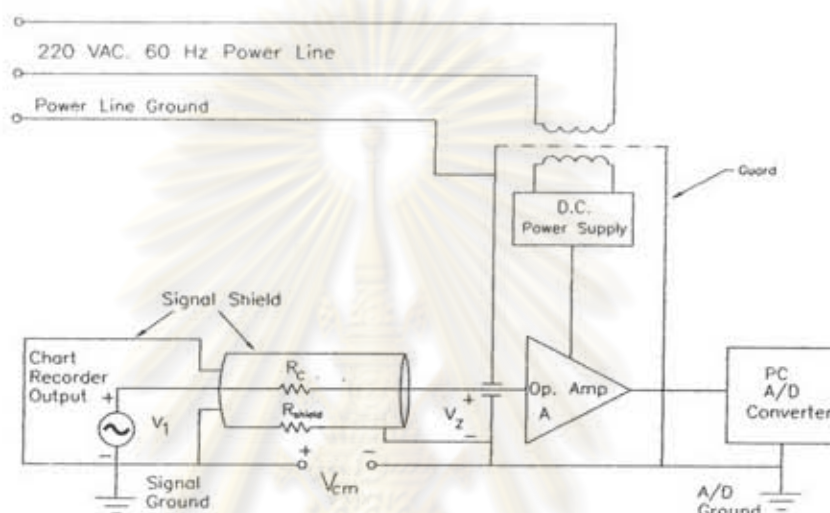
(Transducer) ที่ใช้ และถึงแม้ว่าการชิลด์จะไม่สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนได้ทั้งหมดแต่ก็สามารถลดสัญญาณรบกวนได้ประมาณ 100 ถึง 1000 เท่า

2. ป้องกันการเกิดกราวด์ลูป(Avoiding Ground Loops) ปรากฏการณ์กราวด์ลูปเกิดเนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่น ความต้านทานของสายสัญญาณที่ใช้ระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณกับเครื่องมือที่ใช้วัดค่ามีความยาวซึ่งความต่างศักย์ของกราวด์นี้จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กัน ทำให้เกิดความศักย์ตกคร่อมในสายสัญญาณ(common mode voltage, V_{cm}) ได้ และเมื่อทำการวัดค่าก็จะผิดพลาดไป นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลในสายสัญญาณที่มีความยาวได้ ในการแก้ไขกราวด์ลูปทำได้โดยการใช้ตัวนำที่มีขนาดใหญ่(ความต้านทานต่ำ) ต่อระหว่างกราวด์ทั้งสอง ตามรูปที่ ก.4 เพื่อลดความต่างศักย์ตกคร่อม



รูปที่ ก.4 การเกิดกราวด์ลูปและการแก้ไข

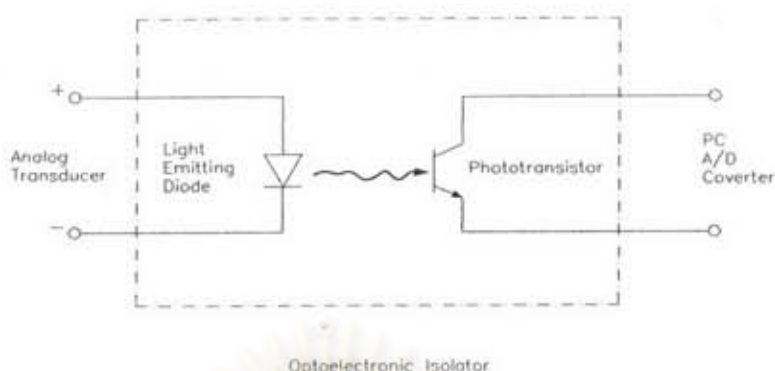
3. **การ์ดและออปติคัลไอโซเลชัน (Guards and Optical Isolation)** การ์ดคือการชิลด์ที่ต่อโดยตรงกับ V_{cm} ระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณและอุปกรณ์วัดแปลงสัญญาณ A/D แสดงตามรูปที่ ก.5 วิธีการนี้มีประสิทธิภาพสูงในการลดสัญญาณรบกวน วิธีการใช้งานทำได้โดยการติดตั้งการ์ดรอบวงจรรายและให้ความต่างศักย์ค่าหนึ่งแก่การ์ดนี้ ความต่างศักย์นี้จะทำให้ไม่เกิดกระแสไหลผ่านอิมพีแดนซ์แบบไม่สมมูลย์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณซึ่งเป็นสาเหตุของสัญญาณรบกวนได้



รูปที่ ก.5 การใช้การ์ด

อีกวิธีการหนึ่งคือการแยกอุปกรณ์โดยใช้อุปกรณ์ทางแสงที่เรียกว่า ออปโตอิเล็กทรอนิก ไอโซเลเตอร์ (optoelectronic isolator) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง (LED) และโฟโตทรานซิสเตอร์ (Photo transistor) ที่ติดตั้งใกล้เคียงกันตามรูปที่ ก.6 ในรูปของวงจรรวมไอซี (integrate circuit) โดยแสงจะมีความเข้มสว่างตามความต่างศักย์ไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดสัญญาณและแสงนี้จะไปกระตุ้นขาเบสของทรานซิสเตอร์ให้นำกระแส และทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ วิธีการนี้จะเป็นการแยกแหล่งกำเนิดสัญญาณออกจากอุปกรณ์ตรวจวัดทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งาน และเป็นการลดสัญญาณรบกวนต่างๆออกไปด้วย

5. **การเลือกใช้สายสัญญาณให้เหมาะสม** สายสัญญาณที่ดีจะช่วยในการลดสัญญาณรบกวนออกจากระบบได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะสัญญาณอนาล็อกนั้นจะมีสัญญาณรบกวนเข้ามาเกี่ยวข้องกับตัวเสมอ วิธีการที่ง่ายในการพิจารณาคือสายต้องสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้และควรจะเป็นสายสัญญาณที่มีการชิลด์



รูปที่ ก.6 ออปติคัล ไอโซเลชัน

การกรองสัญญาณรบกวน

จากที่กล่าวมาแล้วจะเป็นการป้องกันและกำจัดสัญญาณรบกวนให้เกิดขึ้นและมีผลต่อระบบของเราน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณรบกวนก็ไม่สามารถกำจัดให้หมดไปได้อย่างแท้จริง วิธีการที่ช่วยในการกำจัดสัญญาณรบกวนในขั้นตอนต่อไปต้องใช้การกรอง หรือ ฟิลเตอร์ (Filter) ซึ่งเป็นการกำจัดสัญญาณรบกวนที่เราไม่ต้องการออกไป และให้เหลือเฉพาะสัญญาณที่เราต้องการ

การฟิลเตอร์สามารถทำได้ทั้งในทางฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ และโดยทั่วไปแล้วควรใช้วิธีการทั้งสองวิธีร่วมกัน ฮาร์ดแวร์ฟิลเตอร์จะให้การตอบสนองที่รวดเร็วเหมาะกับงานควบคุมและสามารถทำขึ้นจากอุปกรณ์ง่ายๆ เช่น วงจรกรองแบบ R-C ฟิเตอร์ (ดูบทที่ 3) ในขณะที่ซอฟต์แวร์ฟิลเตอร์จะมีความคล่องตัวเพราะสามารถเปลี่ยนค่าความถี่ที่จะทำการกรองได้ โดยส่วนใหญ่แล้วจะไม่เหมาะกับงานควบคุมเพราะการวิเคราะห์ต้องกระทำหลังจากการวัดและเก็บข้อมูลแล้ว แต่จะมีวิธีการที่เรียกว่า Moving Average (Convolution) ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายและรวดเร็ว สามารถนำไปใช้ในงานควบคุมได้ วิธีการแบบนี้จะทำการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละจุดจากจุดที่อยู่ข้างเคียง และสามารถเขียนในรูปสมการอนุกรมได้ดังนี้

$$X_n = \frac{\sum_{i=n-q}^{n+q} X_{i+1}}{2q+1}$$

X_n คือ ข้อมูลเฉลี่ยที่ได้

$2q+1$ คือ จำนวนของข้อมูลที่ต้องนำมาใช้ในการเฉลี่ย

ภาคผนวก ข

ความถดถอยเชิงเส้นตรงและสหสัมพันธ์ (Linear Regression and Corelation)

ความถดถอยเชิงเส้นตรง

ความถดถอยเชิงเส้นตรง หมายถึงความถดถอยของตัวแปรตาม Y ที่มีต่อตัวแปรอิสระ X และมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งอาจแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X ในรูปของตัวแบบเส้นตรงเชิงบวก ได้ดังนี้

$$Y_i = \beta_0 + \beta X_i + \varepsilon_i$$

โดยมีค่า β_0 เป็นค่าที่เส้นตรงตัดแกน Y และ β เป็นค่าความชันของเส้นตรง ค่า β นี้ในทางสถิติมีความหมายว่าเป็นค่าที่แสดงอัตราการเปลี่ยนค่าของ Y เมื่อ X เปลี่ยนค่าไป 1 หน่วย จึงมีชื่อเรียกว่า สัมประสิทธิ์ความถดถอย โดยจะมีค่ามากกว่า 0 เมื่อ Y มีความถดถอยไปในทางเดียวกันกับ X และมีค่าน้อยกว่า 0 เมื่อการเปลี่ยนแปลงของ Y มีความถดถอยไปในทางตรงข้ามกับ X ส่วนค่า ε เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นตัวแปรสุ่ม ซึ่งเป็นอิสระกับ X และ Y

ถ้าให้ค่าประมาณของ Y_i คือ $\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}X_i$ หรือเท่ากับ $Y_i = bX_i + a$ และ $\varepsilon_i = Y_i - \hat{Y}_i$ ค่า b และ a สามารถหาได้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method) ซึ่งหาได้โดยการหาค่าต่ำสุดของผลรวมของความคลาดเคลื่อน (ε_i) ยกกำลังสอง โดยใช้อนุพันธ์เชิงส่วน (partial derivative) ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial(\sum \varepsilon_i^2)}{\partial a} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\sum \varepsilon_i^2)}{\partial b} = 0 \quad (2)$$

จากสมการที่ 1

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum (Y_i - (a + bX_i))^2 = \sum 2(Y_i - (a + bX_i))(-1) = 0$$

จะได้

$$\sum Y_i - \sum (a + bX_i) = 0$$

$$\sum Y_i = an + \sum bX_i$$

$$\bar{Y} = a + b\bar{X} \quad (3)$$

จากสมการที่ 2

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum (Y_i - (a + bX_i))^2 = \sum 2(Y_i - (a + bX_i))(-X_i) = 0$$

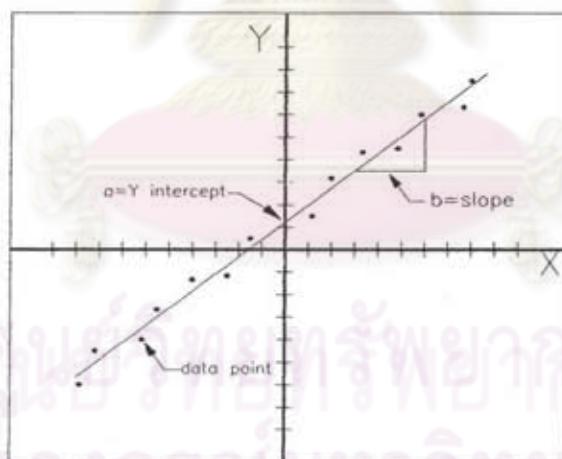
$$\sum (-X_i Y_i + aX_i + bX_i^2) = 0$$

$$\sum X_i Y_i = a \sum X_i + b \sum X_i^2$$

$$b = \frac{\sum X_i Y_i - a \sum X_i}{\sum X_i^2}$$

$$b = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

ค่าความชันโดยประมาณ b จะแสดงโดยสมการที่ 4 ส่วนจุดตัดแกน Y ค่า a จะแสดงด้วยสมการที่ 3



รูปที่ ๗.1 Least square fit

ดัชนีชี้ความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y

ในกรณีอย่างง่าย (simple correlation) ที่มีตัวแปร 2 ตัว สามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$R^2 = \frac{(\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5)$$

ค่า R จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด
ถ้า ค่า R เข้าใกล้ 1 หรือ -1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันมาก และถ้าเข้าใกล้ 0 ก็มีความสัมพันธ์
กันน้อย โดยทางด้านบวกจะแสดงว่ามีความสัมพันธ์ตามกัน ขณะที่ทางด้านลบจะแสดงความ
สัมพันธ์ตรงข้ามกัน



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
การควบคุมแบบไฮบริด
(HYBRID CONTROL)

ในการทำงานบางอย่างเรามีความจำเป็นต้องการควบคุมที่ต้องอาศัยการควบคุมทั้งตำแหน่งและแรงไปพร้อมๆกัน ซึ่งวิธีการควบคุมแบบนี้เรียกว่า การควบคุมแบบไฮบริด (Hybrid control) ลักษณะของการควบคุมจะให้แรงมีการควบคุมในทิศทางที่แน่นอนอันหนึ่งและให้การควบคุมตำแหน่งทำในทิศทางที่เหลือ(เมสัน 1983)

ทิศทางที่เราสนใจนั้นหมายถึงทิศทางในระบบคาร์ทีเซียนโคออร์ดิเนต(Cartesian coordinate) ซึ่งไม่จำเป็นที่จะต้องเหมือนกับระบบของแกนหุ่นยนต์หรือตัวเซนเซอร์ แต่จะอยู่ในคาร์ทีเซียนเฟรม ที่มีลักษณะที่สัมพันธ์กับงานที่จะทำ ทากะฮะ อิโนอุ และ ฮากิวาระ (1974) ได้ให้นิยามถึงการนำแรงเข้ามาเกี่ยวข้องกับคาร์ทีเซียน เฟรม ซึ่ง พอลสัน(1981) ได้เรียกเฟรมแบบนี้ว่า คอนสเตรนทเฟรม (constraint frame) และได้ให้สัญลักษณ์แทนด้วย [C]

ในการควบคุมแบบไฮบริดนั้น อุปกรณ์ทำงานแต่ละตัวจะได้รับสัญญาณควบคุมซึ่งมาจากหลายๆสัญญาณ เช่นมาจาก การคุมแรงและมาจากควบคุมตำแหน่ง โรท์เบิร์ต และ เครก (1981) ได้อธิบายการควบคุมแบบนี้โดยเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$T_i = \sum_{j=1}^N \{ \Gamma_{ij} [s_j \Delta f_j] + \Psi_{ij} [(1-s_j) \Delta x_j] \}$$

เมื่อ

T_i = แรงบิดที่กระทำโดยอุปกรณ์ทำงานตัวที่ i th

Δf_j = ความแตกต่างของแรงในทิศทาง j th ของ [C]

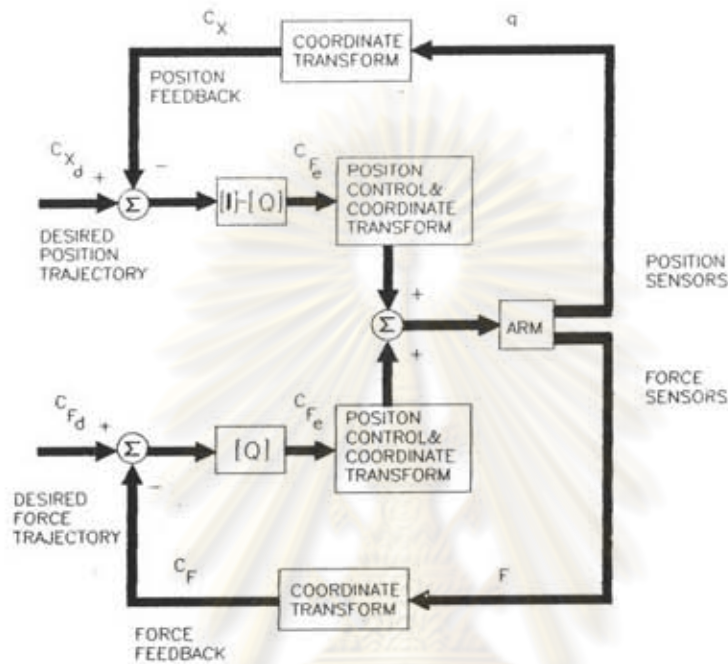
Δx_j = ความแตกต่างทางตำแหน่งในทิศทาง j th ของ [C]

Γ_{ij} = ฟังก์ชันการชดเชยแรง สำหรับ j th อินพุต และ i th เอาท์พุต

Ψ_{ij} = ฟังก์ชันการชดเชยตำแหน่ง สำหรับ j th อินพุต และ i th เอาท์พุต

s_j = ค่าในการเลือกการควบคุม

ค่าของ s_j จะอยู่ในรูปของ 0 และ 1 ซึ่งจะใช้ในการเลือกการควบคุม ว่าในทิศทางใดจะใช้การควบคุมแรง ค่า $s_j = 1$ และในทิศทางใดจะใช้การควบคุมแบบตำแหน่ง $s_j = 0$ ซึ่งรูปแบบของการควบคุมแบบไฮบริดจะแสดงตามรูป



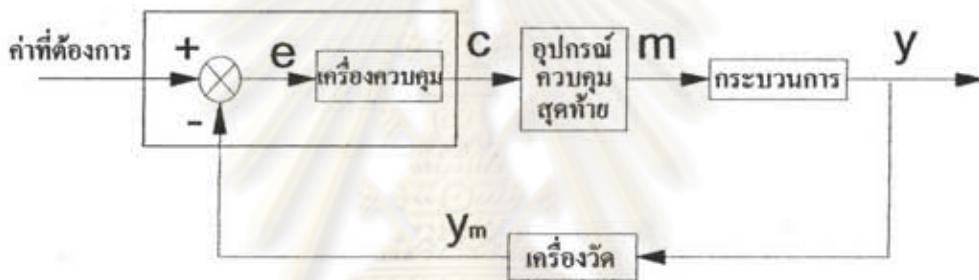
รูปที่ ๓.1 แผนภาพการควบคุมแบบไฮบริด

การควบคุมแบบมีการป้อนกลับแต่ละลูปจะเป็นอิสระต่อกันซึ่งแต่ละลูปก็จะให้สัญญาณเข้ามาที่อุปกรณ์ทำงาน สัญลักษณ์ C หมายถึงการอ้างอิงเทียบกับคอนสเตรนต์เฟรม ลูปด้านบนจะเป็นการควบคุมตำแหน่ง ส่วนลูปด้านล่างจะเป็นการควบคุมแรง พิจารณาที่การควบคุมแรง ค่าของแรงจริงที่วัดได้จาก force sensor F ลบกับค่าแรงที่ต้องการ F_d จะให้ค่าความแตกต่าง F_e ซึ่งค่าความแตกต่างนี้จะประกอบด้วยแรง 3 แนวแกน และ โมเมนต์ 3 แนวแกน จากความแตกต่างนี้จะผ่านบล็อก $[Q]$ ที่ทำหน้าที่คัดส่วนประกอบของแรงในทิศทางที่ไม่ใช้ในการควบคุมออกไป โดยการปรับให้เป็นศูนย์ ก่อนที่จะผ่านไปที โคออร์ดิเนต ทรานส์ฟอร์ม บล็อก ซึ่งจะทำหน้าที่คำนวณแปลงเป็นขนาดของแรงบิดที่ต้องกระทำในแต่ละข้อต่อ แล้วก็จะไปรวมกับแรงบิดแต่ละข้อต่อที่ได้จากการควบคุมทางตำแหน่ง ซึ่งก็จะส่งออกเป็นสัญญาณไปควบคุมแต่ละอุปกรณ์ทำงานต่อไป

ภาคผนวก ง

การควบคุมแบบ PID

ในการควบคุมการปรับสมดุลของวงจรบริดจ์เราจะใช้การควบคุมแบบที่เรียกว่าระบบวงปิด(closed loop) ซึ่งมีผังสัญญาณของระบบควบคุม แสดงในรูปที่ 1 โดยตัวแปรออกที่เราต้องการคือค่าเอาต์พุตที่ได้จากวงจรบริดจ์(ต้องการควบคุมให้เท่ากับศูนย์) และตัวแปรเข้าคือตัวแปรปรับกระบวนการ(สัญญาณควบคุมมอเตอร์) โดยในการควบคุมเราจะใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องควบคุมแบบ PID ซึ่งสามารถโปรแกรมให้อ่านค่าและนำค่าคลาดเคลื่อน(error) มาคำนวณหาค่าตัวแปรปรับกระบวนการ เพื่อปรับสภาพของกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายตามที่เรต้องการ



รูปที่ ง.1 ผังสัญญาณของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

โดยทั่วไปการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์จะทำงานตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เครื่องวัดตรวจสอบสภาพและวัดค่าตัวแปรกระบวนการ ในกรณีนี้คือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากวงจรบริดจ์

2. คำนวณค่าคลาดเคลื่อน e_n จากสมการ

$$e_n = r_n - c_n \quad (1)$$

เมื่อ r_n คือค่าที่ต้องการ ที่เก็บในคอมพิวเตอร์

3. คำนวณหาค่าของตัวแปรปรับกระบวนการ $m(t)$

4. ส่งค่าตัวแปรปรับกระบวนการให้กับอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (ในกรณีนี้คืออุปกรณ์ขยายกำลัง)

5. ดำเนินการแบบเดิมโดยทำการตรวจสอบสภาพของตัวแปรกระบวนการ

ช่วงเวลาในการคำนวณหาค่าตัวแปรปรับกระบวนการจะมีระชเวลาน้อยมากเมื่อเทียบช่วงระยะเวลาในการอ่านค่า ดังนั้นเราจึงสามารถพิจารณาได้ว่าค่าตัวแปรปรับกระบวนการจะมีลักษณะต่อเนื่องและสำหรับการใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมจะต้องมีรูปแบบของการคำนวณเพื่อให้

สามารถทำการคำนวณได้อย่างสะดวก รูปแบบที่ใช้จะมีลักษณะดังนี้

$$m_n - m_{n-1} = K_0 e_n + K_1 e_{n-1} + K_2 e_{n-2} + \dots \quad (2)$$

การหาค่าตัวแปรควบคุม

1. การควบคุมแบบ Proportional control

สำหรับการควบคุมแบบพรอพอซันนัล ค่าควบคุมจะเป็นอัตราส่วนกับค่าความผิดพลาด (error) ดังนี้

$$m(t) = K_p e(t) \quad (2)$$

เมื่อค่า K_p คือค่าที่การควบคุมหรือค่าเกน สมการที่ 2 สามารถเขียนในรูปดิครีตได้ดังนี้

$$m_n = K_p e_n \quad (3)$$

เลื่อนสมการนี้ถอยกลับ 1 คาบของการตรวจวัดจะได้

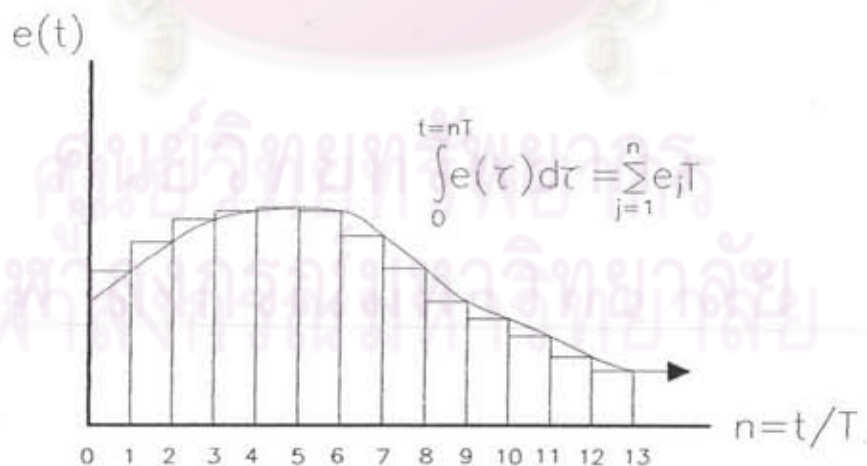
$$m_{n-1} = K_p e_{n-1} \quad (4)$$

ลบสมการที่ 4 จากสมการที่ 3 จะได้ในรูปสมการ

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = K_p (e_n - e_{n-1}) \quad (5)$$

2. การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral control)

สำหรับการควบคุมแบบอินทิกรัล ค่าควบคุมจะเป็นอัตราส่วนกับการอินทิเกรตค่าผิดพลาดเทียบกับเวลา แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 การอินทิเกรตแบบดิครีต

$$m(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (6)$$

เมื่อค่า K_i คือค่าคงที่ของการควบคุม(ค่าเกน)แบบอินทิกรัล ซึ่งสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 1 พื้นที่ใต้กราฟค่าผิดพลาดแบบต่อเนื่อง สามารถแทนได้ด้วยพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งแต่ละอันนั้นสามารถจะคำนวณได้จากค่าผิดพลาดแบบคิสิกรีต e_j และช่วงเวลาการวัดค่า T ดังนี้

$$m_n = K_i \sum_{j=1}^n T e_j \quad (7)$$

สามารถเขียนได้ในรูป

$$m_n = K_i \sum_{j=1}^{n-1} T e_j + K_i T e_n \quad (8)$$

จากสมการที่ 7

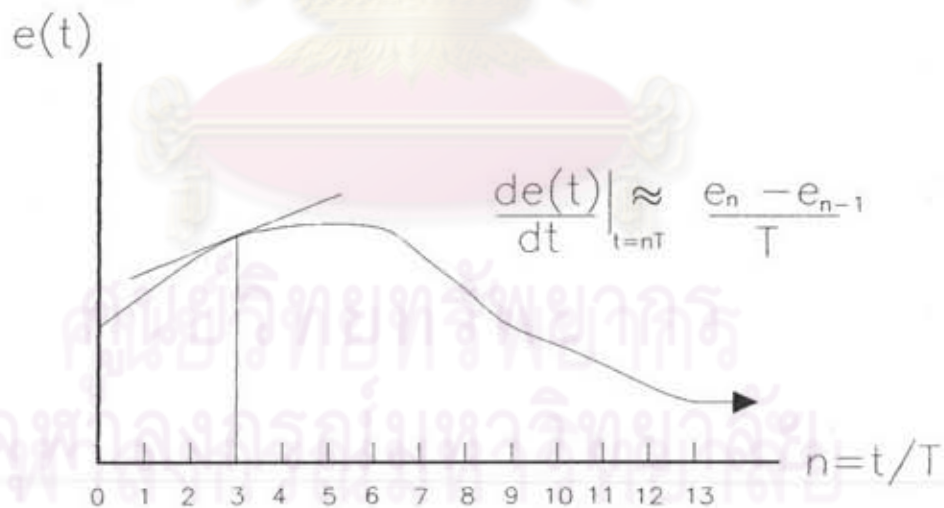
$$m_{n-1} = K_i \sum_{j=1}^{n-1} T e_j$$

ลบสมการที่ 7 จากสมการที่ 6 จะได้ในรูปของสมการอินคริเมนตรัล

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = K_i T e_n \quad (11)$$

8. การควบคุมแบบเดริเวทีฟ (Derivative Control)

การควบคุมแบบเดริเวทีฟ ค่าการควบคุมจะเป็นอัตราส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความชันของกราฟความผิดพลาด ตามรูปที่ ๓.3



รูปที่ ๓.3 การดิฟเฟอเรนเชียลแบบคิสิกรีต

ค่าควบคุมแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$m(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

สามารถเขียนในรูปสมการย้อนกลับได้ดังนี้

$$m_n = K_d \left(\frac{e_n - e_{n-1}}{T} \right)$$

และจะได้

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = \frac{K_d}{T} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (13)$$

การควบคุมแบบ PID

การควบคุมที่นิยมใช้มากที่สุดจะเป็นการควบคุมที่รวมรูปแบบการควบคุมทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวมาแล้วเข้าด้วยกัน และเรียกการควบคุมแบบนี้ว่า proportional plus integral plus derivative (PID) control แสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$\Delta m_n = (\Delta m_n)_p + (\Delta m_n)_i + (\Delta m_n)_d \quad (14)$$

จากสมการที่ 5 11 และ 13 จะได้

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = K_0 e_n + K_1 e_{n-1} + K_2 e_{n-2} \quad (15)$$

เมื่อ

$$K_0 = K_p + K_i T + \frac{K_d}{T} \quad (16)$$

$$K_1 = -K_p - \frac{2K_d}{T} \quad (17)$$

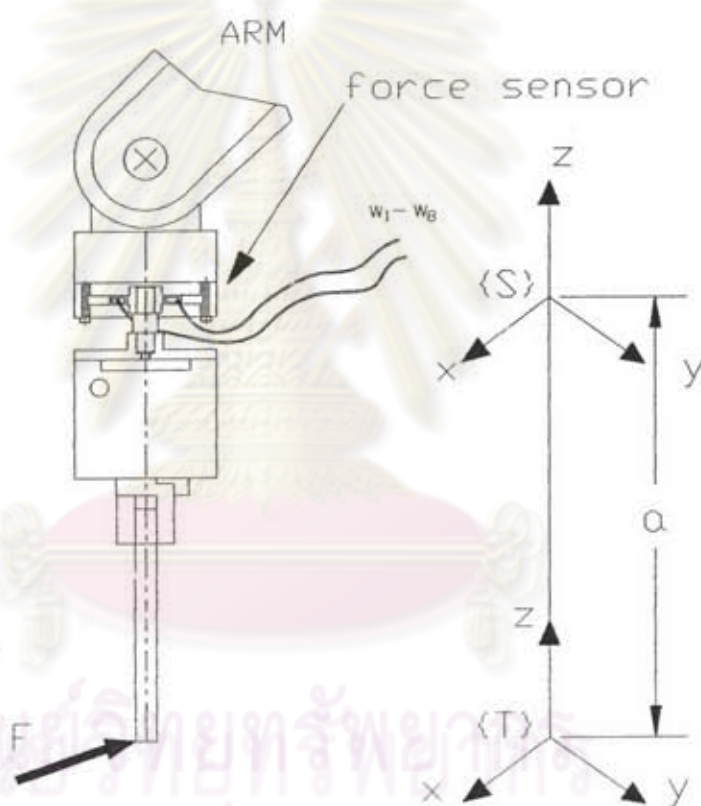
$$K_2 = \frac{K_d}{T} \quad (18)$$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การแปลงแรงและโมเมนต์ที่เซนเซอร์เฟรมเพื่อหาแรงและโมเมนต์ที่ทูลเฟรม

เนื่องจากขนาดของแรงและ โมเมนต์ที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดแรงที่ติดตั้งบริเวณข้อมือของแขนกลจะเป็นค่าที่เทียบกับ โคออร์ดิเนตของตัวอุปกรณ์วัดแรงหรือที่เรียกว่า sensor fram {S} ในขณะที่ค่าที่เราต้องการคือค่าของแรงและ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ปลายของอุปกรณ์ทำงานที่สัมผัสกับชิ้นงาน และเราจะทำการตั้งโคออร์ดิเนตเพื่ออ้างอิงทิศทางที่ตำแหน่งนี้ว่า tool frame {T} ตามรูป

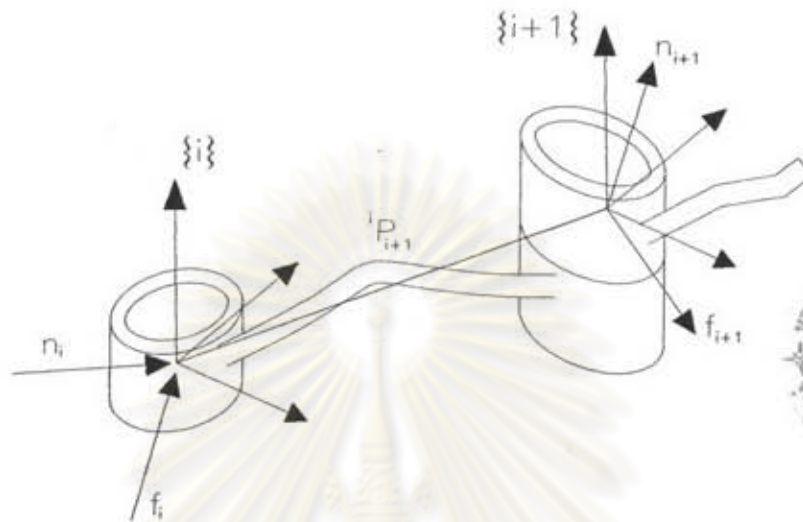


รูปที่ จ.1 การกำหนดโคออร์ดิเนตเฟรมของอุปกรณ์วัดแรง

{S} = sensor frame

{T} = tool frame

ในการแปลงค่าของแรงจากโคออร์ดิเนตหนึ่งไปยังโคออร์ดิเนตหนึ่ง เราสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงที่กระทำที่ข้อต่อดังนี้



รูปที่ ๒.2 การแปลงแรงจากโคออร์ดิเนตเฟรม (i) ไปที่ (i+1)

$${}^i f_i = {}^{i+1}R^i {}^{i+1} f_{i+1}$$

$${}^i n_i = {}^{i+1}R^i {}^{i+1} n_{i+1} + {}^i p_{i+1} \times {}^i f_i$$

จากสมการความสัมพันธ์สามารถเขียนในรูปสมการเมตริกที่จะแปลงแรงและโมเมนต์ที่ sensor frame {S} เพื่อให้ได้ค่าของแรงและโมเมนต์ที่ tool frame {T} ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} {}^T F_T \\ {}^S N_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^T R & 0 \\ {}^T P_{m,S} {}^T R & {}^T R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^S F_S \\ {}^S N_S \end{bmatrix}$$

หรือเขียนได้ในรูป

$${}^T F_T = {}^T T_r^S {}^S F_S$$

เมื่อ

${}^T T_r^S$ = force-moment transformation

$\theta_i = 0$ มุมระหว่าง X_{i-1} กับ X_i วัดรอบแกน Z_i

$\alpha_{i-1} = 0$ มุมระหว่าง Z_{i-1} กับ Z_i วัดรอบแกน X_i

$d_i = a$ ระยะจาก X_{i-1} ถึง X_i วัดตามแกน Z_i

$a_{i-1} = 0$ ระยะระหว่าง Z_{i-1} ถึง Z_i วัดตามแกน Z_{i-1}

จะได้

$${}^T R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^T P_{\text{orig}} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a \end{bmatrix}$$

$${}^T P_{\text{orig}} X = \begin{bmatrix} 0 & -P_z & P_y \\ P_z & 0 & -P_x \\ -P_y & P_x & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^T P_{\text{orig}} X {}^T R = \begin{bmatrix} 0 & -a & 0 \\ a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จะได้ในรูปสมการเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}^{(T)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}^{(S)}$$

คั้งนี้ force-moment transformation (${}^T_{S_f} T_f$)

$${}^T_{S_f} T_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 แสดงผลของแรงในแนวแกน Z ด้านลบ

ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz	ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz
	(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม		(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม
1	-4.36	-0.02	0.14	0.03	26	-8.44	-0.03	0.04	0.08
2	-4.38	-0.03	0.06	0.04	27	-8.5	-0.03	0.15	0.08
3	-4.36	-0.02	0.06	0.04	28	-8.55	-0.03	0.03	0.08
4	-4.35	-0.04	0.08	0.04	29	-8.55	-0.04	-0.24	0.08
5	-4.36	-0.03	0.12	0.04	30	-8.52	-0.03	-0.19	0.08
6	-4.37	-0.04	0.22	0.04	31	-8.55	-0.03	0.16	0.08
7	-4.38	-0.04	0.25	0.03	32	-8.57	-0.03	-0.17	0.08
8	-4.36	-0.04	0.26	0.03	33	-8.73	-0.03	-0.13	0.09
9	-4.39	-0.04	0.41	0.04	34	-8.95	-0.03	0.55	0.09
10	-4.42	-0.05	0.3	0.03	35	-9.43	-0.03	1.17	0.09
11	-4.42	-0.05	0.36	0.03	36	-11.49	0	6.1	0.11
12	-4.51	-0.05	0.35	0.04	37	-14.26	-0.06	1.13	0.14
13	-5.38	-0.04	2.25	0.05	38	-14.63	-0.11	0.32	0.14
14	-7.71	-0.03	2.36	0.07	39	-14.68	-0.14	0.5	0.12
15	-8.33	-0.04	-0.08	0.08	40	-14.68	-0.15	0.69	0.12
16	-8.31	-0.06	0.32	0.08	41	-14.68	-0.16	0.83	0.11
17	-8.45	-0.07	0.33	0.07	42	-14.64	-0.17	0.84	0.11
18	-8.45	-0.07	0.33	0.07	43	-14.66	-0.16	0.88	0.11
19	-8.46	-0.03	0.12	0.07	44	-14.68	-0.16	0.87	0.11
20	-8.44	-0.01	0.11	0.08	45	-14.74	-0.18	1.14	0.11
21	-8.43	-0.02	0.3	0.08	46	-14.76	-0.16	0.91	0.11
22	-8.45	-0.08	0.8	0.07	47	-14.68	-0.17	0.89	0.11
23	-8.44	-0.08	0.61	0.06	48	-14.67	-0.17	0.94	0.11
24	-8.43	-0.05	0.23	0.07	49	-14.69	-0.17	0.97	0.11
25	-8.42	-0.04	0.08	0.08					

ตารางที่ ๑.2 แสดงผลของแรงในแนวแกน X ด้านบวก

ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz	ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz
	(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม		(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม
1	14.98	-0.02	0.96	-0.15	26	8.75	0.01	0.27	-0.09
2	14.97	-0.03	0.91	-0.15	27	8.59	0.05	1.13	-0.08
3	15.02	-0.03	1.11	-0.15	28	5.8	0.07	5.33	-0.05
4	15.01	-0.02	1.1	-0.15	29	4.57	0.03	0.89	-0.05
5	14.97	-0.03	1.19	-0.15	30	4.51	0.01	0.8	-0.05
6	14.97	-0.03	1.03	-0.15	31	4.5	-0.02	1.1	-0.05
7	15	-0.01	0.94	-0.15	32	4.47	0	0.82	-0.06
8	15	-0.01	0.92	-0.15	33	4.52	0	0.58	-0.05
9	14.99	-0.01	1.04	-0.15	34	4.52	0	0.54	-0.05
10	15	0	0.73	-0.15	35	4.5	0.03	0.41	-0.05
11	14.88	0.01	1.77	-0.14	36	3.94	0.08	0.66	-0.04
12	13.14	0.03	5.7	-0.13	37	1.97	0.13	5.06	-0.01
13	10.53	0.06	3.83	-0.1	38	0.21	0.05	0.52	0
14	8.98	0.02	1.54	-0.08	39	0.04	0.05	-0.13	0
15	8.69	0.02	0.86	-0.08	40	0.03	0.03	-0.02	0
16	8.6	0	0.54	-0.08	41	0.03	0.04	-0.01	0
17	8.67	-0.01	0.78	-0.09	42	0.02	0.02	0.04	0
18	8.65	-0.03	1.05	-0.09	43	0.03	0	0.24	0
19	8.71	-0.05	0.93	-0.09	44	0.03	0.01	0.15	0
20	8.78	-0.05	1.27	-0.1	45	0.03	-0.01	0.38	-0.01
21	8.73	-0.06	1.41	-0.1	46	0.03	-0.03	0.54	-0.01
22	8.69	-0.08	1.52	-0.1	47	0.04	-0.02	0.62	-0.01
23	8.68	-0.06	1.19	-0.11	48	0.04	-0.01	0.55	-0.01
24	8.78	-0.04	1.04	-0.1	49	0.03	0.01	0.27	0
25	8.75	-0.02	1.1	-0.1					

ตารางที่ ๓.3 แสดงผลของแรงในแนวแกน Y ด้านลบ

ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz	ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz
	(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม		(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม
1	0.11	-14.58	0	-0.03	26	-0.01	-4.4	-0.51	0
2	0.1	-14.55	-0.09	-0.02	27	-0.01	-4.38	-0.46	0
3	0.1	-14.55	0.09	-0.02	28	0	-4.39	-0.48	0
4	0.1	-14.57	0.09	-0.02	29	0	-4.49	-0.62	0
5	0.1	-14.56	0.05	-0.02	30	0	-4.45	-0.47	0
6	0.1	-14.53	0.01	-0.02	31	0	-4.4	-0.5	0
7	0.1	-14.56	0.02	-0.02	32	0	-4.41	-0.31	0
8	0.09	-14.59	0	-0.02	33	0.01	-4.44	-0.4	0
9	0.1	-14.55	-0.05	-0.02	34	0	-4.44	-0.46	0
10	0.1	-13.85	-4.13	-0.02	35	0	-4.51	-0.68	0
11	0.06	-10.06	-5.8	-0.03	36	0	-2.36	-7.26	-0.01
12	0.03	-8.63	-1.02	-0.01	37	-0.06	-0.29	-1.97	0.01
13	0.02	-8.49	-0.29	-0.01	38	-0.06	-0.04	-0.24	0.01
14	0.02	-8.46	-0.08	-0.01	39	-0.05	-0.03	-0.08	0.01
15	0.03	-8.5	-0.15	-0.01	40	-0.05	-0.04	0.15	0
16	0.02	-8.52	-0.35	-0.01	41	-0.04	-0.04	0.02	0
17	0.02	-8.49	-0.48	-0.01	42	-0.05	-0.02	0.1	0
18	0.02	-8.44	-0.2	-0.01	43	-0.05	-0.04	0.2	0
19	0.02	-8.5	0.16	-0.01	44	-0.04	-0.03	0.15	0
20	0.03	-8.54	0.06	-0.02	45	-0.05	-0.03	0.01	0
21	0.03	-8.5	-0.06	-0.02	46	-0.04	-0.02	-0.22	0.01
22	0.03	-8.46	-0.22	-0.01	47	-0.05	-0.02	-0.08	0.01
23	0.03	-8.43	-0.67	-0.01	48	-0.05	-0.02	-0.07	0.01
24	0.02	-6.26	-8.67	-0.02	49	-0.05	-0.03	-0.05	0.01
25	-0.01	-4.51	-1.05	0					

ตารางที่ ๑.๔ แสดงผลของแรงในแนวแกน Y ด้านบวก

ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz	ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz
	(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม		(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม
1	0.04	14.16	0.46	0.03	26	0.02	8.37	0.45	0.02
2	0.04	14.15	0.5	0.03	27	0.02	8.39	0.22	0.02
3	0.04	14.13	0.45	0.03	28	0.02	8.49	0.17	0.02
4	0.04	14.12	0.4	0.03	29	0.02	8.52	0.44	0.02
5	0.04	14.14	0.38	0.03	30	0.02	8.22	2.1	0.03
6	0.03	14.15	0.36	0.03	31	0	5.59	5.54	0.04
7	0.03	14.14	0.37	0.03	32	0	4.43	0.25	0.02
8	0.03	14.13	0.25	0.03	33	-0.01	4.39	-0.03	0.02
9	0.04	14.14	0.21	0.04	34	0	4.43	0.14	0.02
10	0.03	14.16	0.11	0.04	35	0	4.41	0.21	0.01
11	0.03	14.14	0.2	0.04	36	0	4.35	0.23	0.02
12	0.03	13.51	3.43	0.04	37	0	4.31	-0.08	0.02
13	0.02	10.56	5.49	0.05	38	0	4.35	-0.1	0.02
14	0.03	8.79	1.51	0.03	39	-0.01	2.87	7.47	0.03
15	0.02	8.5	0.48	0.02	40	0	0.44	1.42	0.02
16	0.02	8.43	0.35	0.02	41	0	0.05	0.05	0.01
17	0.02	8.45	0.28	0.02	42	-0.01	0.01	-0.23	0.01
18	0.02	8.55	0.21	0.02	43	-0.02	0	-0.2	0.01
19	0.03	8.6	0.52	0.02	44	-0.02	0	-0.16	0.01
20	0.03	8.55	0.69	0.02	45	-0.01	0	-0.15	0.01
21	0.03	8.46	0.44	0.02	46	-0.01	0	-0.12	0.01
22	0.02	8.45	0.21	0.02	47	-0.02	0	-0.13	0.01
23	0.04	8.51	0.33	0.02	48	-0.01	0	-0.06	0.01
24	0.04	8.54	0.31	0.03	49	-0.01	0	-0.09	0.01
25	0.03	8.46	0.43	0.03					

ตารางที่ ๑.5 แสดงผลของแรงในแนวแกน Z ด้านลบ

ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz	ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz
	(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม		(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม
1	0.33	-0.22	-33.59	-0.01	26	0.15	-0.11	-17.07	-0.02
2	0.33	-0.22	-33.57	-0.01	27	0.16	-0.1	-17.34	-0.02
3	0.33	-0.22	-33.47	-0.01	28	0.14	-0.11	-17.22	-0.01
4	0.33	-0.22	-33.57	-0.01	29	0.15	-0.11	-17.17	-0.02
5	0.33	-0.22	-33.56	-0.01	30	0.11	-0.22	-16.41	-0.01
6	0.33	-0.22	-33.58	-0.02	31	0.18	-0.36	-9.19	-0.02
7	0.33	-0.23	-33.57	-0.02	32	0.44	-0.15	-2.38	-0.02
8	0.33	-0.24	-33.37	-0.02	33	0.22	-0.06	0.58	-0.02
9	0.34	-0.27	-33.51	-0.02	34	0.02	-0.04	0.14	-0.02
10	0.34	-0.27	-33.28	-0.02	35	0.01	-0.04	0.02	-0.02
11	0.34	-0.25	-33.3	-0.02	36	0	-0.03	-0.02	-0.02
12	0.32	-0.28	-32.8	-0.02	37	0	-0.05	0.35	-0.02
13	0.17	-0.32	-30.89	-0.02	38	0	-0.06	0.46	-0.02
14	0.04	-0.26	-26.51	-0.02	39	0	-0.03	0.05	-0.02
15	-0.07	-0.17	-21.01	-0.02	40	0	-0.02	-0.24	-0.01
16	0.06	-0.11	-18.08	-0.02	41	-0.02	-0.04	-0.16	-0.01
17	0.18	-0.12	-16.59	-0.02	42	-0.02	-0.06	0.03	-0.01
18	0.38	-0.12	-16.88	-0.02	43	-0.01	-0.07	0.06	-0.01
19	0.62	-0.18	-17.16	-0.02	44	-0.01	-0.05	-0.03	-0.01
20	0.39	-0.13	-16.44	-0.02	45	-0.02	-0.04	-0.18	-0.01
21	0.21	-0.11	-16.72	-0.02	46	-0.01	-0.04	-0.14	-0.01
22	0.18	-0.11	-17.01	-0.02	47	-0.02	-0.01	-0.47	-0.01
23	0.16	-0.15	-16.7	-0.02	48	-0.02	-0.03	-0.43	0
24	0.15	-0.15	-16.66	-0.02	49	-0.02	-0.06	-0.26	0
25	0.15	-0.12	-16.85	-0.02					

ตารางที่ ๑.๖ แสดงผลของแรงในแนวแกน Z คำนวณ

ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz	ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz
	(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม		(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม
1	-0.46	0.37	36.83	0	26	-0.5	0.44	19.95	-0.01
2	-0.44	0.31	37.26	0.01	27	-0.57	0.4	19.64	0
3	-0.35	0.39	35.83	0	28	-0.39	0.29	18.96	-0.01
4	-0.28	0.49	37.09	-0.01	29	-0.35	0.37	19.63	-0.01
5	-0.46	0.39	36.7	0	30	-0.48	0.28	19.88	-0.01
6	-0.35	0.33	36.34	0.03	31	-0.33	0.26	19.39	0.01
7	-0.29	0.41	36.16	0	32	-0.31	0.31	18.97	-0.01
8	-0.36	0.5	36.53	0	33	-0.42	0.39	19.55	0
9	-0.46	0.33	37.13	0.01	34	-0.45	0.32	19.52	0.01
10	-0.35	0.4	35.74	0.01	35	-0.47	0.36	19.68	0
11	-0.29	0.51	37	-0.01	36	-0.08	0.17	15.66	-0.02
12	-0.46	0.51	37.24	0	37	-0.02	0.08	1.12	-0.02
13	-0.36	0.33	36.29	0.02	38	-0.05	0.01	-1	-0.01
14	-0.29	0.41	36.12	0	39	-0.05	0.02	-1.03	-0.01
15	-0.36	0.49	36.25	0	40	-0.04	0.01	-0.99	0
16	-0.47	0.32	36.7	0	41	-0.04	0.02	-0.95	-0.01
17	-0.4	0.36	35.84	0.02	42	-0.04	0.02	-0.94	-0.01
18	-0.41	0.47	36.62	-0.02	43	-0.04	0.01	-0.97	-0.01
19	-0.31	0.76	34.58	-0.02	44	-0.04	0.01	-0.93	-0.01
20	-0.08	0.36	23.09	-0.01	45	-0.04	0.01	-0.79	-0.01
21	-0.3	0.33	19.4	0	46	-0.04	0.01	-0.73	-0.01
22	-0.34	0.39	19.21	0	47	-0.04	0	-0.78	-0.01
23	-0.46	0.29	19.51	0	48	-0.03	0	-0.74	-0.01
24	-0.38	0.29	19.59	0.01	49	-0.03	0	-0.69	-0.01
25	-0.34	0.33	19.42	-0.01					

ตารางที่ ๑.7 แสดงผลของโมเมนต์ในแนวแกน Z ด้านลบ

ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz	ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz
	(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม		(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม
1	-0.08	0.52	1.98	-1.81	26	-0.05	0.24	0.78	-0.94
2	-0.08	0.53	1.92	-1.81	27	-0.04	0.26	0.74	-0.94
3	-0.08	0.52	1.88	-1.81	28	-0.05	0.29	0.52	-0.94
4	-0.09	0.52	1.82	-1.81	29	-0.04	0.26	0.67	-0.94
5	-0.08	0.52	1.83	-1.81	30	-0.04	0.26	0.51	-0.94
6	-0.08	0.52	1.73	-1.81	31	-0.03	0.25	0.36	-0.92
7	-0.08	0.52	1.62	-1.81	32	-0.03	0.14	0.27	-0.77
8	-0.08	0.52	1.49	-1.81	33	0.04	0.03	-1.1	-0.18
9	-0.09	0.53	1.39	-1.81	34	-0.01	0.04	-1.3	0
10	-0.09	0.53	1.36	-1.81	35	0	0.04	-1.15	0.02
11	-0.08	0.53	1.45	-1.81	36	-0.01	0.05	-1.3	0.02
12	-0.08	0.53	1.56	-1.81	37	-0.02	0.03	-1.02	0.01
13	-0.09	0.53	1.65	-1.82	38	-0.02	0.03	-1.05	0.01
14	-0.09	0.54	1.55	-1.82	39	-0.02	0.03	-1.05	0.01
15	-0.09	0.53	1.47	-1.81	40	-0.02	0.01	-1.2	0.01
16	-0.09	0.51	1.63	-1.81	41	-0.03	0.01	-1.11	0.01
17	-0.1	0.51	1.76	-1.82	42	-0.02	0.04	-1.15	0.01
18	-0.1	0.5	1.86	-1.81	43	-0.03	0.02	-1.06	0.01
19	0.01	0.28	1.81	-1.45	44	-0.03	0.02	-1.03	0.01
20	-0.05	0.3	0.14	-0.97	45	-0.01	0.04	-1.04	0.01
21	-0.04	0.29	0.17	-0.92	46	-0.01	0.05	-1.08	0.01
22	-0.04	0.28	0.41	-0.93	47	-0.01	0.07	-1.28	0.01
23	-0.04	0.28	0.45	-0.94	48	-0.02	0.04	-1.15	0.02
24	-0.04	0.27	0.44	-0.94	49	-0.02	0.04	-0.88	0.01
25	-0.05	0.27	0.52	-0.94					

ตารางที่ ๑.๘ แสดงผลของโมเมนต์ในแนวแกน Z ด้านบวก

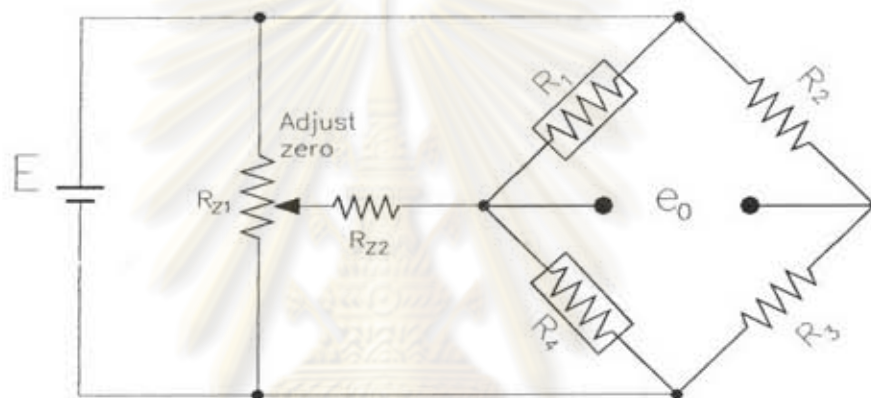
ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz	ครั้งที่	Fx	Fy	Fz	Mz
	(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม		(นิวตัน)	(นิวตัน)	(นิวตัน)	น.ม
1	0.1	-0.66	-2.4	1.84	26	0.08	-0.37	-1.3	0.97
2	0.15	-0.67	-2.17	1.84	27	0.07	-0.4	-1.23	0.94
3	0.11	-0.64	-2.41	1.83	28	0.09	-0.36	-0.38	0.94
4	0.15	-0.65	-2.31	1.83	29	0.06	-0.38	-1.05	0.95
5	0.13	-0.63	-2.57	1.83	30	0.07	-0.33	-0.56	0.96
6	0.14	-0.64	-2.65	1.84	31	0.05	-0.37	-1.05	0.94
7	0.12	-0.62	-2.9	1.84	32	0.07	-0.38	-0.58	0.93
8	0.16	-0.63	-2.87	1.84	33	0.07	-0.4	-0.67	0.93
9	0.12	-0.61	-3.02	1.83	34	0.09	-0.39	-0.01	0.94
10	0.17	-0.63	-2.88	1.84	35	0.06	-0.44	-0.43	0.94
11	0.12	-0.61	-3.06	1.84	36	0.09	-0.39	-0.01	0.95
12	0.16	-0.62	-2.96	1.84	37	0.05	-0.42	-0.71	0.94
13	0.12	-0.61	-3.06	1.83	38	0.07	-0.41	-0.47	0.94
14	0.14	-0.63	-2.84	1.83	39	0.06	-0.36	-1.11	0.93
15	0.12	-0.63	-2.58	1.82	40	0.08	-0.37	-0.92	0.95
16	0.16	-0.64	-2.51	1.83	41	0.06	-0.35	-1.44	0.94
17	0.11	-0.62	-2.77	1.83	42	0.06	-0.17	-1.44	0.78
18	0.16	-0.64	-2.68	1.83	43	-0.02	-0.07	-0.47	0.2
19	0.11	-0.63	-2.69	1.82	44	0.02	-0.09	0.09	0.01
20	0.16	-0.42	-0.6	1.82	45	0.01	-0.08	0.07	-0.01
21	0.12	-0.65	-2.36	1.82	46	0.02	-0.08	-0.03	-0.01
22	0.17	-0.63	-2.16	1.84	47	0.01	-0.09	-0.15	-0.01
23	0.14	-0.62	-2.8	1.84	48	0.02	-0.13	-0.05	-0.02
24	0.11	-0.47	-3.1	1.75	49	0.02	-0.12	0.4	-0.02
25	0.04	-0.35	-2.32	1.18					

ภาคผนวก ข

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทำการทดลองวิจัยเรื่องอุปกรณ์ตรวจรู้แรงสำหรับงานควบคุมแขนกล นอกจากการ
สร้างตัวอุปกรณ์วัดแรงแล้ว ผู้วิจัยได้จัดสร้างชุดอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้ประกอบการวิจัย ดัง
รายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ชุดวงจรบริดจ์ จำนวน 8 ชุด

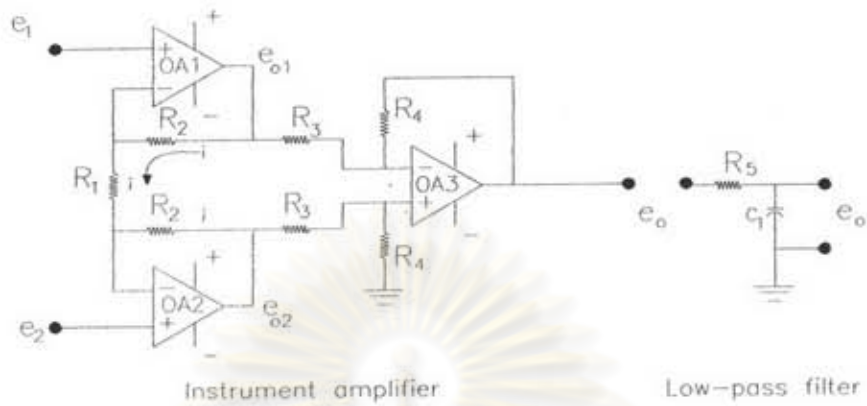


รูปที่ ข.1 ชุดวงจรบริดจ์

รายการอุปกรณ์

- | | |
|------------|--|
| R_1, R_4 | สเตรนเกจ ความต้านทาน 120 Ω เกจแฟลคเตอร์ 2.1 |
| R_2, R_3 | ความต้านทาน 120 Ω |
| R_{Z1} | ความต้านทานแบบปรับค่าได้ 50 k Ω |
| R_{Z2} | ความต้านทาน 12 k Ω |
| E | ความต่างศักย์ 6 โวลต์ |

2. ชุดอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Signal amplifier) จำนวน 8 ชุด

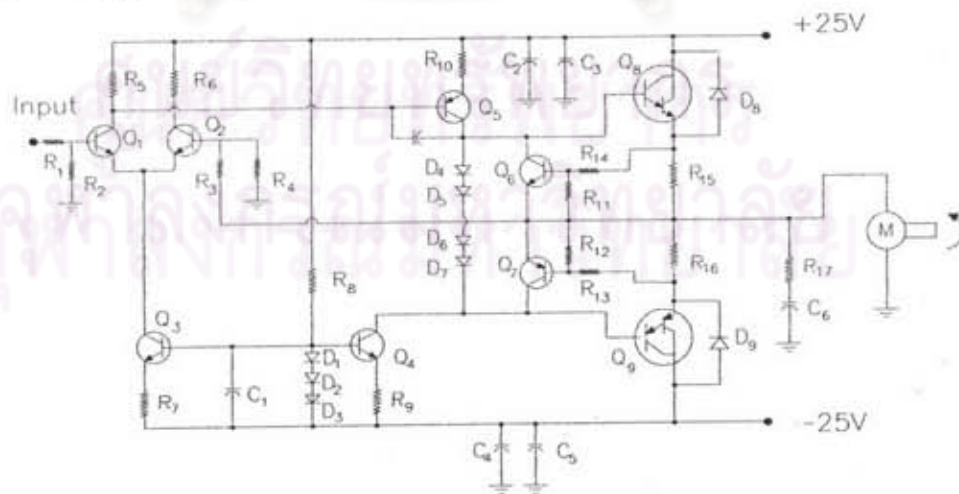


รูปที่ ๒.๒ วงจรขยายสัญญาณ

รายการอุปกรณ์

R_1	ความต้านทาน	6.2 k Ω
R_2	ความต้านทาน	51 k Ω
R_3	ความต้านทาน	1.21 k Ω
R_4	ความต้านทาน	120 k Ω
R_5	ความต้านทาน	110 k Ω
C_1	ตัวเก็บประจุ	0.8 μ F
OA_1, OA_2, OA_3	ออปแอมป์	PMI; OP-37

3. ชุดขยายกำลังสัญญาณความถี่ (Power amplifier) จำนวน 1 ชุด

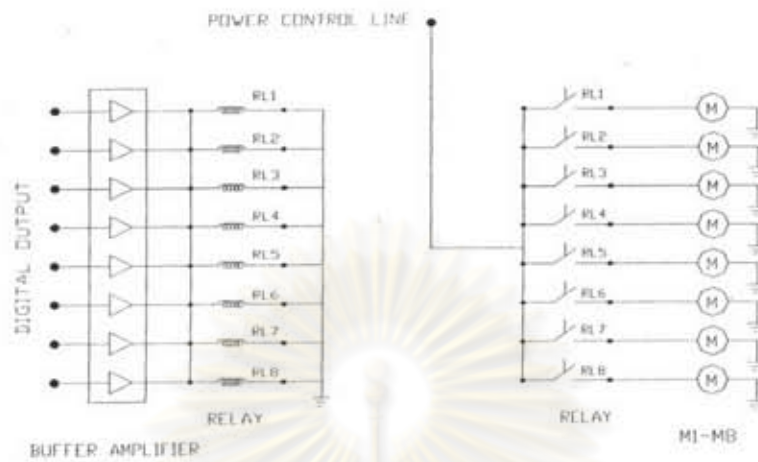


รูปที่ ๒.๓ วงจรเพาเวอร์แอมป์ไฟเออร์

รายการอุปกรณ์

R ₁	ความต้านทาน 10 k Ω
R ₂	ความต้านทาน 1 k Ω
R ₃	ความต้านทาน 22 k Ω
R ₄	ความต้านทาน 1 k Ω
R ₅ , R ₆	ความต้านทาน 1.2 k Ω
R ₇	ความต้านทาน 680 k Ω
R ₈	ความต้านทาน 39 k Ω
R ₉	ความต้านทาน 1.8 k Ω
R ₁₀	ความต้านทาน 620 k Ω
R ₁₁ , R ₁₂ , R ₁₃ , R ₁₄	ความต้านทาน 1 k Ω
R ₁₅ , R ₁₆	ความต้านทาน 0.47 Ω , 2 วัตต์
R ₁₇	ความต้านทาน 15 Ω
C ₁	ตัวเก็บประจุ 100 μ F, 25 V.
C ₂ , C ₄	ตัวเก็บประจุ 0.1 μ F
C ₃ , C ₅	ตัวเก็บประจุ 100 μ F, 35 V.
C ₆	ตัวเก็บประจุ 0.05 μ F
D ₁ - D ₇	ไดโอด 1N4148
D ₈ , D ₉	ไดโอด 1N4004
Q ₁ , Q ₂ , Q ₃ , Q ₄ , Q ₆	ทรานซิสเตอร์ 2N3700 NPN
Q ₅ , Q ₇	ทรานซิสเตอร์ 2N5400 PNP
Q ₈	คาร์ลิงตันทรานซิสเตอร์ TIP125 NPN
Q ₉	คาร์ลิงตันทรานซิสเตอร์ TIP120 PNP

4. ชุดวงจรรีเลย์มัลติเพล็กซ์ (Relay multiplexer)



RELAY MULTIPLEXER

รูปที่ ๔.4 วงจรรีเลย์มัลติเพล็กซ์เซอร์

รายการอุปกรณ์

RL₁ - RL₈

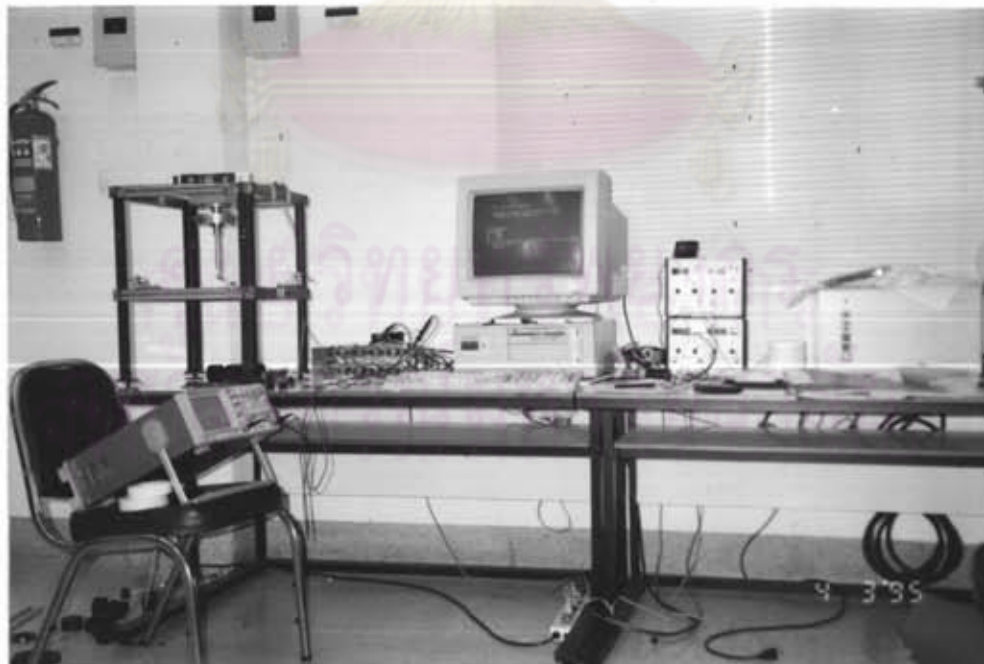
Buffer amplifier

M₁ - M₈

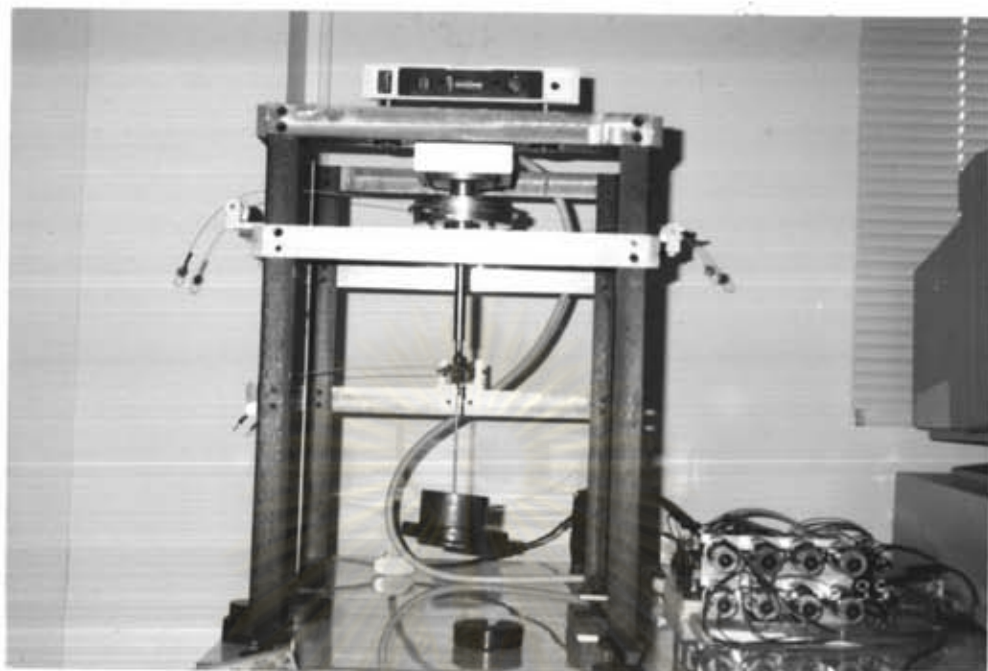
รีเลย์ 211 AD012-M ,12 V., 2 A.

ไดเวอร์ซันรีเลย์ ULN 2003A

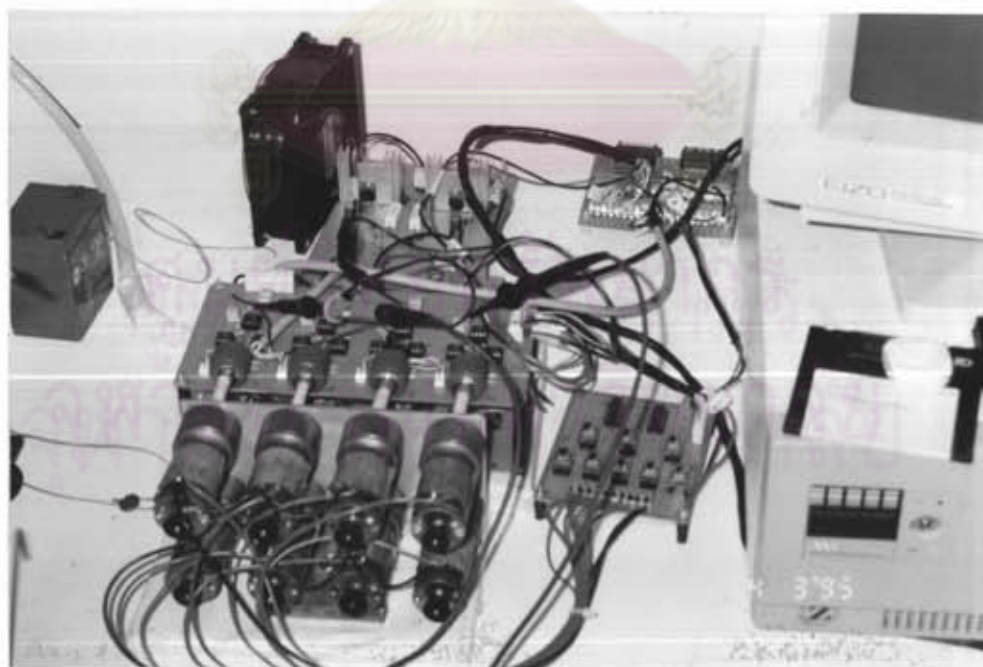
มอเตอร์ 24 VDC. Ratio 60.5:1 GME8713ES45



รูปที่ ๕.5 ภาพแสดงอุปกรณ์ต่างๆในการวิจัย



รูปที่ ข.6 ภาพแสดงโต๊ะปรับเทียบค่า



รูปที่ ข.7 ภาพแสดงชุดขยายสัญญาณ



OP-37

LOW-NOISE PRECISION HIGH-SPEED OPERATIONAL AMPLIFIER ($A_{VCL} \geq 5$)

Precision Monolithics Inc.

FEATURES

- Low Noise 80nV p-p (0.1Hz to 10Hz)
..... $3nV/\sqrt{Hz}$ at 1kHz
- Low Drift $0.2\mu V/^{\circ}C$
- High Speed $17V/\mu s$ Slew Rate
..... 63MHz Gain Bandwidth
- Low Input Offset Voltage $10\mu V$
- Excellent CMRR ... 126dB (Common-Voltage of $\pm 11V$)
- High Open-Loop Gain 1.8 Million
- Replaces 725, OP-05, OP-06, OP-07, AD510, AD517, SE5534 In Gains >5

($e_n = 3.5nV/\sqrt{Hz}$ at 10Hz), a low 1/f noise corner frequency of 2.7Hz, and the high gain of 1.8 million, allow accurate high-gain amplification of low-level signals.

The low input bias current of $\pm 10nA$ and offset current of 7nA are achieved by using a bias-current-cancellation circuit. Over the military temperature range this typically holds I_B and I_{OS} to $\pm 20nA$ and 15nA respectively.

The output stage has good load driving capability. A guaranteed swing of $\pm 10V$ into 600 Ω and low output distortion make the OP-37 an excellent choice for professional audio applications.

PSRR and CMRR exceed 120dB. These characteristics, coupled with long-term drift of $0.2\mu V/month$, allow the circuit

ORDERING INFORMATION†

$T_A = 25^{\circ}C$ $V_{OS} \text{ MAX}$ (μV)	PACKAGE				OPERATING TEMPERATURE RANGE
	TO-99 8-PIN	HERMETIC DIP 8-PIN	PLASTIC DIP 8-PIN	LCC	
25	OP37AJ*	OP37AZ*	OP37EP		MIL
25	OP37EJ	OP37EZ			IND COM
60	OP37BJ*	OP37BZ*		OP37BRC 883	MIL
60	OP37FJ	OP37FZ	OP37FP		IND COM
100	OP37CJ*	OP37CZ*			MIL
100	OP37GJ	OP37GZ	OP37GP		IND COM

*For devices processed in total compliance to MIL-STD-883, add /883 after part number. Consult factory for 883 data sheet.

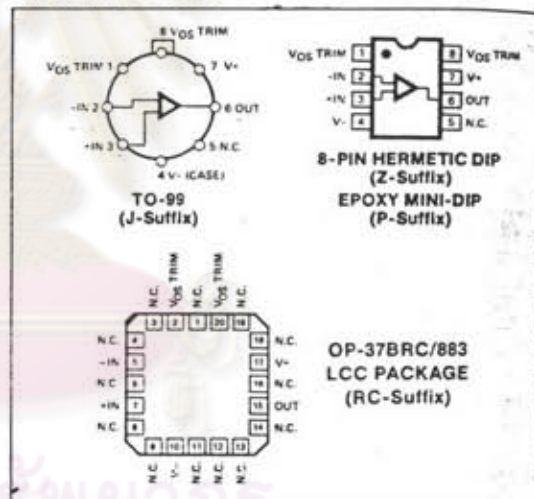
†All commercial and industrial temperature range parts are available with burn-in. For ordering information see 1986 Data Book, Section 2.

GENERAL DESCRIPTION

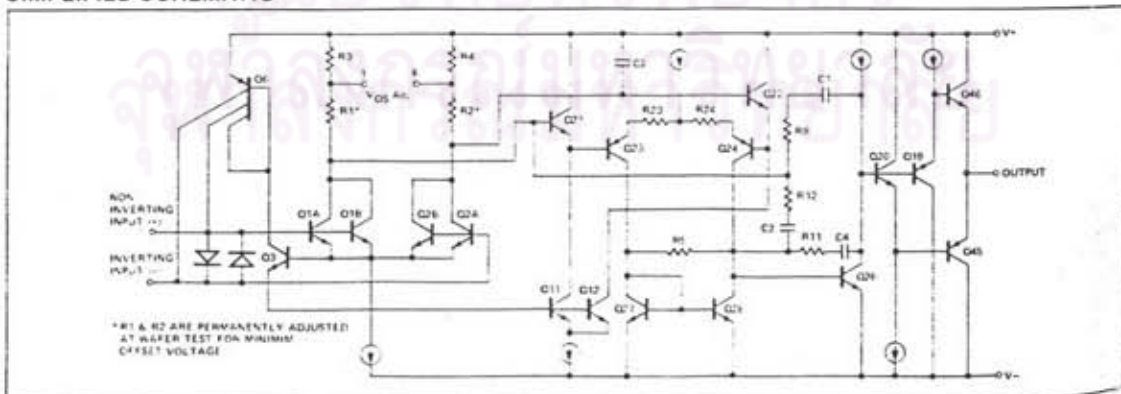
The OP-37 provides the same high performance as the OP-27, but the design is optimized for circuits with gains greater than five. This design change increases slew rate to $17V/\mu sec$ and gain-bandwidth product to 63MHz.

The OP-37 provides the low offset and drift of the OP-07 plus higher speed and lower noise. Offsets down to $25\mu V$ and drift of $0.6\mu V/^{\circ}C$ maximum make the OP-37 ideal for precision instrumentation applications. Exceptionally low noise

PIN CONNECTIONS



SIMPLIFIED SCHEMATIC




OP-37 LOW-NOISE PRECISION HIGH-SPEED OPERATIONAL AMPLIFIER

designer to achieve performance levels previously attained only by discrete designs.

Low-cost, high-volume production of the OP-37 is achieved by using on-chip zener-zap trimming. This reliable and stable offset trimming scheme has proved its effectiveness over many years of production history.

The OP-37 brings low-noise instrumentation-type performance to such diverse applications as microphone, tape-head, and RIAA phono preamplifiers, high-speed signal conditioning for data acquisition systems, and wide-bandwidth instrumentation.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 4)

Supply Voltage	±22V
Internal Power Dissipation (Note 1)	500mW
Input Voltage (Note 3)	±22V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Differential Input Voltage (Note 2)	±0.7V
Differential Input Current (Note 2)	±25mA
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C

Operating Temperature Range

OP-37A, OP-37B, OP-37C (J, Z, RC)	-55°C to +125°C
OP-37E, OP-37F, OP-37G (J, Z)	-25°C to +85°C
OP-37E, OP-37F, OP-37G (P)	0°C to +70°C
Lead Temperature Range (Soldering, 60 sec)	300°C
DICE Junction Temperature	-65°C to +150°C

NOTES:

- See table for maximum ambient temperature rating and derating factor.
- The OP-37's inputs are protected by back-to-back diodes. Current limiting resistors are not used in order to achieve low noise. If differential input voltage exceeds ±0.7V, the input current should be limited to 25mA.
- For supply voltages less than ±22V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
- Absolute maximum ratings apply to both DICE and packaged parts, unless otherwise noted.

PACKAGE TYPE	MAXIMUM AMBIENT TEMPERATURE FOR RATING	DERATE ABOVE MAXIMUM AMBIENT TEMPERATURE
TO-99 J	80°C	7.1mW/°C
8-Pin Hermetic DIP (Z)	75°C	6.7mW/°C
8-Pin Plastic DIP (P)	62°C	5.6mW/°C
LCC	80°C	7.8mW/°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $V_S = \pm 15V$, $T_A = 25^\circ C$, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-37A/E			OP-37B/F			OP-37C/G			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V_{OS}	Note 1	—	10	25	—	20	60	—	30	100	μV
Long-Term V_{OS} Stability	V_{OS}/Time	Notes 2, 3	—	0.2	1.0	—	0.3	1.5	—	0.4	2.0	$\mu V/\text{Mo}$
Input Offset Current	I_{OS}		—	7	35	—	9	50	—	12	75	nA
Input Bias Current	I_B		—	±10	±40	—	±12	±55	—	±15	±80	nA
Input Noise Voltage	$e_{n(p-p)}$	0.1Hz to 10kHz Notes 3, 5	—	0.08	0.18	—	0.08	0.18	—	0.09	0.25	μV_{p-p}
Input Noise Voltage Density	e_n	$f_c = 10\text{Hz}$ Note 3	—	3.5	5.5	—	3.5	5.5	—	3.6	8.0	$nV/\sqrt{\text{Hz}}$
		$f_c = 30\text{Hz}$ Note 3	—	3.1	4.5	—	3.1	4.5	—	3.3	5.6	
		$f_c = 1000\text{Hz}$ Note 3	—	2.0	2.8	—	3.0	3.8	—	3.2	4.5	
Input Noise Current Density	i_n	$f_c = 10\text{Hz}$ Notes 3, 6	—	1.7	4.0	—	1.7	4.0	—	1.7	—	$pA/\sqrt{\text{Hz}}$
		$f_c = 30\text{Hz}$ Notes 3, 6	—	1.0	2.3	—	1.0	2.3	—	1.0	—	
		$f_c = 1000\text{Hz}$ Notes 3, 6	—	0.4	0.8	—	0.4	0.8	—	0.4	0.8	
Input Resistance — Differential-Mode	R_{IN}	Note 7	1.3	6	—	0.94	5	—	0.7	4	—	M Ω
Input Resistance — Common-Mode	R_{INCM}		—	3	—	—	2.5	—	—	2	—	G Ω
Input Voltage Range	IVR		±11.0	±12.3	—	±11.0	±12.3	—	±11.0	±12.3	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 11V$	114	126	—	106	123	—	100	120	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSSR	$V_S = \pm 4V$ to $\pm 18V$	—	1	10	—	1	10	—	2	20	$\mu V/V$
Large-Signal Voltage Gain	A_{vC}	$F_c \geq 2k(H)$ $V_O = \pm 10V$	1000	1600	—	1000	1600	—	700	1500	—	V/mV
		$R_L \geq 1k(\Omega)$ $V_O = \pm 10V$	800	1500	—	800	1500	—	400	1500	—	
		$R_L = 600(\Omega)$ $V_O = \pm 1V$, $V_S = \pm 4V$, Note 4	250	700	—	250	700	—	200	500	—	
Output Voltage Swing	V_C	$R_L \geq 2k(\Omega)$	±12.0	±13.8	—	±12.0	±13.8	—	±11.5	±13.5	—	V
		$R_L \geq 600(\Omega)$	±10.0	±11.5	—	±10.0	±11.5	—	±10.0	±11.5	—	
Slew Rate	SR	$F_c \geq 2k(H)$ Note 4	11	17	—	11	17	—	11	17	—	V/ μs
Gain Bandwidth Prod	GBW	$f_c = 10\text{kHz}$ Note 4	45	63	—	45	63	—	45	63	—	MHz
		$f_c = 1\text{MHz}$	—	40	—	—	40	—	—	40	—	

ประวัติผู้เขียน

นายพลสิทธิ์ นนทลี เกิดเมื่อวันที่ 25 เมษายน พ.ศ. 2510 ที่อำเภอเมือง จังหวัด พระนครศรีอยุธยา จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2532 และได้ทำงานกับ บริษัทกระเบื้องกระดามไทย จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรซ่อมบำรุงเครื่องกล ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2532 ถึง พ.ศ. 2535 และได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2535



ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย