บทที่ 3

การทดลอง

วิธีการทดลอง

สำหรับการวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของแขนกล ในการทดลองได้ใช้อุปกรณ์การวัดระยะทางการเคลื่อนที่โดยใช้ strain gauge ในการวัด ในการทดลองการหาค่าระยะทางการเคลื่อนที่ได้มีวิธีการวัดโดยในขั้นแรกจำเป็นจะต้องรู้ความสัมพันธ์ ของระยะการโก่งตัวของแขนกลกับค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจาก strain amplifier ซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนแขนขณะที่แขนเกิดการโก่งตัว ความสัมพันธ์การโก่งตัวของแขนและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า สามารถที่จะแปลงให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของค่าความเครียดกับค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยจะได้สมการเมทริกซ์เป็น

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \qquad .....(35)$$

หรือ $[\varepsilon_t] = [C][v_t]$

เทอมทางซ้ายมือเป็นค่าของความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของจุดที่ strain gauge ติดตั้งอยู่ ส่วนเทอมทางขวามือเทอมแรกจะเป็นเมทริกซ์ค่าคงที่ประกอบด้วยค่าคงที่ที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ของระยะการโก่งตัวของแขนและค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจาก strain ammplifier คูณกับค่าคงที่เพื่อที่แปลงให้อยู่ในรูปของค่าความเครียด ส่วนเทอมสุดท้ายทางขวามือจะเป็นค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านจาก strain amplifier หลังจากที่ได้ค่าความเครียดที่แต่ละหน้าตัดที่มี strain gauge ติดตั้งอยู่แล้ว จากนั้นจะทำการหาค่า ตัวแปรเจนเนอรัลไรซ์ โดออดิเนต โดยมีรูปสมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial^2\phi_1/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_2/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_3/\partial\xi^2 \;|\xi=\xi_1 \\ \partial^2\phi_1/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_2/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_3/\partial\xi^2 \;|\xi=\xi_2 \\ \partial^2\phi_1/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_2/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_3/\partial\xi^2 \;|\xi=\xi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} \qquad ..(36)$$

หรือ $$[q_i(t)] = [\partial^2\phi_{ij}/\partial\xi^2][e_i]$$

เทอมทางซ้ายมือเป็นค่าของตัวแปรเจนเนอรัลไรซ์ โคออดิเนตในตำแหน่งที่มี strain gauge ติดอยู่ ส่วนเทอมทางขวามือนั้นเทอมแรกเป็นเมทริกซ์ซึ่งภายในจะประกอบด้วย ฟังก์ชั่นของอนุพันธ์อันดับสอง ของสมการโหมดเชฟโดยแทนค่าระยะทางในสมการด้วยระยะที่ตำแหน่งที่มี strain gauge ติดตั้งอยู่ ในเทอมสุดท้ายจะเป็นเทอมของค่าความเครียดซึ่งหาได้จากขั้นตอนแรก ในการหาค่าการโก่งตัว หรือ ระยะที่แขนเคลื่อนที่จะประกอบด้วยผลรวมของการคูณระหว่างสมการของโหมดเชฟและตัวแปรเจนเนอรัลไรซ์ โคออดิเนต ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้

$$\begin{bmatrix} u(\xi_1,t) \\ u(\xi_2,t) \\ u(\xi_3,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1(\xi) & \phi_2(\xi) & \phi_3(\xi) \mid \xi=\xi_1 \\ \phi_1(\xi) & \phi_2(\xi) & \phi_3(\xi) \mid \xi=\xi_2 \\ \phi_1(\xi) & \phi_2(\xi) & \phi_3(\xi) \mid \xi=\xi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \end{bmatrix} \quad \text{.....(37)}$$

$$[u(\xi_i,t)] = [\phi_{ij}(\xi)][q_i(t)]$$

เทอมทางซ้ายมือจะเป็นเทอมการโก่งตัวของแขนกลใน ขณะที่แขนกลมีการเคลื่อนที่ตามจุดที่มี strain gauge ติดตั้งอยู่ ส่วนเทอมทางขวามือเทอมแรกจะเป็นเทอมของเมทริกซ์ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของสมการโหมดเชฟแทนค่าระยะทางในสมการโหมดเชฟด้วยระยะที่ตำแหน่ง strain gauge ติดตั้งอยู่ ส่วนเทอมที่สองจะเป็นเทอมของตัวแปรเจนเนอรัลไรซ์ โคออดิเนต จากสมการทั้งสามสมการข้างต้นจะสังเกตเห็นว่า ระยะการเคลื่อนที่ของแขนกลจะประกอบด้วยผลคูณของเมทริกซ์โหมดเชฟ และเมทริกซ์อนุพันธ์อันดับสองของสมการโหมดเชฟ และเมทริกซ์ค่าคงที่ที่สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} u(\xi_1,t) \\ u(\xi_2,t) \\ u(\xi_3,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1(\xi) & \phi_2(\xi) & \phi_3(\xi) \mid \xi=\xi_1 \\ \phi_1(\xi) & \phi_2(\xi) & \phi_3(\xi) \mid \xi=\xi_2 \\ \phi_1(\xi) & \phi_2(\xi) & \phi_3(\xi) \mid \xi=\xi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial^2\phi_1/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_2/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_3/\partial\xi^2 \mid \xi=\xi_1 \\ \partial^2\phi_1/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_2/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_3/\partial\xi^2 \mid \xi=\xi_2 \\ \partial^2\phi_1/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_2/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_3/\partial\xi^2 \mid \xi=\xi_3 \end{bmatrix}$$

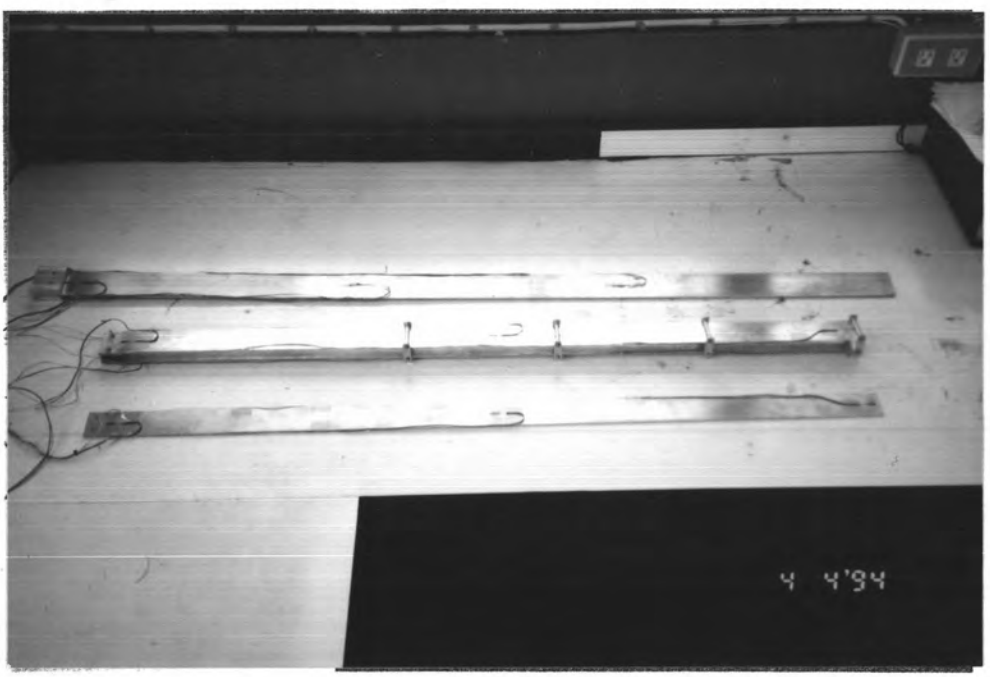
$$\begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad \text{.....(38)}$$

หรือ $[u(\xi_i,t)] = [\phi_{ij}][\partial^2\phi_{ij}/\partial\xi^2][C][v_i]$

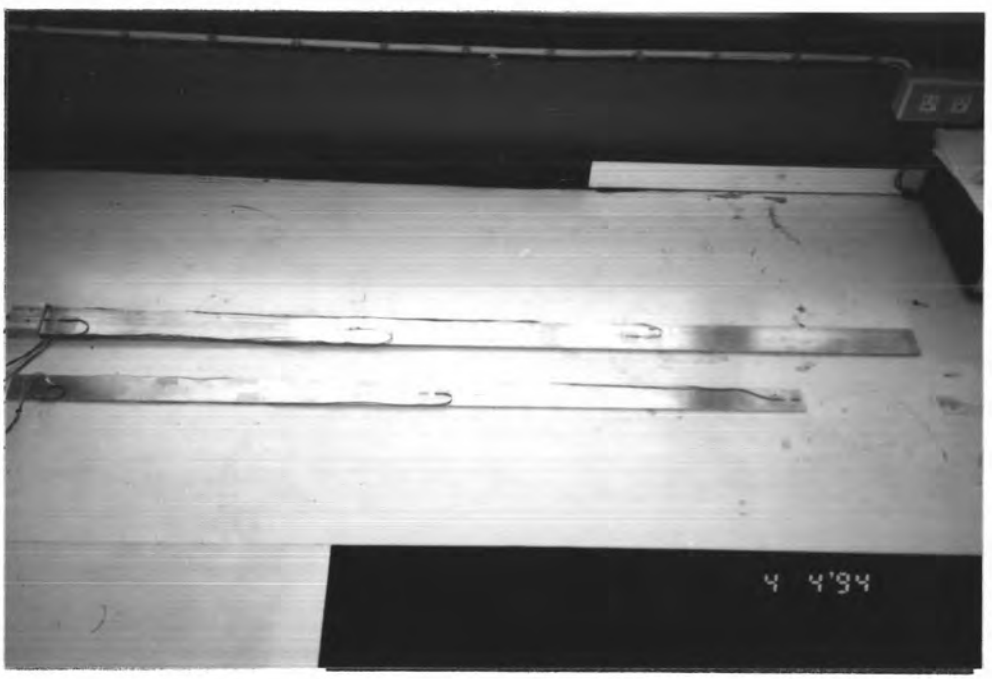
ดังนั้นการหาการเคลื่อนที่จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องแน่ใจว่า สมการโหมดเชฟที่ใช้ในสมการข้างต้นมีความถูกต้อง ดังนั้นการทดลองจึงจำเป็นที่จะต้องวัดค่าของโหมดเชฟของแขนเปรียบเทียบค่าของขนาดโหมดเชฟที่ได้จากสมการโหมดเชฟทางทฤษฎีที่ใช้งานในสมการข้างต้น

ในส่วนแรกของการทดลองเป็นการทดลองเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบแขนกล โดยการคิดว่าแขนกลเป็นระบบแบบต่อเนื่อง ค่าความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างกันของแต่ละแขนเนื่องจากองค์ประกอบต่างๆกัน แต่สำหรับการวิจัยครั้งนี้จะกำหนดเงื่อนไขการทดลองโดยการใช้แขนกลที่ทำจากอลูมิเนียม เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเบา และ มีความแข็งแรง ซึ่งเป็นที่นิยมในการทำแขนกลเพื่อที่จะลดน้ำหนัก และเงื่อนไขอีกอย่างคือ ลักษณะการยึดของแขนกล ซึ่งก็เปรียบเสมือนคานในระบบต่อเนื่อง จัดเป็นการยึดแบบ cantilever โดยการยึดปลายข้างหนึ่งแบบยึดแน่นและปลายข้างหนึ่งแบบปล่อยอิสระ ซึ่งเป็นรูปแบบของแขนกลโดยทั่วไปที่ใช้งาน สำหรับตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงเพื่อพิจารณาว่ามีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของแขน ในที่นี้คือ 1.ความหนาของแขน 2.การสร้างแขนกลแบบใช้แขนแบบมีอีกแผ่นมาประกบกันแล้วทำตัวประคองกันโคลง 3.การทดลองแขนกลโดยการใส่น้ำหนักที่ปลายแขนกล ในการทดลองได้มีการเปรียบเทียบผลระหว่างค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากสมการที่หาได้จากเงื่อนไขต่างๆของแขนกล โดยการวิเคราะห์แขนกลเป็นระบบแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะพบได้จากการศึกษาในวิชาการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนทั่วๆไป ส่วนการวัดจากเครื่องวัดได้ใช้เครื่องวัดที่เรียกว่า cross channel spectrum analyzer วิธีการวัดโดยจะทำการทดลองโดยการสั่นแขนกลโดยความถี่ที่ต่างๆกัน ในลักษณะของสัญญาณแบบไม่แน่นอน (random signal) โดยจะใช้การเคาะที่แขน หรือไม่ก็ใช้สัญญาณที่สร้างจาก cross channel spectrum analyzer สัญญาณออกเป็นแบบ noise แล้วป้อนเข้าสู่ D.C. amplifier เพื่อขยายสัญญาณให้เหมาะสมกับการขับ motor

ในส่วนที่สองของการทดลองเป็นการทดลองการวัดโหมดเชฟซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองโดยการไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขนกล ส่วนที่สองเป็นการทดลองโดยการใส่น้ำหนักที่ปลายแขนกลและแต่ละการทดลองจะใช้แขนกลที่มีรูปร่างที่แตกต่างกัน 3 แบบ ในการทดลองในส่วนของการหาโหมดเชฟ จะทำการทดลองโดยการขับมอเตอร์โดยการใช้อุปกรณ์การสร้างสัญญาณ sine wave ที่ความถี่ธรรมชาติของแขนกลจะทำให้ได้รูปร่างของโหมดเชฟที่ต้องการในการหาค่าของโหมดเชฟนั้นเนื่องจากการติดตั้ง strain gauge ที่ติดตั้งตามแขนกลมี 3 จุด ดังนั้น จุดที่แสดงของโหมดเชฟของแนวแขนจะมีเพียง 3 จุดเท่านั้น ซึ่งอ้างอิงจากผลการวิจัยของ Yuan,Book และ Huggin (1993) ได้สรุปผลการทดลองว่า การวัดค่าการโก่งตัวของแขนสามารถที่จะใช้เพียง 2-3 โหมดได้ ดังนั้นงานวิจัยจึงใช้ 3 โหมดแล้วจึงใช้สมการเพื่อทดสอบ



รูปที่ 3.1 แขนกลที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 แบบ



รูปที่ 3.2 การติดตั้ง strain gauge ด้านล่างแบบการติดตั้งในแบบที่ 1 สำหรับแขนกลแผ่นบาง ด้านบนเป็นการติดตั้งในแบบที่ 2 สำหรับแขนกลแผ่นหนา

รูปที่ 3.3 แขนกลแผ่นหนาประกอบกับแท่นยึดเพื่อใช้ในการทดสอบ

เท่ากับ 3 โหมด ในการจัดรูปสมการ (17) จะเห็นว่าจะใช้จุดที่ติดตั้ง strain gauge เท่าจำนวนของเมทริกซ์ซึ่งใช้เพียง 3 จุด ซึ่งเป็นที่มาของจำนวนจุดที่ใช้ในการติดตั้ง strain gauge บนแขนกล ส่วนตำแหน่งที่ติดตั้งของ strain gauge มีอยู่ด้วยกันสองแบบดังรูปที่ 3.2 เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลการทดลองว่าตำแหน่งการติดตั้ง strain gauge ว่ามีผลต่างการอ่านค่าการทดสอบหรือไม่ การติดตั้งนั้นในแบบแรก ตำแหน่งของ strain gauge จุดที่ 2 จะอยู่ตรงกลางแขนซึ่งจะดูว่ามีผลต่อการอ่านค่าในโหมดที่ 3 ในการแกว่งของแขน ซึ่งมีการตอบสนองน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการติดตั้งในแบบที่ 2

การทดลองในส่วนการวัดโหมดเชฟในการเก็บข้อมูลจะเก็บในลักษณะอ่านจากอุปกรณ์รับข้อมูลซึ่งผลิตโดยบริษัท data translation ข้อมูลที่ได้รับจะแปลงสัญญาณจาก analog เป็น digital จำนวน 12 bit ลักษณะการอ่านข้อมูลจะอ่านจากแบบเรียงลำดับจาก channel ที่ต่ำไปยัง channel ที่สูง ในลักษณะการอ่านแบบเรียงกันไปช่วงเวลาความห่างการอ่านระหว่าง channel ขึ้นอยู่กับการกำหนดช่วงเวลาการอ่านของแผ่นรับข้อมูล สำหรับการอ่านข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้จะใช้ช่วงเวลาความห่างระหว่างการอ่านเท่ากับ 34 ไมโครวินาที ความถี่ประมาณ 29411 Hz.คือเป็นความเร็วประมาณ 980 เท่าของความเร็วที่ความถี่ในโหมดที่ 3 และ ลักษณะการอ่านข้อมูลจะใช้หมวด DMA (direct memory access) ข้อมูลที่อ่านได้จะเก็บเข้าแฟ้มข้อมูลแล้วจึงนำมาทำการวิเคราะห์ภายหลังเพื่อหาระยะการโก่งตัวของแขนและหาค่าโหมดเชฟได้

การทดลองเพื่อที่จะทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ออกจาก strain amplifier กับระยะการโก่งตัวของแขนกลการทดลองจะเริ่มต้นโดยการติดตั้ง strain gauge กับแขนกลเสร็จแล้วจะทำการวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านจาก strain amplifier กับระยะการโก่งตัวของแขนกล โดยจะทำการโก่งแขนกลไปในระยะต่างๆกันแล้วจดค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะนั้นๆ ของแต่ละหน้าตัดที่มี strain gauge ติดตั้งอยู่ แต่ละการโก่งของแขนสามารถที่จะหาความสัมพันธ์กับความเครียดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดนั้นได้ ดังนั้นจึงสามารถที่จะหาค่าความเครียดว่ามีความสัมพันธ์เป็นสมการกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจาก strain amplifier ได้ สำหรับการหาค่าของโหมดเชฟของแขนเป็นการหาการโก่งตัวของแขนในขณะที่แขนมีการเคลื่อนที่ จากสมการหาการเคลื่อนที่ของระบบต่อเนื่อง การเคลื่อนที่ของแขนจะประกอบด้วยผลรวมการคูณของค่าสมการโหมดเชฟ $\phi(x)$ และตัวแปรเจนเนอรัลไรซ์ โคออดิเนต $q(t)$ จำนวนเทอมของผลรวมจะเท่ากับจำนวนของค่าโหมดเชฟที่ต้องการพิจารณา สำหรับการวิจัยนี้จะใช้ค่าความถี่ธรรมชาติ 3 ค่าความถี่ ดังนั้นค่าการโก่งตัวของแขนจะสามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$u(x_i,t) = \phi_1(x_i)q_1(t) + \phi_2(x_i)q_2(t) + \phi_3(x_i)q_3(t) \qquad .....(39)$$

จากสมการ

$$\begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \end{bmatrix} = [A_o]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix}$$

จะพบว่าเมื่อหาความเครียดได้ก็จะสามารถหาค่าของตัวแปรเจนเนอรัลไรซ์ โคออดิเนต q(t)ได้ ดังนั้นจากสมการข้างบนค่าของ u(x,t) จะเป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรของโหมดเชฟต่างๆ ในจุดนี้จะสามารถอธิบายได้ว่ากรณีของการเคลื่อนที่อิสระแล้ว การโก่งตัวของแขนจะประกอบด้วยหลายโหมดการสั่นสะเทือนแต่ถ้ากรณีที่ใช้แรงภายนอกกระทำต่อระบบด้วยความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติที่หนึ่ง แล้วจะพบว่าจะทำให้แขนเกิดการแกว่งที่มีรูปร่างของโหมดเชฟที่หนึ่ง ก็แสดงให้เห็นว่าการโก่งของแขนจะมีค่าของโหมดเชฟเนียงโหมดเชฟเดียว ดังนั้นค่าการโก่งตัวของแขนที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแขนกลที่มี strain gauge ติดตั้งอยู่ก็จะสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(x_1,t) &= \phi_1(x_1)q_1(t) \\ u(x_2,t) &= \phi_1(x_2)q_1(t) \qquad \text{.....(40)} \\ u(x_3,t) &= \phi_1(x_3)q_1(t) \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าการโก่งตัวที่คำนวณได้จากสมการ (39) อ่านได้จากคอมพิวเตอร์ก็จะเท่ากับค่าของโหมดเชฟ คูณกับ ค่าของตัวแปรตัวหนึ่ง จะสามารถรู้ว่ารูปร่างของโหมดเชฟของแขนกลที่ความถี่ธรรมชาติต่างๆเป็นรูปร่างอย่างไรได้

ในส่วนของการทดลอง เพื่อทำการพิจารณาการแทนระบบของแขนกลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำการเปรียบเทียบได้ 2 วิธีด้วยกัน โดยวิธีแรกจะพิจารณาค่าของความถี่ธรรมชาติของระบบแบบจำลองแขนกลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล และส่วนที่สองจะทำการพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น ในส่วนของการเปรียบเทียบโดยวิธีการใช้ค่าความถี่ธรรมชาตินั้น สำหรับการทดลองจะใช้เครื่อง cross channel spectrum analyzer ในการวัดสำหรับการทดลองจะทำการขับมอเตอร์โดยใช้สัญญาณแบบ random ทำการสร้างโดยเครื่องวัดข้างต้นเป็นตัวสร้างสัญญาณจากนั้น สำหรับการต่อสายเพื่อวัดสัญญาณที่ออกจาก strain gauge เป็นการวัดสัญญาณที่ออกจากระบบโดยการต่อจากตัว strain gauge ของระบบมาเข้าที่ bridge box ของเครื่อง strain amplifier ซึ่งอุปกรณ์ตัวนี้จะเป็นการขยายสัญญาณที่เกิดจาก วงจรบริดจ์ ให้เพิ่มขึ้น จากนั้นสัญญาณที่ออกจาก strain amplifier

เข้าสู่เครื่องวัด cross channel spectrum analyzer ต่อไป ในการวัดด้วยเครื่องมือนี้จะต้องปรับเครื่องวัดให้อยู่ในหมวดการวัดแบบ เพาเวอร์ สเปคตรัม จึงจะได้รูปแบบของกราฟเพื่อที่จะทำการอ่านค่าของความถี่ธรรมชาติได้ ในส่วนการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของระบบแบบจำลองจะกระทำโดยการใช้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างจากบทที่ 2 ในสมการที่ 16

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t)$$

สำหรับตัวแปร u(t) เป็นค่าของข้อมูลที่เข้าสู่ระบบซึ่งจะใช้การสร้างข้อมูลทางคณิตศาสตร์แบบสุ่ม (random) เข้าสู่ระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวข้างต้น จากนั้นบันทึกค่าของสเตทที่เวลาต่างๆตลอดช่วงเวลาการวิเคราะห์ไว้ สำหรับสเตทที่จะนำมาทำการวิเคราะห์ก็คือค่า $q_1(t), q_2(t)$ จากนั้นนำค่าที่เก็บไว้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าของความเครียดที่เวลาต่างๆตลอดช่วงเวลาการเก็บข้อมูลทดสอบโดยจะใช้สมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{bmatrix} = c/l^2 \begin{bmatrix} \partial^2\phi_1/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_2/\partial\xi^2 \,|\xi=\xi_1 \\ \partial^2\phi_1/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_2/\partial\xi^2 \,|\xi=\xi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \end{bmatrix} \quad .....(41)$$

จากสมการจะทำให้ได้ค่าของความเครียดที่จุดที่ 1 คือที่ต้นแขนและที่จุดที่ 2 คือที่ตำแหน่งห่างจากจุดต้นแขนมาทางปลายแขนประมาณ 1/3 ของความยาวแขนจากนั้นนำค่าความเครียดของทั้งสองจุดและที่เวลาแต่ละการสุ่มข้อมูลมาทำการวิเคราะห์โดยการใช้ fast Fouries transform โดยรูปแบบของสมการที่จะวิเคราะห์จะเป็น

$$G_{yy}(f) = S_y(f)\, S^*_y(f) \quad .....(42)$$

เมื่อ $G_{yy}(f)$ = ค่าจำนวนเต็มของฟังก์ชั่น

$S_y(f)$ = ค่า complex number ที่ได้จากการใช้ Fourier transform ของสัญญาณจากความเครียด

$S^*_y(f)$ = ค่า complex conjugate ของค่า $S_y(f)$

ส่วนในการเปรียบเทียบค่าของ ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น ของทั้งที่ทำการทดลองจากการวัดแบบจำลองโดยการใช้เครื่องมือ cross channel spectrum analyzer และที่ได้จากแบบ

จำลองคณิตศาสตร์ เนื่องจากว่า ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น จะเป็นการแทนระบบโดยจะเป็นอัตราส่วนของค่าสัญญาณที่ออก ต่อ ค่าสัญญาณที่เข้าสู่ระบบ ดังนั้นไม่ว่าระบบแบบจำลองของแขนกลจริงหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ถ้าต้องการเปรียบเทียบการแทนกันของระบบจริงกับระบบคณิตศาสตร์ จะต้องพิจารณาที่ ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น ในการพิจารณาค่าของ ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น จะทำการทดลองแบบจำลองของแขนกลโดยการขับมอเตอร์โดยใช้สัญญาณ noise ที่สร้างจาก cross channel spectrum analyzer แล้วทำการขยายสัญญาณโดยผ่านเข้า D.C. Amplifier ขยายสัญญาณให้มีขนาดพอที่จะทำการขับมอเตอร์การวัดค่าของ ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น จะเป็นการเปรียบเทียบสัญญาณส่วนที่เข้าสู่ระบบซึ่งก็คือ สัญญาณที่เข้าสู่มอเตอร์ กับสัญญาณที่วัดได้ที่เป็นผลจากการกระทำต่อระบบซึ่งจากการทดลองสัญญาณที่ออกจากระบบที่ทำการวัดก็คือ สัญญาณอ่านจาก strain amplifier ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนตำแหน่งของแขนกล อุปกรณ์ที่ใช้ทำการวัดเปรียบเทียบของสัญญาณทั้งสองคือ cross channel spectrum analyzer โดยอุปกรณ์นี้จะทำการวัดค่าได้ทั้ง ขนาด เฟส ของ ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น ส่วนของการหาค่า ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น จากของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นทำการหาค่าโดยการสร้างเงื่อนไขการทำงานของระบบเช่นเดียวกับแบบจำลอง โดยการสร้างทอร์คแบบ random เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำงาน แล้วทำการเปรียบเทียบค่าของ strain กับค่าของทอร์ค การวิเคราะห์จะใช้ fast Fourier transform เพื่อใช้ในการหาค่าของ ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น วิธีการวิเคราะห์แบบจำลองแขนกลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น จากผลการวิจัยของ sangveraphunsiri,V. (1984) สำหรับรูปแบบของสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ จะมีรูปแบบเป็นดังนี้

$$H(f) = G_{yx}(f)/G_{xx}(f) \qquad \text{.....(43)}$$
$$= (S_y(f)S^*_x(f))/(S_x(f)S^*_x(f))$$

จากรูปแบบของสมการจะพบว่าค่า ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น จะเป็นผลจากเทอมของ $S_y(f)$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการใช้ fast Fourier transform ของสัญญาณที่ออกจากระบบหรือค่าของความเครียด ส่วนเทอมของ $S_x(f)$ เป็นค่าที่ได้จากการใช้ fast Fourier transform ของสัญญาณที่เข้าสู่ระบบหรือสัญญาณแบบ noise ที่เข้าสู่มอเตอร์

แบบจำลองของสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแขนกลแบบหยุ่นตัวที่จะนำไปใช้ในส่วนของการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะนำสมการที่ 16 ซึ่งเป็นสมการแบบต่อเนื่องมาเปลี่ยนแปลงให้เป็นสมการแบบเชิงตัวเลขดังนี้

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t)$$

$$[A_c] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ & & & 0 & 0 & 0 \\ -[M]^{-1}[K] & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[B_c] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \\ [M]^{-1}[b] \\ \\ \end{bmatrix}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} J_o + Ml^2 + I_o & Ml\phi_{1E} + w_1 & w_2 + Ml\phi_{2E} \\ w_1 + Ml\phi_{1E} & m + M\phi_{1E}^2 + J_p\phi'^2_{1E} & M\phi_{1E}\phi_{2E} + J_p\phi'_{1E}\phi'_{2E} \\ w_2 + Ml\phi_{2E} & M\phi_{1E}\phi_{2E} + J_p\phi'_{1E}\phi'_{2E} & M\phi_{2E}^2 + J\phi'^2_{2E} + m \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_1 & 0 \\ 0 & 0 & K_2 \end{bmatrix}$$

$$[b] = \begin{bmatrix} T_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[x] = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ q_1 \\ q_2 \\ \dot{\theta} \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}$$

ในการใช้งานจะเปลี่ยนแปลงจากระบบแบบต่อเนื่องเป็นระบบเชิงตัวเลขโดยการใช้การประมาณค่าซึ่งใช้อนุกรมทางคณิตศาสตร์โดยมีรูปแบบดังนี้

$$[A] = e^{[A_c]T} = I + [A_c]T + [A_c]^2T^2/2! + [A_c]^3T^3/3! + \ldots\ldots$$

$$= I + [A_c]T\psi$$

$$\psi = I + [A_c]T/2! + [A_c]^2T^2/3! + \ldots\ldots$$

$$[B] = \sum_{k=0}^{n} [A_c]^k T^{k+1} [B_c]/(k+1)!)$$

$$= \psi T[B_c]$$

จากรูปแบบข้างต้นจะเป็นรูปแบบที่สร้างขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้ในงานการคำนวณทางคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าของเมทริกซ์ ในระบบเชิงตัวเลข ซึ่งจะมีรูปแบบเป็น

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \qquad \ldots\ldots(44)$$

I13101484

การติดตั้ง strain gauge และการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความต่างศักย์ไฟฟ้า

ในการวัดระยะการโก่งของแขนสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ strain gauge เพื่อวัดค่าความเครียดที่ตำแหน่งบนแขนกล และจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้แสดงดังสมการที่(17) เมื่อค่าของตรงตำแหน่งที่ strain gauge ติดตั้งอยู่สามารถที่จะหาค่าตัวแปร เจนเนอรัลไรซ์โคออดิเนต ได้ จากตัวแปรนี้ก็สามารถหาค่าระยะการโก่งตัวได้ต่อไป ดังนั้นในเบื้องต้นของการทดลองแล้วจึงควรที่จะหาค่าความสัมพันธ์ ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นบนแขนกลตรงตำแหน่งติดตั้ง strain gauge กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และเพื่อให้ผลการทดลองที่ถูกต้องก็ควรที่จะทำการระมัดระวังเกี่ยวกับการติดตั้ง strain gauge

การติดตั้ง strain gauge บนแขนกล และรูปแบบการวางตำแหน่งของ strain gauge ในงานวิจัยได้ทำการวางตำแหน่งการติดตั้ง strain gauge ไว้ด้วยกันอยู่ 2 แบบ คือ ดังรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 โดยแบบที่ 1 ตำแหน่งที่ 1 จะอยู่ที่ตำแหน่งต้นแขน ตำแหน่งที่ 2 จะอยู่กึ่งกลางแขน และตำแหน่งที่ 3 จะอยู่ที่ปลายแขนกลการติดตั้ง strain gauge ที่ตำแหน่งดังกล่าวมีจุดที่น่าสนใจอยู่ที่ตำแหน่งที่ 3 คือจุดที่ปลายแขนกล จุดนี้จะไม่มีประโยชน์ถ้าใช้งานแบบแขนกลแบบแขนเดียว หรือน้ำหนักที่ติดที่ปลายแขนมีค่าน้อยมากทั้งนี้เนื่องจากการติดตั้งที่ตำแหน่งดังกล่าวจะมีค่าความเครียดเกิดขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับตำแหน่งต่างๆของแขนกล แต่ถ้าแขนกลเป็นแบบหลายแขนต่อกัน จะทำให้ขณะการเคลื่อนที่ปลายแขนจะมีการบิดตัว ดังนั้นการติดตั้ง strain gauge แบบนี้ จึงคลาดว่าน่าจะมีการนำไปใช้งานในภายหน้าเพื่อวิจัยต่อไป สำหรับในแบบที่ 2 ตำแหน่งที่ 1 จะอยู่ที่ต้นแขน ตำแหน่งที่ 2 จะอยู่ที่ระยะทาง 1/3 ของความยาวแขนห่างจากจุดหมุน และตำแหน่งที่ 3 อยู่ที่ระยะทาง 2/3 ของความยาวแขนห่างจากจุดหมุน การวางตำแหน่งของ strain gauge ลักษณะนี้เป็นผลมาจากการพิจารณารูปร่างของโหมดเชฟทั้ง 3 ซึ่งการวางตำแหน่งดังกล่าวสามารถรับค่าความเครียดในแต่ละโหมดเชฟได้ดีกว่าแบบที่ 1 หลังจากการกำหนดรูปร่างการติดตั้ง strain gauge แล้วจึงทำการติดตั้ง strain gauge ลงตำแหน่งดังกล่าว ในการติดตั้ง strain gauge สิ่งที่ต้องพิจารณาร่วมกันคือ ตัวประสานหรือกาวที่ใช้ในการติดตั้งซึ่งสามารถดูได้จากเอกสารที่แนบมากับ strain gauge ได้ สำหรับการดำเนินงานเพื่อการติดตั้งในขั้นแรกจะทำการขัดบริเวณที่จะติดตั้งด้วยกระดาษทรายละเอียดจนกระทั่งผิวบริเวณนั้นมีความราบเรียบจากนั้นจะใช้น้ำยา contact clearner เพื่อจะทำความสะอาดบริเวณขัด แล้วจึงลากเส้นด้วยดินสอที่ตำแหน่งติดตั้ง strain gauge แล้วจึงทากาวที่ตัว strain gauge แล้วจึงมาติดที่บริเวณที่ต้องการจากนั้นมาทำการกดที่ตัว strain gauge เพื่อให้เกิดการติดที่แนบสนิทกับแขนกลเวลาทำการกดขึ้นอยู่กับชนิดของกาวที่ใช้ หลังจากเลิกกดแล้วจะปล่อยในภาวะปกติระยะเวลาหนึ่งจึงนำไปทดลองได้

การวัดหาความสัมพันธ์ค่าของความเครียด กับ ค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จาก strain amplifier วิธีการทดลองจะทำการโก่งแขนโดยให้จุดปลายแขนเคลื่อนที่ไปในระยะที่ต้องการ การโก่งจะกระทำเหมือนกับการให้แรงกระทำที่ปลายแขนแบบเป็นจุดและจากเงื่อนไขของแรงที่กระทำเป็นจุดที่ตำแหน่งปลายแขนก็สามารถสร้างความสัมพันธ์ของการโก่งตัวของแขนกลที่ตำแหน่งๆ กับการโก่งตัวที่ปลายแขน จากระยะการโก่งตัวและเงื่อนไขของจุดที่แรงกระทำจะทำให้สามารถหาค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของแขนได้ ดังนั้นการทดลองเมื่อทำการโก่งแขนที่จุดปลายแขนก็สามารถหาค่าการโก่งของแขนที่ตำแหน่งที่มี strain gauge ติดตั้งอยู่ และเช่นเดียวกันก็สามารถแทนระยะการโก่งตัวของแขนที่ตำแหน่งนั้นๆด้วยได้เช่นกัน ดังนั้นการทดลองจะทำการโก่งแขนที่ปลายแขนที่ระยะที่กำหนดค่าหนึ่ง จากนั้นทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากอุปกรณ์ strain amplifier ซึ่งในขณะนี้จะได้ความสัมพันธ์ของความเครียดที่ระยะการโก่งนี้กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งนี้ จากนั้นทำการโก่งแขนที่ระยะอื่นๆ ต่อไป และทำการบันทึกค่าความสัมพันธ์ของความเครียดและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะต่างๆเอาไว้ จากนั้นนำค่าความเครียดและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่การโก่งของแขนที่ระยะต่างๆกันมาพิจารณาเป็นสมการ โดยเบื้องต้นรู้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าของความเครียดและความต่างศักย์ไฟฟ้าเชิงเส้นต่อกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ก็จะสามารถทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีแบบ least square fitting เพื่อทำการหาค่าตัวแปรของสมการเชิงเส้นตรงได้ จากวิธีการทดลองข้างต้นจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ของค่าความเครียดกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก strain amplifier ที่ตำแหน่งที่มีการติดตั้ง strain gauge อยู่ซึ่งจะได้เป็นรูปแบบของสมการที่(35)ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \qquad \text{.....(35)}$$

โดยที่ค่า a,b,c เป็นค่าคงที่ที่ได้จากวิธีการหาข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว

<u>การวิเคราะห์ทางทฤษฎี</u>

1. การหาค่าความถี่ธรรมชาติ จะใช้เมทริกซ์จากสมการที่ (30),(33) โดยในโหมดเชฟที่ 1 จะใช้สมการที่ (30)และในโหมดเชฟที่ 2 จะใช้สมการที่ (33)

สำหรับโหมดเชฟที่ 1

$$\begin{bmatrix} (-\sin\beta-\sinh\beta) & (\cos\beta-(2I^{*}/\beta^{3})\sinh\beta+\cosh\beta) \\ (-\cos\beta-\cosh\beta & (-\sin\beta-(2I^{*}/\beta^{3})\cosh\beta+\sinh\beta+\cosh\beta \\ \quad +(M/\rho 1)(\sin\beta-\sinh\beta)) & \quad +(M\beta/\rho)(-\cos\beta-(2I^{*}/\beta^{3})\sinh\beta)) \end{bmatrix} = 0 \quad .(30)$$

เมื่อ $I^{*} = \rho 1^{3}/I_{o}$

สำหรับโหมดเชฟที่ 2,3

$$\begin{bmatrix} (-\sin\beta-\sinh\beta) & (\cos\beta+\cosh\beta) \\ (-\cos\beta-\cosh\beta & (-\sin\beta+\sinh\beta+(M\beta/\rho 1)(\cosh\beta-\cos\beta) \\ \quad +(M\beta/\rho 1)(\sin\beta-\sinh\beta) & \end{bmatrix} = 0 \quad .(33)$$

2. การหาค่าของโหมดเชฟจะใช้สมการที่ (32) และ (34) โดยในโหมดเชฟที่ จะใช้สมการที่และในโหมดเชฟที่ 1 จะใช้สมการที่ (34)

สำหรับโหมดเชฟที่ 1

$$\phi(\xi) = \sin(\beta\xi)-\sinh(\beta\xi)+ \gamma[-\cos(\beta\xi)+\cosh(\beta\xi)-(2I^{*}/\beta)\sinh(\beta\xi)+(2I^{*}/\beta^{2})\xi] \quad .....(32)$$

$$\gamma = (\sin(\beta)-\sinh(\beta))/((-2I^{*}/\beta^{2})\sinh(\beta)+\cosh(\beta)+\cos(\beta)+\cosh(\beta))$$

สำหรับโหมดเชฟที่ 2,3

$$\phi(\xi) = \sin(\beta\xi)-\sinh(\beta\xi)+\gamma[\cos(\beta\xi)-\cosh(\beta\xi)] \quad .....(34)$$

$$\gamma = (\sin(\beta)+\sinh(\beta))/(\cos(\beta)+\cosh(\beta))$$

สรุปขั้นตอนการทดลอง

1. การทดลองเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ สำหรับเครื่องมือที่จะใช้ทดสอบจะใช้ cross channel spectrum analyzer ในการทดลองสามารถทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติโดยการใช้การทดลองในหมวด เพาเวอร์ สเปคตรัม โดยสัญญาณที่เข้าสู่เครื่องวัดจะเป็นสัญญาณจาก strain amplifier

2. การทดลองเพื่อหาค่าโหมดเชฟโดยสมการที่ใช้ในการทดลองจะใช้สมการที่(38) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้สำหรับการหาค่าการโก่งตัวของแขนโดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} u(\xi_1,t) \\ u(\xi_2,t) \\ u(\xi_3,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1(\xi_1) & \phi_2(\xi_1) & \phi_3(\xi_1) \\ \phi_1(\xi_2) & \phi_2(\xi_2) & \phi_3(\xi_2) \\ \phi_1(\xi_3) & \phi_2(\xi_3) & \phi_3(\xi_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial^2\phi_1(\xi_1)/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_2(\xi_1)/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_3(\xi_1)/\partial\xi^2 \\ \partial^2\phi_1(\xi_2)/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_2(\xi_2)/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_3(\xi_2)/\partial\xi^2 \\ \partial^2\phi_1(\xi_3)/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_2(\xi_3)/\partial\xi^2 & \partial^2\phi_3(\xi_3)/\partial\xi^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \qquad \text{.....(38)}$$

โดยการทดลองจะทำการสั่นแขนที่แต่ละความถี่ธรรมชาติเพื่อที่จะได้ค่าของโหมดเชฟแต่โหมดเชฟ เช่นสมมุติว่าจะหาค่าโหมดเชฟที่ 1 ก็จะทำการสั่นแขนให้แกว่งที่ความถี่ธรรมชาติที่ 1 ดังนั้นผลการทดลองควรจะมีค่าตรงกับสมการที่(40)ซึ่งมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$\begin{aligned} u(x_1,t) &= \phi_1(x_1)q_1(t) \\ u(x_2,t) &= \phi_1(x_2)q_1(t) \\ u(x_3,t) &= \phi_1(x_3)q_1(t) \end{aligned} \qquad \text{.....(40)}$$

ถ้าผลการทดลองตรงกับสมการข้างต้นจะทำให้สามารถหาค่าโหมดเชฟของแขนกลได้สำหรับความหมายของ ξ_1,ξ_2,ξ_3 จะแทนค่าของ x_1/l, x_2/l, x_3/l โดย 1, 2, 3 จะแทนตำแหน่งที่มีการติดตั้ง strain gauge ซึ่งหมายเลข 1 จะแทนตำแหน่งต้นแขนส่วนหมายเลข 2,3 จะแทนตำแหน่งที่ติดตั้งถัดออกมาจากตำแหน่งต้นแขนมายังปลายแขนอิสระ ซึ่งรูปแบบการติดตั้ง strain gauge และตำแหน่งต่างๆดูได้จากรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5

3. การทดลองเพื่อหาค่า ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น โดยใช้เครื่องมือ cross channel spectrum analyzer โดยจะใช้การทดลองในหมวด ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น วิธีการวัดใน

โหมดนี้จะใช้สัญญาณเข้าสู่เครื่องทดลอง 2 สาย โดยสายแรกเป็นสายของสัญญาณของ noise ที่ใช้ขับมอเตอร์ส่วนอีกสายเป็นสัญญาณที่ออกจาก strain amplifier

การทดสอบสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยจะใช้ใช้สมการที่ (16)แต่เนื่องจากสมการนี้เป็นระบบแบบต่อเนื่องดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องแปลงระบบเป็นแบบเชิงตัวเลข(digital system)โดยจะมีรูปแบบสมการเป็น

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k$$

โดยเมเทริกซ์ A,B เปลี่ยนแปลงจากระบบแบบต่อเนื่องเป็นระบบแบบเชิงตัวเลขแล้ว ในการทดสอบสมการแบบจำลองจะทดสอบดังนี้

1. หาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบโดยการให้ค่า u_k เป็นแบบ random ให้กับระบบแบบจำลองจะทำให้ได้ค่าสเตท x_k ที่เวลาต่างๆกันจากนั้นนำผลของ $q_1(k), q_2(k)$ ไปพิจารณาหาค่า $\varepsilon_1(k)$, $\varepsilon_2(k)$ ที่เวลาต่างๆกัน ผลของความเครียดที่เวลาใดๆนี้จะเป็นส่วนที่ออกจากระบบดังนั้นจึงพิจารณาหาค่า เพาเวอร์ สเปตรัม ได้จากสมการที่(42)ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลไปพิจารณาเขียนกราฟเพื่อสังเกตุหาค่าความถี่ธรรมชาติได้

2. การหาค่าโหมดเชฟของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการให้ค่า u_k เป็นแบบ sine wave ที่มีความถี่ธรรมชาติหนึ่งๆ ถ้าสมมุติว่าต้องการหาค่าโหมดเชฟที่หนึ่งก็จะให้ค่าของ u_k เป็นแบบ sine wave ที่ค่าความถี่ธรรมชาติแรก ซึ่งจากสมการสเตทผลที่ได้คือ $q_1(k)$, $q_2(k)$ ที่เวลาใดๆ ในช่วงเวลาการทดลอง โดยค่านี้จะนำไปใช้กับสมการที่(39)ซึ่งจะทำให้ได้ขนาดของโหมดเชฟของแขนกลดังรูปที่ 4.21,4.22

3. การหาค่าของ ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น โดยการให้ค่าของ u_k เป็นแบบ random ให้กับระบบแบบจำลอง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าสเตทที่เวลาใดๆ จากนั้นนำผลของ $q_1(k)$, $q_2(k)$ ไปพิจารณาหาค่า $\varepsilon_1(k)$,$\varepsilon_2(k)$ ที่เวลาใดๆได้โดยค่าของ $\varepsilon_1(k)$,$\varepsilon_2(k)$ คือค่าของส่วนที่ออกจากระบบ ดังนั้นการหาค่า ทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น จะใช้สมการที่(43)ดังนี้

$$H(f) = [S_{yx}(f)S_{xx}^{*}(f)]/[S_{xx}(f)S_{xx}^{*}(f)] \qquad .....(43)$$

สำหรับผลการหาค่าทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่นของงแบบจำลองจะได้ดังรูปที่ 4.25

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น Models R-80,RMG 1520,063-33-004 ผลิตโดย Electro-Craft รับทอร์คสูงสุด 45 lb-in/A ค่าความเฉื่อยของโรเตอร์ 0.0019 lb-in-sec^2 ค่าเดมปิ้งคงที่ 0.16 lb-in/krpm ค่าทอร์คคงที่ (±10 %) 1.05lb-in/A ค่าโวลต์เตจคงที่ (±10 %) 12.4 v/rpm ค่าความต้านทานขดลวด (±15 %,25 c) 0.32 โอห์ม ค่า inductance ของอาร์เมเจอร์ 0.7 mH

2. strain gauge ชนิด B-FAE-5-120 T11 P15 W03 ผลิตโดย Shinkoh ความยาวเกจ 5 mm. เกจเฟคเตอร์ 2.04 ±1 % ค่าความต้านทาน 120.0 ±0.3 โอห์ม จำนวนที่งาน 15 ตัว

3. คาน หรือ แขนกล ที่ในงานวิจัยทำจากวัสดุ อลูมิเนียม มีขนาดที่แตกต่างกัน 3 แบบดังนี้

1. 5.8 x 0.3175 x 120 cm.
2. 4 x 0.15 x 100 cm.
3. 4 x 0.15 x 100 cm. (จำนวน 2 แผ่น ประกบ)

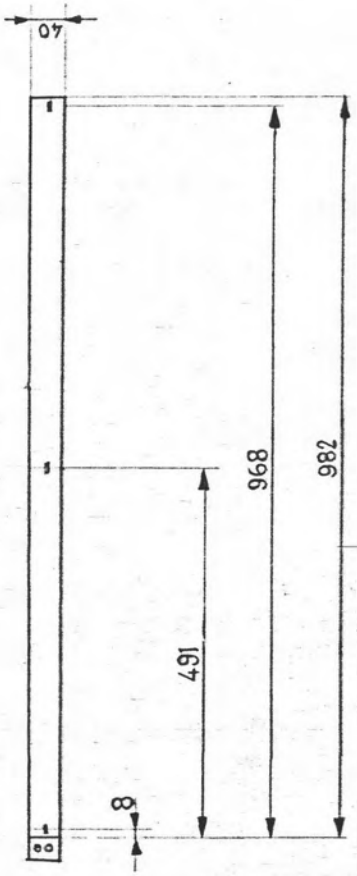
4. น้ำหนักที่ปลายแขนมีขนาดดังนี้ 0.0238 ก.ก. 0.1 ก.ก.

5. D.C.Amplifier รุ่น LA-5600 ผลิตโดย Electro-Craft

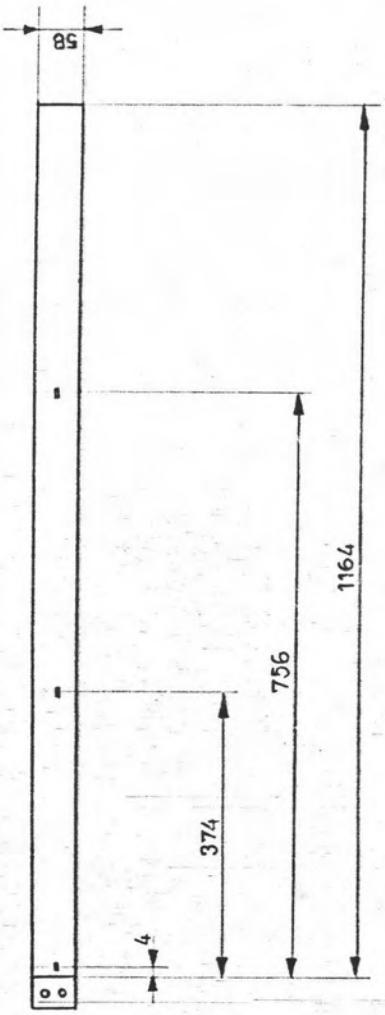
6. strain amplifier รุ่น 3126 จำนวน 6 channel ผลิตโดย Yokogawa electric work,LTD. สัญญาณออกจากเครื่องทดสอบมี 2 ช่วงใช้งานคือ ±1.5V.±3 V. ขนาดความต้านทานที่ bridge box ขนาด 120 โอห์ม

7. cross channel spectrum analyzer รุ่น model 5820A สามารถทำการวัดในโหมดเพาเวอร์ สเปคตรัม และทรานสเฟอร์ ฟังก์ชั่น และสามารถที่จะสร้างสัญญาณแบบ noise นำไปใช้งานภายนอกได้ มีช่องการรับสัญญาณเข้า 2 ช่องและ ช่องส่งสัญญาณออก 1 ช่อง สามารถควบคุมด้วย IEEE 488 ได้ด้วย

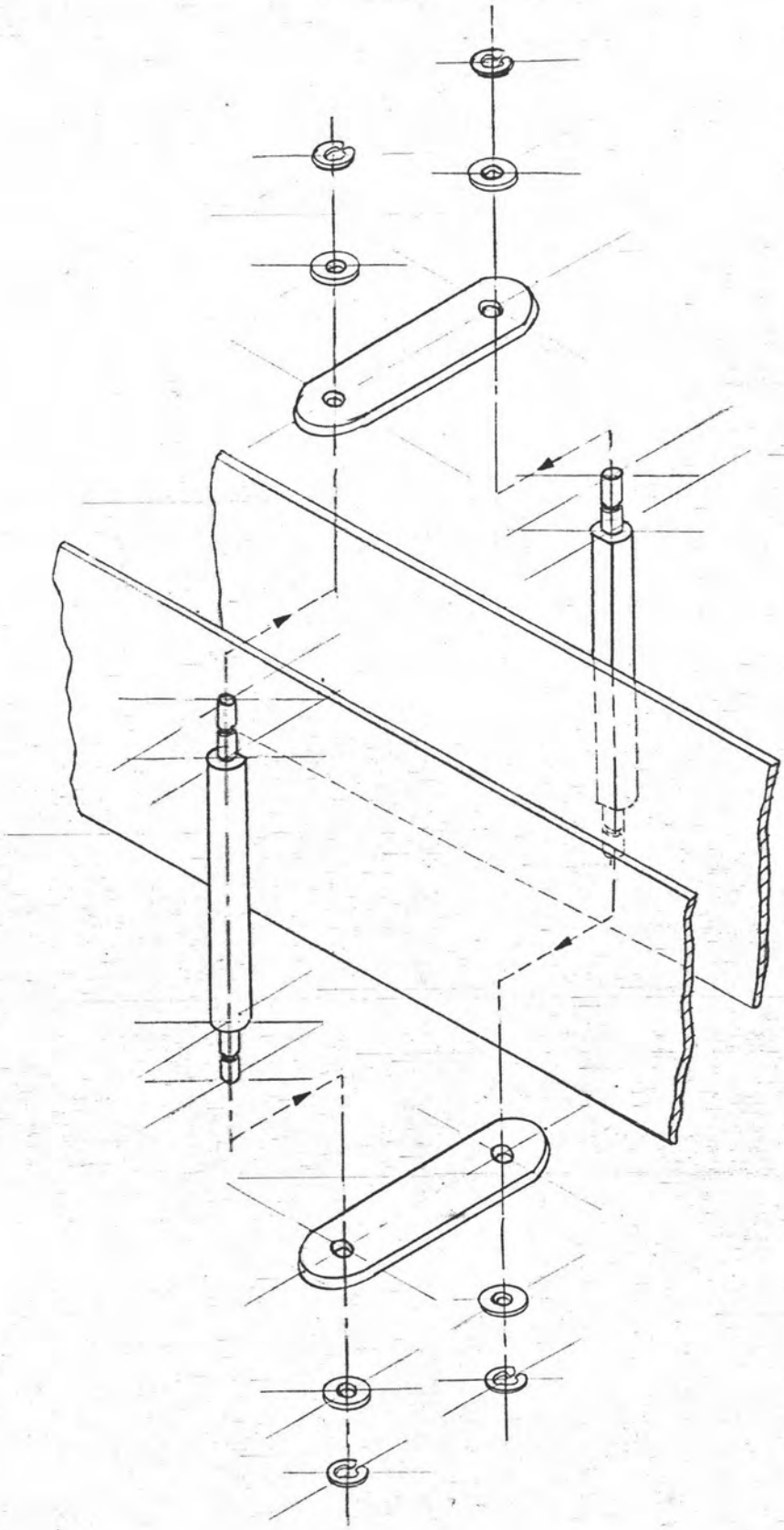
8. อุปกรณ์รับส่งข้อมูล ผลิตโดย data translation ข้อมูลที่รับได้จะถูกแปลงจากสัญญาณ analog เป็นแบบ digital แบบ 12 บิต สามารถรับสัญญาณเข้าจำนวน 16 ช่อง และส่งสัญญาณออก 2 ช่อง ความเร็วสูงสุดของแต่ละการเก็บข้อมูลเท่ากับ 34 ไมโครวินาที



รูปที่ 3.4 แสดงการติดตั้ง strain gauge แบบที่ 1



รูปที่ 3.5 แสดงการติดตั้ง strain gauge แบบที่ 2



รูปที่ 3.6 แสดงชิ้นส่วนประกอบของการยึดแผ่นประกบกันโคลงของแขนกลแผ่นบางคู่

ขนาดและคุณสมบัติของแขนกลที่ใช้ในการทดลอง

แขนกลที่ทำจากอลูมิเนียมแผ่นหนา (5.8x0.3175x116.4 cm.)

ความยาวแขนในช่วงทดสอบ	1.164	m.
ความหนา	0.003175	m.
ความกว้าง	0.058	m.
มวลของแขนในช่วงทดสอบ	0.58089	kg.
น้ำหนักที่ติดที่ปลายแขนเมื่อใช้ทดสอบ	0.1	kg.
ความหนาแน่นของวัสดุอลูมิเนียม	2710	$kg./m.^3$

แขนกลที่ทำจากอลูมิเนียมแผ่นบาง (4x0.15x98.2 cm.)

ความยาวแขนในช่วงทดสอบ	0.982	m.
ความหนา	0.0015	m.
ความกว้าง	0.04	m.
มวลของแขนในช่วงทดสอบ	0.15967	kg.
น้ำหนักที่ติดที่ปลายแขนเมื่อใช้ทดสอบ	0.0238	kg.
ความหนาแน่นของวัสดุอลูมิเนียม	2710	$kg./m.^3$

แขนที่ทำจากอลูมิเนียมแผ่นบางคู่ (4x0.15x98.3 cm.)

ความยาวแขนในช่วงทดสอบ	0.982	m.
ความหนา	0.0015	m.
ความกว้าง	0.04	m.
ขนาดของแผ่นประกบกันโคลง		
ความยาว	0.04	m.
ความหนา	0.0015	m.
ความกว้าง	0.01	m.

ขนาดของแกนยึดแผ่นประกบกันโคลง		
แท่งกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง	6.10×10^{-3}	m.
ความลึกที่ปาดผิวแท่งกลม	0.95×10^{-3}	m.
น้ำหนักของแท่งกลมประมาณ	3.17×10^{-3}	kg.
จำนวนแท่งกลมที่ใช้งาน	8	แท่ง
บูชรองและแหวนล็อคแผ่นกันโคลงอย่างละ	8	ชิ้น
มวลของแขนช่วงความยาวการทดสอบ	0.31934	kg.
จำนวนแผ่นประกบที่ใช้	8	แผ่น
น้ำหนักที่ติดที่ปลายแขนเมื่อใช้ทดสอบ	0.1	kg.
ความหนาแน่นของวัสดุอลูมิเนียม	2710	$kg./m.^3$