

การปรับปรุงเสถียรภาพของเทคนิค PPF เพื่อควบคุมการสั่นสะเทือนของคานด้วยเทคนิค NVF

Stability Improvement of a PPF Technique for Controlling Beam Vibrations using an NVF technique

วีรวุฒิ จิรนันทศักดิ์* จักร จันทลักขณา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร 0-2913-2500-24 ต่อ 8308, อีเมล T_I_K_K_Y@HOTMAIL.COM

Weerawuth Jiranuntasak Chak Chantalakhana

Department Of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, KMUTNB

Bangsue Bangkok 10800

Tel. 0-2913-2500-24 ext 8308 E-Mail address: T_I_K_K_Y@HOTMAIL.COM

บทคัดย่อ

เทคนิคการควบคุมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างพลาสมา เช่น การป้อนกลับของค่าตำแหน่งบวก (Positive Position Feedback, PPF) เป็นเทคนิคที่ออกแบบเพื่อปรับปรุงด้านเสถียรภาพของวิธีป้อนกลับในเพื่อควบคุมการสั่นของโครงสร้าง โดยจำนวนโหมดการสั่นที่ทำการควบคุม จะนำมาออกแบบจำนวนตัวกรองที่ใช้ในการควบคุม อย่างไรก็ตาม แม้เทคนิคนี้ได้นำมาใช้กันมากขึ้นในการควบคุมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างแบบ Smart Structures ที่ใช้วัสดุสมาร์ต (Smart Materials) เช่น แผ่นเพียโซเซรามิก เป็นตัวกระตุ้นควบคุม แต่ข้อจำกัดด้านฮาร์ดแวร์อาจจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของการควบคุมได้ การศึกษานี้ได้นำเสนอการปรับปรุงเสถียรภาพของเทคนิค PPF โดยการทำงานร่วมกับเทคนิคป้อนกลับความเร็วค่าลบ (Negative Velocity Feedback, NVF) โดยทำการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลข กับแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ของคานยื่น เพื่อวิเคราะห์การประยุกต์ใช้วิธีการปรับปรุงดังกล่าว

Abstract

The Positive Position Feedback technique (PPF) is one of techniques used for controlling vibrations of flexible structures. Originally, the technique is designed to improve a feedback control technique for controlling structural vibrations. A number of controlled modes, is specified as related to a number of filters used for a controller. However, the technique is widely used to

apply for smart structures, especially used a piezo-ceramic patch as an actuator. Limitation of hardware is also effected to the stability of the controller. This study is presented stability improvement of PPF technique by incorporating with Negative Velocity Feedback (NVF) technique. A numerical study is performed with a finite element model of the cantilever beam.

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคนิคการควบคุมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อาทิเช่น ตัวควบคุมแบบโมดัล ตัวควบคุมแบบป้อนกลับค่าตำแหน่ง ตัวควบคุมแบบป้อนกลับความเร็วค่าลบ เป็นต้น ซึ่งตัวควบคุมที่กล่าวมานี้ เป็นตัวควบคุมที่ใช้ในการลดความสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางกลด้วยการใช้อุปกรณ์กระตุ้น (Exciter) และในการศึกษานี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับค่าตำแหน่ง (PPF) ซึ่งตัวควบคุมนี้จะรับประกันความเสถียร ในกรณีที่ตำแหน่งการหยังสัญญาณ (Sensor) และตำแหน่งการกระตุ้นควบคุม (Actuator) นั้นอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกัน (Collocated Sensor/Actuator) [1] อย่างไรก็ตามในบางกรณีของการประยุกต์ใช้เทคนิค PPF นี้ อาจจะไม่สามารถทำให้เป็นแบบ Collocated กันได้อย่างแท้จริง หรือข้อจำกัดด้านความเร็วการประมวลผล DSP ในกรณีที่ต้องการควบคุมโหมดการสั่นจำนวนมาก ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหา Spillover ที่มีผลต่อเสถียรภาพของตัวควบคุมเช่นเดียวกับที่เกิดในระบบควบคุมแบบโมดัล (Modal controller) [2] ในแนวคิดการออกแบบสามารถเป็นแบบ Non-

collocated ได้ โดยโหมดที่ไม่ได้ถูกออกแบบให้มีการควบคุมสามารถถูกกระตุ้นได้ ซึ่งปัญหาในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นกับโครงสร้างที่มีความหน่วงในตัวเองน้อย หรือโครงสร้างปลิวไหว (Flexible structures) เช่น คาน แผ่นเรียบบาง เป็นต้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัย [3] ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค PPF เพื่อควบคุมการสั่นและเสียงรบกวนของแผ่นเรียบบาง ซึ่งปัญหา Spillover นี้ยังสามารถเกิดขึ้นได้ในย่านความถี่สูงที่ 4000 Hz เนื่องจากฟิลเตอร์ของตัวควบคุม PPF ที่ออกแบบมี Roll-off ที่ไม่พอต่อการป้องกันผลกระทบด้านล่าช้าของสัญญาณป้อนกลับ เทคนิค PPF มักถูกอ้างเทียบกับ เทคนิค NVF ซึ่งทั้งคู่ถือเป็น Low authority controllers ที่ไม่จำเป็นต้องมีแบบจำลองที่แม่นยำเพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุม เทคนิค PPF ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหา Spillover และข้อจำกัดในการปฏิบัติจริงของเทคนิค NVF [1] ซึ่งในงานวิจัย [4] ได้เปรียบเทียบปัญหา Spillover ในทั้งสองเทคนิค และพบว่า เทคนิค PPF ไม่ไวต่อ Spillover เหมือนเช่นเทคนิค NVF แต่กระนั้นก็ดี ความจำเป็นของการเป็น Collocated sensor/actuator นั้นอาจถือเป็นข้อจำกัดของเทคนิค PPF ประการหนึ่งในการประยุกต์ใช้จริง

ดังนั้นการศึกษานี้ต้องการนำเสนอการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบควบคุม PPF โดยการใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับความเร็วค่าลบ (NVF) มาทำงานร่วมกันเพื่อทำให้ระบบเกิดความเสถียรมากขึ้น

2. ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีตัวควบคุมแบบ Positive Position Feedback (PPF) [1]

จากสมการการเคลื่อนที่ ที่สร้างจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx &= -S^T Cu \\ \ddot{u} + 2\zeta_f \omega_f \dot{u} + \omega_f^2(u - S\dot{x}) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

เปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ใน Modal coordinate

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad x &= \phi \xi \\ u &= S \phi \eta \\ \phi^T M \phi &= I_N \\ \text{และ} \quad \phi^T D \phi &= \alpha \\ \phi^T K \phi &= \Omega = \text{diag}(\omega_n^2) \end{aligned}$$

โดยที่ x และ u คือระยะขจัดของโครงสร้างและตัวกรองควบคุมตามลำดับ S คือเมตริกซ์แสดงคู่ของตัววัดสัญญาณและตัวกระตุ้น ζ และ η คือ Modal coordinate ของโครงสร้างและตัวกรองตามลำดับ เมตริกซ์ M, D, K และ C คือ เมตริกซ์มวล ความหน่วง ความแข็ง ดึงและเมตริกซ์เอาต์พุตตามลำดับ และ ϕ คือ ไอเกนเวกเตอร์ของโครงสร้าง ซึ่งสมการข้างต้นนี้คือการเปลี่ยนรูปสมการของระบบทางกลจาก Physical coordinate เป็น Modal coordinate ดังนี้ คือ

$$\ddot{\xi} + \alpha \dot{\xi} + \Omega \xi = -\phi^T S^T C S \phi \eta = -B \eta = -\gamma \eta$$

โดยมีตัวชดเชยควบคุม

$$\ddot{\eta} + 2\zeta_f \omega_f \dot{\eta} + \omega_f^2(\eta - \xi) = 0$$

ที่ซึ่ง ζ, ζ_f คือ อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างและตัวกรองตามลำดับ ω, ω_f คือความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างและตัวกรองตามลำดับ และ γ คือค่าคงที่ที่ใช้ในการปรับตั้งตัวกรอง และเมื่อได้

สมการแล้วจึงทำการประมาณค่าของแต่ละโหมดที่จะทำการควบคุมโดยให้อยู่ในรูปอย่างง่าย คือ

$$(s^2 + \beta_i s + \omega_i^2)(s^2 + \beta_{pi} s + \omega_{pi}^2) - \omega_i^2 \omega_{pi}^2 \gamma_i = 0, \quad i=1, \dots, N_A \quad (2)$$

$$\text{โดยที่} \quad \beta_{pi} = 2\zeta_{pi} \omega_{pi} \quad \text{และ} \quad \beta_i = 2\zeta_i \omega_i = \delta_{ii}$$

แล้วเราจะทำการออกแบบตัวกรองแต่ละตัวโดยการกำหนดค่า Closed-loop damping เปรียบเทียบกับสมการที่ 2

$$(s^2 + \beta_{pi} s + \omega_{pi}^2)(s^2 + \beta_{qi} s + \omega_{qi}^2) = 0 \quad (3)$$

และสมการสัมประสิทธิ์ของ s^k จะได้

$$\begin{aligned} s^3: \beta_i + \beta_{pi} &= \beta_{pi} + \beta_{qi} \\ s^2: \omega_i^2 + \omega_{pi}^2 + \beta_i \beta_{pi} &= \omega_{pi}^2 + \omega_{qi}^2 + \beta_{pi} \beta_{qi} \\ s^1: \omega_i^2 \beta_{pi} + \omega_{pi}^2 \beta_i &= \omega_{pi}^2 \beta_{qi} + \omega_{qi}^2 \beta_{pi} \\ s^0: \omega_i^2 \omega_{pi}^2 (1 - \gamma_i) &= \omega_{pi}^2 \omega_{qi}^2 \end{aligned}$$

สมมุติให้ ω_{pi} เป็น closed loop modal frequency ทำโดยเจาะจงค่า β_{pi} และค่าตัวแปรสี่ตัวที่ยังไม่ทราบค่า คือ $\beta_{qi}, \omega_{pi}, \omega_{qi}, \gamma_i$ หาค่าโดยทำการออกแบบโดย จาก

$$\begin{aligned} \beta_{qi} &= \beta_i + \beta_{pi} - \beta_{pi} \\ G_{li} &= \omega_i^2 + \omega_{pi}^2 + \beta_i \beta_{pi} - \beta_{qi} \beta_{pi} \\ G_{2i} &= \beta_i \omega_{pi}^2 + \beta_{pi} \omega_i^2 \\ \omega_{pi}^2 &= \frac{G_{2i} - \beta_{pi} G_{li}}{\beta_{qi} - \beta_{pi}} \\ \omega_{qi}^2 &= \frac{G_{2i} - \beta_{qi} G_{li}}{\beta_{pi} - \beta_{qi}} \\ \gamma_i &= 1 - \frac{\omega_{pi}^2 \omega_{qi}^2}{\omega_i^2 \omega_{pi}^2} \end{aligned}$$

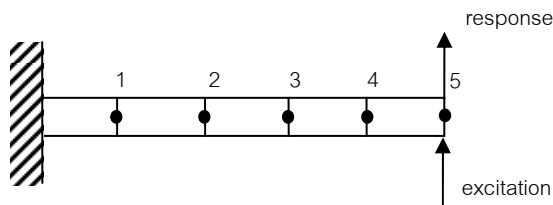
โดยที่ $\beta_{pi} = 2\zeta_{pi} \omega_{pi}$ ทำโดยการกำหนดค่า Closed loop damping ratio (ζ_{pi}) และเริ่มแรกให้ใช้ ω_{pi} เท่ากับ ω_i ซึ่งจะได้ค่าของตัวแปรที่ต้องการแล้วนำมาใส่ในสมการของ Transfer Function ดังนี้

$$G_{ppf}(s) = \frac{\gamma \omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \quad (4)$$

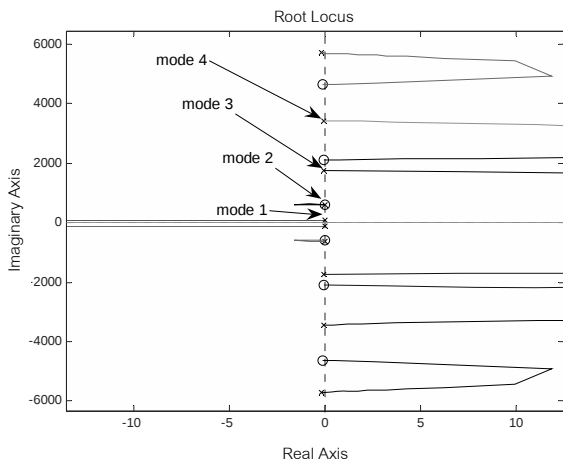
ซึ่ง $G_{ppf}(s)$ นี้ได้แสดงถึง PPF Compensator Transfer Function ที่ใช้สำหรับหาคุณสมบัติของระบบควบคุม และ PPF Filter นั้นมีพฤติกรรมประหนึ่งเสมือน Digital Vibration Absorber นอกจากนั้นประโยชน์อีกประการหนึ่งของการใช้ตัวควบคุมนี้ คือ จะสามารถควบคุมโพลของโครงสร้าง (Structural Poles) กับความถี่ที่สูงกว่าความถี่ของตัว Filter นั้นแทนจะไม่ถูกกระทบโดย Compensator ซึ่งสิ่งนี้จะมีประโยชน์โดยเฉพาะเมื่อโครงสร้างมีความสลับซับซ้อนกับมีหลายความถี่ธรรมชาติที่จะควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อนำไปปฏิบัติใช้กับอุปกรณ์จริงอาจจะมีผล เนื่องจากโหมดที่ไม่ได้รวมไว้ในแบบจำลองรวมถึงความไม่เที่ยงตรงของโหมดที่นำมาออกแบบตัวควบคุม [5] จึงใช้วิธีการป้อนกลับค่าความเร็วที่เป็นลบ (NVF) [6] ของ Physical coordinate เพื่อชดเชยผลกระทบในทุกย่านความถี่ โดยข้อดีที่ใช้เทคนิค PPF ร่วมกับเทคนิค NVF คือเป็นวิธีปฏิบัติที่ใช้ Collocated sensor/actuator เช่นกัน

3. การจำลองเชิงตัวเลข

แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของคานายื่นถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาเชิงตัวเลข โดยใช้สมการการเคลื่อนที่ของคานายื่นเป็นสมการสเททสเปซ การวัดสัญญาณออกจากจุดปลายของคานาและสัญญาณกระตุ้นเข้าที่จุดปลายคานา (จุดที่ 5 ดังในรูปที่ 1) ซึ่งการปรับตั้งในตำแหน่งทั้งสองนี้คือการวางตำแหน่งคู่ของตัวรับสัญญาณและตัวกระตุ้นในจุดเดียวกัน (Collocated sensor/actuator pair) ทำการจำลองเชิงตัวเลข โดยเปรียบเทียบกับกรณีวัดสัญญาณออกจากจุดถัดมาจากปลายของคานา (จุดที่ 4) และสัญญาณเข้าที่จุดปลายคานา (จุดที่ 5) ซึ่งการปรับตั้งในตำแหน่งทั้งสองนี้คือการวางตำแหน่งคู่ของตัวรับสัญญาณและตัวกระตุ้นในจุดที่ต่างกัน (Non-collocated sensor/actuator pair) และใช้สัญญาณที่เป็นความเร็วป้อนกลับค่าลบ (NVF) โดยที่ให้เป็นแบบ Collocated เพื่อปรับปรุงการควบคุมระบบด้วยเทคนิค PPF ที่เป็น Non-collocated sensor/actuator pair ให้มีความเสถียรขึ้น



รูปที่ 1 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์คานายื่นที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข



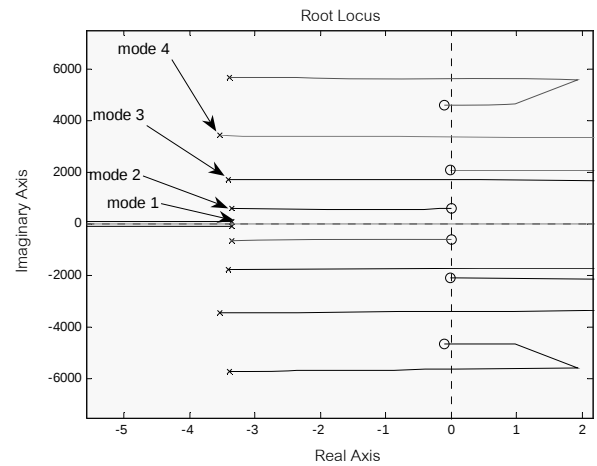
รูปที่ 2 กราฟ Root locus ของระบบที่ทำการควบคุม โหมดที่ 1 ด้วยเทคนิค PPF

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นตำแหน่งของโพลของระบบเมื่อเราไม่สามารถที่จะวางคู่ของตัววัดสัญญาณและตัวกระตุ้นในจุดเดียวกันได้ (Non-collocated) และการออกแบบควบคุมเทคนิค PPF กระทำกับโหมดที่ 1, 2 และ 3 โดยมีออกแบบค่า ζ_r ดังตารางที่ 1 และการควบคุมแบบ Non-collocated PPF ส่งผลให้โหมดที่ 3, 4 และ 5 วิ่งเข้าสู่อานไม่เสถียรของ s-plane ดังนั้นเราจึงได้ทำการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้นโดยการใช้เทคนิค PPF ร่วมเทคนิค NVF จะพบว่าโพลของโหมดที่ 3 และโหมดที่ 4 (รวมทั้งโหมดที่ 5) มีความเสถียรขึ้น

ในขอบเขตหนึ่ง จากการเพิ่มค่าความหน่วงให้กับระบบก่อนควบคุมด้วยเทคนิค PPF ดังแสดงในรูปที่ 3

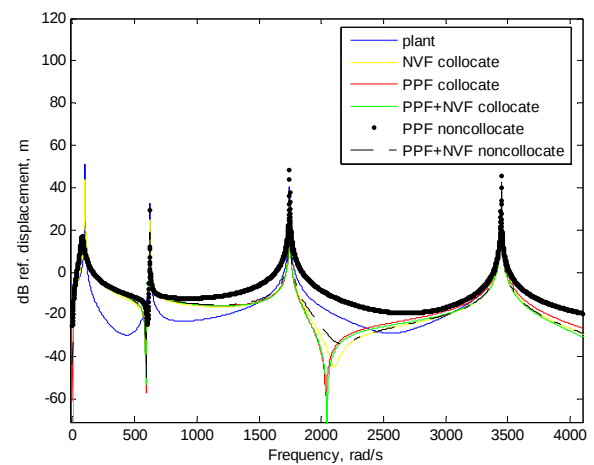
ตารางที่ 1 ข้อมูลการออกแบบโหมดที่ควบคุมด้วยเทคนิค PPF

โหมดที่	1	2	3	4	5
ω_j (rad/s)	94	620	1744	3437	5705
ζ_r	0.3	0.3	0.3	-	-

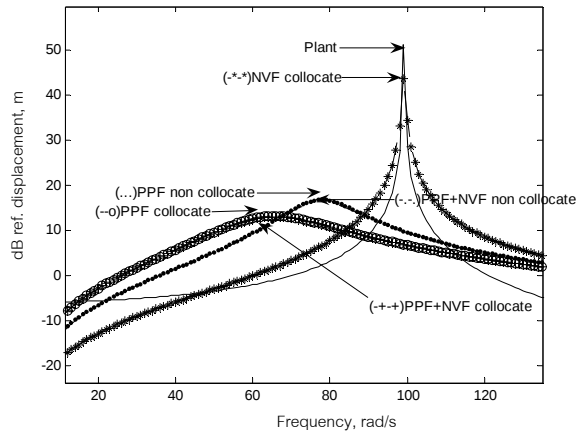


รูปที่ 3 กราฟ Root locus ของระบบที่ทำการควบคุมโหมดที่ 1 ด้วยเทคนิค PPF และเพิ่มประสิทธิภาพด้วยเทคนิค NVF

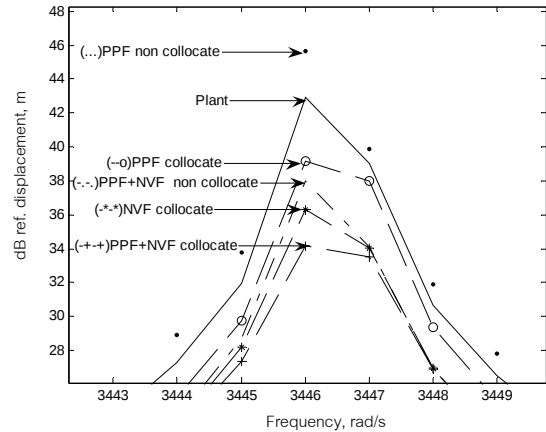
ผลจากการคำนวณจำลองเชิงตัวเลขแสดงเป็นกราฟสเปกตรัมการตอบสนองจากจุดที่ปลายคานา (จุดที่ 5) ซึ่งทำการเปรียบเทียบ 6 กราฟคือ กรณีที่ 1 ระบบไม่มีการควบคุมใดๆ, 2 ระบบมีการควบคุมด้วยเทคนิค Collocated PPF, 3 ระบบมีการควบคุมด้วยเทคนิค NVF, 4 ระบบมีการควบคุมด้วยเทคนิค Collocated PPF ร่วม NVF, 5 ระบบมีการควบคุมด้วยเทคนิค Non-collocated PPF และ 6 ระบบมีการควบคุมด้วยเทคนิค Non-collocated PPF ร่วม NVF ดังแสดงรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 8



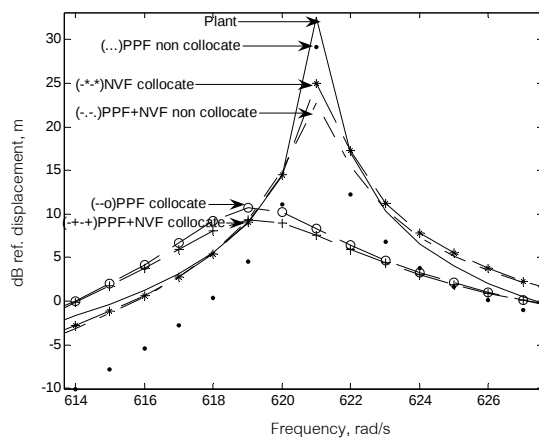
รูปที่ 4 แสดงกราฟการสั่นสะเทือนของระบบเมื่อทำการควบคุม 3 โหมดแรก



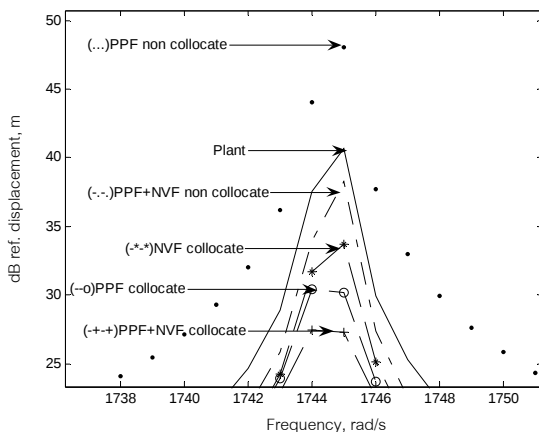
รูปที่ 5 แสดงกราฟการสั่นสะเทือนของโหมดที่ 1



รูปที่ 8 แสดงกราฟการสั่นสะเทือนของโหมดที่ 4



รูปที่ 6 แสดงกราฟการสั่นสะเทือนของโหมดที่ 2



รูปที่ 7 แสดงกราฟการสั่นสะเทือนของโหมดที่ 3

ผลกระทบจากการ Non-located จะส่งผลเฉพาะโหมดที่ 3 และ 4 โดยโหมดที่ 1 ในรูปที่ 5 จะไม่มีผลจาก Spillover ต่อ Non-located PPF การควบคุมยังสามารถลดระดับการสั่นได้ และเช่นกัน ในโหมดที่ 2 (รูปที่ 6) อย่างไรก็ตาม รูปที่ 7 และ 8 ได้แสดงให้เห็น สอดคล้องกับกราฟของ Root locus ในโหมดที่ 3 และโหมดที่ 4 ตามลำดับที่เกิดความไม่เสถียรขึ้น เมื่อมีการปรับตำแหน่งการติดตั้ง ตำแหน่งตัววัดสัญญาณและตัวกระตุ้นที่ต่างกัน (Non-located) โดย ระดับการสั่นจะสูงกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมใดๆ ซึ่งการใช้เทคนิค ควบคุม PPF ร่วมเทคนิค NVF จะช่วยให้การควบคุมนี้ยังคงความ เสถียรในย่านขอบเขตหนึ่งอยู่ได้

4. สรุป

ผลการศึกษาจำลองเชิงตัวเลขได้ยืนยันให้เห็นว่าการลดการ สั่นสะเทือนของคาน โดยใช้เทคนิค PPF นั้นสามารถที่จะลดการ สั่นสะเทือนที่โหมดความถี่ที่ต้องการ คือ โหมดที่ 1, 2 และ 3 ได้ และ ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีด้วย คือระบบที่ถูกควบคุมมีความเสถียร ณ ตำแหน่งการติดตั้งคู่ของตัวรับสัญญาณ และตัวกระตุ้น ในตำแหน่ง เดียวกัน [1] อย่างไรก็ตามในบางการประยุกต์ที่ไม่สามารถจะติดตั้ง ตำแหน่งการติดตั้งคู่ของตัวรับสัญญาณ และตัวกระตุ้น ในตำแหน่ง เดียวกันได้อย่างแท้จริง และเมื่อทำการควบคุมระบบก็อาจจะส่งผล Spillover effect ที่ทำให้ระบบไม่เสถียรได้ และการควบคุมการ สั่นสะเทือนของโครงสร้างที่มีความหน่วงน้อยมากนั้นใช้การควบคุมด้วย เทคนิค PPF ร่วมกับเทคนิค NVF ที่เป็น Low authority controllers ก็ จะสามารถลดโหมดความถี่ที่ต้องการได้ โดยระดับผลของ Spillover effect ได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งก็คือการควบคุมด้วยเทคนิค PPF ร่วมกับ เทคนิค NVF สามารถปรับปรุงเสถียรภาพให้ดีขึ้นได้

และในการศึกษาต่อไปจะเป็นการประยุกต์กับโครงสร้างแผ่นเรียบ บาง ซึ่งมีประโยชน์คือ จะช่วยลดเสียงที่เกิดจากการสั่นสะเทือน ซึ่ง ข้อจำกัดของการใช้เทคนิค PPF นี้จะเห็นได้ชัดเจนขึ้นที่ย่านความถี่สูง และจะนำเสนอการปรับปรุงเสถียรภาพร่วมกับเทคนิค NVF ในเชิง ข้อมูลการทดสอบจริงต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คณะบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ทุนการวิจัยในครั้งนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Goh, C. J., and Caughey, T. K., 1985. On the stability problem caused by finite actuator dynamics in the control of large space structures., International Journal of Control, Vol. 41, pp. 787 – 802.
- [2] Baz, A., Poh, S., and Fedor, J., 1992. Independent modal space control with positive position feedback., Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transaction of ASME., Vol. 114, March, pp. 96 – 103
- [3] Hamer, A. J., Angelis G. Z., and Roozen, N. B., 2005, Broad-band active vibration suppression using PPF focused on industrial application., IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol. 10, No. 2, April 2005.
- [4] Shan, J., Liu. H., and Sun D., 2005, Slewing an vibration control of a single-link flexible manipulator by positive position feedback (PPF), Mechatronics, Vol. 15, pp. 487 – 503.
- [5] Friswell, M. I., and Inman, D. J., 1999. The relation between positive position feedback and output feedback controllers., Smart Materials and Structures., Vol. 8, pp 285 – 291.
- [6] จักร จันทลักษณ์, 2545, 'การปรับปรุงเสถียรภาพของตัวควบคุมแบบป้อนกลับความเร็วค่าลบเพื่อลดการสั่นเทือนในคาน', การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16, 14 – 16 ตุลาคม จ. ภูเก็ต.