

การจำลองฮิสทีรีซิสและการควบคุมก้อนมวลที่ขับเคลื่อนด้วยสปริงไนท์อินอล

Hysteresis Modeling and Control of Lump-Mass Actuated by Nitinol Springs

ทศพล สีน้าเงิน* และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชากรินทร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
*ติดต่อ: tossapol.mme@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 089-215-8955

บทคัดย่อ

ไนท์อินอลเป็นโลหะผสมที่มีคุณสมบัติการจดจำรูปร่างสร้างมาจากนิกเกิลและไททาเนียม ไนท์อินอลสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากคุณสมบัติที่น่าสนใจนี้ ไนท์อินอลจึงได้รับความสนใจในการใช้เป็นตัวกระตุ้นในการควบคุมการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตาม ไนท์อินอลมีพฤติกรรมฮิสเตอร์ีซิส ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการควบคุม งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาระบบเชิงกลสำหรับศึกษาพฤติกรรมฮิสเตอร์ีซิสของตัวกระตุ้นไนท์อินอล โดยระบบประกอบไปด้วยก้อนมวล ตัวกระตุ้น เช่น เซอร์โวมอเตอร์ และตัวควบคุม โดยตัวกระตุ้นสร้างขึ้นจากสปริงไนท์อินอลทำหน้าที่ขับเคลื่อนก้อนมวลไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยการทำงานของสปริงนั้นขึ้นอยู่กับความร้อนที่เกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสปริง ในการทำงานมีรูปของการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอจำนวนสองรูป โดยรูปแรกเป็นรูปด้านในทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของสปริงไนท์อินอล ในขณะที่อีกรูปด้านนอกใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของก้อนมวล ผลการทดลองการควบคุมอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างถูกต้องและเกิดการเคลื่อนที่ของก้อนมวลตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาให้อุณหภูมิเป็นค่าอินพุตและตำแหน่งของก้อนมวลเป็นค่าเอาต์พุต พฤติกรรมฮิสเตอร์ีซิสสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้รูปแบบการจำลองของเบาว์-เวย์นในการจำลองพฤติกรรมฮิสเตอร์ีซิส ส่วนผลการทดลองของการควบคุมตำแหน่งแสดงให้เห็นว่า ไนท์อินอลสามารถใช้เป็นตัวกระตุ้นสำหรับการวางตำแหน่งก้อนมวลได้ แต่ความแม่นยำยังไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากผลของฮิสเตอร์ีซิส

คำหลัก: ไนท์อินอล ฮิสเตอร์ีซิส การควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมตำแหน่ง การจำลองของเบาว์-เวย์น

Abstract

Nitinol is a shape memory alloy made of nickel and titanium. It can be deformed by changing its temperature. Because of this interesting property, it has drawn attentions for being used as actuators for motion control. However, nitinol owns hysteresis behavior which affects control accuracy. This research develops a mechanical system to study the hysteresis behavior of the nitinol. The system consists of a mass, two nitinol springs, a displacement sensor, and a control unit. The springs are used as the actuators to push/pull the mass to any desired position. The action of the springs corresponds to the heat producing by the electric current feeding into the spring. There are two control loops in the system. The inner loop controls the temperature of the nitinol springs, whereas the outer one is for position control of

the mass. Experimental results of the temperature control show that the temperature can be accurately controlled and that the mass is move corresponding to the change of the temperature. When considering the temperature as the input and the position of the mass as the output, the hysteresis behavior can be clearly noted. To model this hysteresis behavior, the Bouc-Wen model is used in this research. Regarding to the position control, experimental results demonstrate that the nitinol can be used as the actuators for positioning the mass. However, the control accuracy is not satisfactory because of the hysteresis effect.

Keywords: Nitinol, hysteresis, temperature control, position control, Bouc-Wen model

1. บทนำ

ไนทีนอล(Nitinol) เป็นโลหะผสม (alloy) ที่มี นิกเกิล(Nickel) และไททาเนียม(Titanium) เป็น ส่วนประกอบ[1,2] ไนทีนอลมีคุณสมบัติเด่น คือ ความสามารถในการจดจำรูปร่าง ซึ่งเมื่อโลหะมีการ เปลี่ยนแปลงรูปร่างในอุณหภูมิที่ต่ำ โลหะจะกลับคืนสู่ สภาพเดิมได้ด้วยตัวเอง เมื่อได้รับความร้อนจน อุณหภูมิสูงถึงค่าหนึ่ง โดยคุณสมบัตินี้เป็นผลมาจาก การเปลี่ยนเฟสของโครงสร้างผลึกของโลหะ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงมาร์เทนไซต์(martensite) และออสเทนไนต์(Austenite)

ปัจจุบันมีการนำลวดไนทีนอลไปใช้ในอุปกรณ์ หลายอย่างเช่น แขนหุ่นยนต์[4], ปีกเครื่องบิน[8], และ สวิตช์ไฟฟ้า[9] เป็นต้น ในการใช้งานลวดไนทีนอล จะนำคุณสมบัติที่ลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาใช้ ซึ่งวิธีการหนึ่ง ในการให้ความร้อน คือใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปในลวด โดย ตรง

การเปลี่ยนแปลงความยาวของลวดไนทีนอลมี พฤติกรรมฮิสเตอร์รีซิส โดยทั่วไปในการใช้งานลวด ไนทีนอล จำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการเคลื่อนที่

ระบบเชิงกลที่มีอิทธิพลของฮิสเตอร์รีซิส ถือว่า เป็นระบบไม่เชิงเส้นที่มีความซับซ้อนสูงและอิทธิพล ของฮิสเตอร์รีซิส อาจจะทำให้ระบบควบคุมสูญเสีย เสถียรภาพของการควบคุมได้[6] นอกจากนี้แล้วแรง กระทำเชิงพลวัตจากภายนอก ยังทำให้มีความผันผวน

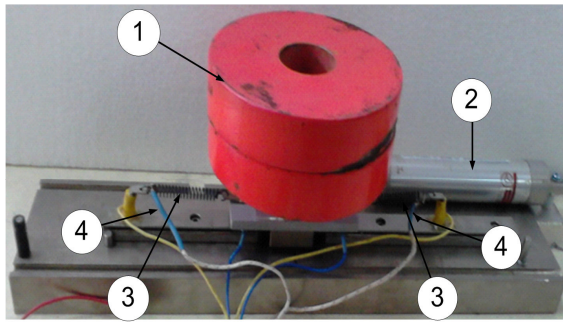
ในลูปของฮิสเตอร์รีซิสเกิดขึ้น[1] ส่งผลให้ระบบมีความ ซับซ้อนมากขึ้น

วิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการควบคุมระบบที่มี พฤติกรรมฮิสเตอร์รีซิสคือการใช้สมการในการชดเชย ค่าฮิสเตอร์รีซิสเช่น ในงานวิจัย[7] ได้ทำการแก้ปัญหา การควบคุมระยะและความเร็วของระบบทางกลที่มี ฮิสเตอร์รีซิสอยู่ในระบบ โดยใช้สมการของ เบาว์-เวย์น (Bouc-wen) มาใช้ในการคำนวณสมการฮิสเตอร์รีซิส

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างชุดทดลองการควบคุม ตำแหน่งก่อนมวล โดยมีสปริงที่สร้างมาจากลวด ไนทีนอลเป็น actuator เพื่อสังเกตพฤติกรรม ฮิสเตอร์รีซิส และทำการสร้างแบบจำลองโดยใช้ แบบจำลองเบาว์-เวย์น(Bouc-wen) มาใช้ในการ ชดเชยฮิสเตอร์รีซิสของระบบควบคุม

2. ระบบก่อนมวลและการทำงาน

ระบบก่อนมวลที่จัดสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้แสดงใน ภาพที่ 1 ประกอบไปด้วย ก่อนมวลวางอยู่บนรางเลื่อน เซ็นเซอร์วัดระยะทาง สปริงทำมาจากลวดไนทีนอล 2 ตัว และ เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ 2 ชุด โดยมี คอมพิวเตอร์และแผงเชื่อมต่อสัญญาณ(Interface-Card) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม



ภาพที่ 1 ภาพถ่ายระบบเชิงกลที่จัดสร้างขึ้น: (1) ก้อนมวล, (2) เซ็นเซอร์วัดระยะทาง, (3) สปริงทำมาจากลวดไนท์อินอล, (4) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

ในการทำงานของระบบ ตัวควบคุมจะทำการส่งสัญญาณผ่านตัวขยายกำลัง (Power Amplifier) เพื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสปริงไนท์อินอลเพื่อที่จะให้สปริงร้อน ส่งผลทำให้สปริงเกิดการหดตัวและดึงก้อนมวลที่ถูกยึดติดอยู่กับสปริงเคลื่อนที่ โดยทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าสปริงตัวใด เช่น ถ้าต้องการให้ก้อนมวลเคลื่อนที่ไปทางขวาเราจะให้กระแสไฟฟ้ากับสปริงตัวขวามือ เป็นต้น ในที่นี้ระบบควบคุมประกอบไปด้วยตัวควบคุมป้อนกลับ 2 ตัว คือ ตัวควบคุมอุณหภูมิและตัวควบคุมระยะทาง (ดังแสดงในภาพที่ 2) ตัวควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของสปริงไนท์อินอล โดยรับค่าป้อนกลับจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ ส่วนตัวควบคุมระยะทางรับค่าป้อนกลับจากเซ็นเซอร์วัดระยะทางทำหน้าที่ในการควบคุมตำแหน่งของก้อนมวล

3. ขั้นตอนการศึกษา

การศึกษาประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ

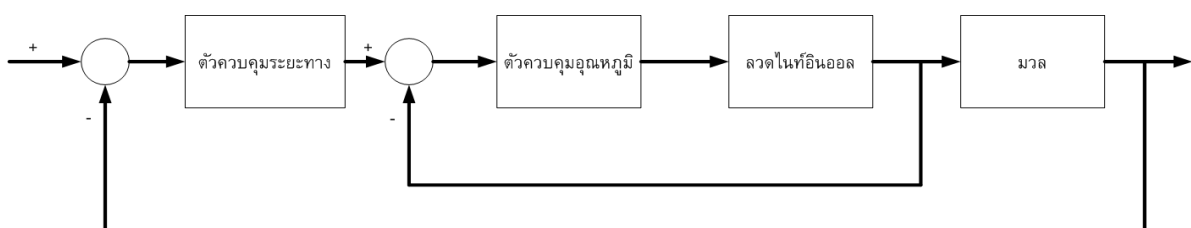
- การควบคุมอุณหภูมิของลวดไนท์อินอล
- การศึกษาและการจำลองพฤติกรรมฮิสเตอร์รีซิส
- การควบคุมตำแหน่งก้อนมวล

การควบคุมอุณหภูมิของลวดไนท์อินอลและการควบคุมตำแหน่ง ใช้การควบคุมแบบพีไอซึ่งมีกฎการควบคุมคือ

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

โดยที่ $u(t)$ คือ สัญญาณควบคุม ส่วน $e(t)$ คือค่าผลต่างของการควบคุม มีค่า k_p และ k_i เป็นค่าอัตราขยาย โดยในการศึกษานี้จะใช้วิธีปรับค่า k_p และ k_i กับระบบจริงโดยตรง

ส่วนการศึกษาพฤติกรรมฮิสเตอร์รีซิส ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้อุณหภูมิเป็นค่าอินพุตและตำแหน่งของก้อนมวลเป็นค่าเอาต์พุต และใช้แบบจำลองของเบอร์เวเย่น [10] ในการจำลองฮิสเตอร์รีซิส โดยใช้วิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ของเบอร์เวเย่นจากการเปรียบเทียบกราฟฮิสเตอร์รีซิสที่เกิดขึ้นในระบบจริงกับที่จำลองได้ในคอมพิวเตอร์



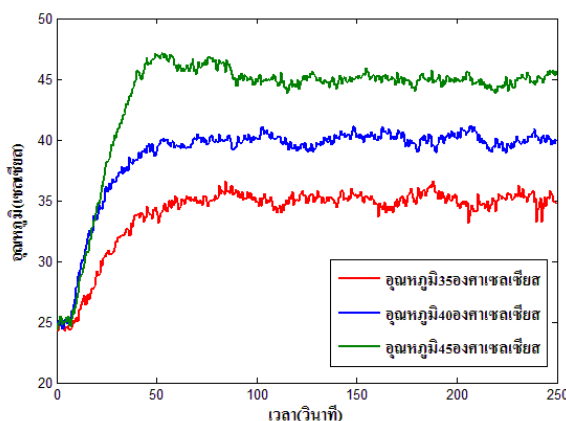
ภาพที่ 2 ระบบควบคุม

4. ผลลัพธ์

4.1 การควบคุมอุณหภูมิ

ในการปรับค่า k_p และ k_i กับระบบจริง กำหนดให้ผลตอบสนองของอุณหภูมิเข้าสู่ค่าสถานะคงตัวภายในเวลา 60 วินาที โดยค่า k_p และ k_i ที่ได้จากการปรับเท่ากับ 0.2 และ 0.1 ตามลำดับ

ผลการตอบสนองการควบคุมอุณหภูมิจากภาพที่ 3 พบว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมอุณหภูมิของลวดไปยังอุณหภูมิอ้างอิงได้ถูกต้อง ในกรณีกำหนดอุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 35 และ 40 องศาเซลเซียส ระบบจะเข้าสู่ค่าสถานะคงตัวภายในเวลาประมาณ 60 วินาที โดยไม่มีโอเวอร์ชูตเกิดขึ้น และที่อุณหภูมิอ้างอิง 45 องศาเซลเซียส มีการเกิดโอเวอร์ชูตเล็กน้อย

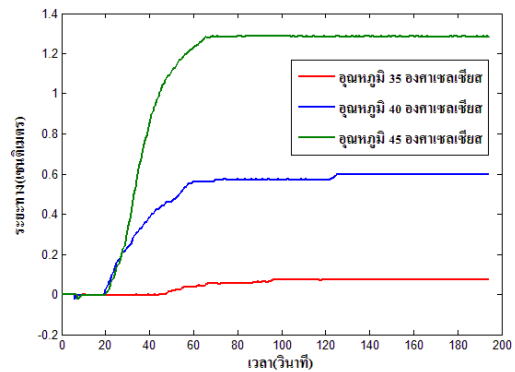


ภาพที่ 3 ผลการควบคุมอุณหภูมิ

มีข้อสังเกตว่า โอเวอร์ชูตทั้ง 3 กรณีไม่เหมือนกัน ซึ่งบ่งบอกถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ

ผลการเคลื่อนที่ของก้อนมวลที่เกิดจากการควบคุมอุณหภูมิแสดงในภาพที่ 4 โดยในที่นี้ทำการประมาณระบบด้วยระบบอันดับที่หนึ่ง (First-Order System) เพื่อใช้ในการศึกษาอีสเตอริซิสต่อไป โดยเมื่อนำผลตอบสนองของเอาต์พุตมาทำการหาค่า τ (time constant) และค่า k (steady state gain) ของระบบ จะพบว่า ในกรณีกำหนดอุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส ก้อนมวลจะเข้าสู่สถานะคงตัวได้เร็วที่สุดภายในเวลาประมาณ 60 วินาที ส่วน

อุณหภูมิอ้างอิง 35 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาเข้าสู่สถานะคงตัวประมาณ 90 วินาที และที่อุณหภูมิอ้างอิง 40 องศาเซลเซียสจะเข้าสู่สถานะคงตัวได้ช้าที่สุดโดยใช้เวลาประมาณ 130 วินาที

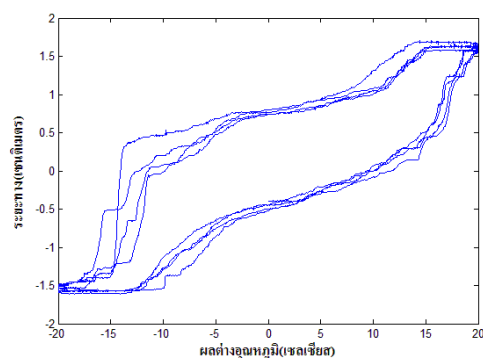


ภาพที่ 4 การเคลื่อนที่ของก้อนมวล

มีข้อสังเกตว่า ระบบมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้น เนื่องจากค่า τ (time constant) และค่า k (steady state gain) ของระบบไม่คงที่

4.2 พฤติกรรมและการจำลองฮิสเตอรีซิส

ในการศึกษาพฤติกรรมฮิสเตอรีซิสของระบบ เราให้สัญญาณฟังก์ชันซายน์เป็นสัญญาณอ้างอิงของค่าอุณหภูมิ เพื่อให้ก้อนมวลเกิดการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาซ้ำๆ ผลลัพธ์แสดงไว้ในภาพที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นพฤติกรรมฮิสเตอรีซิสอย่างชัดเจน



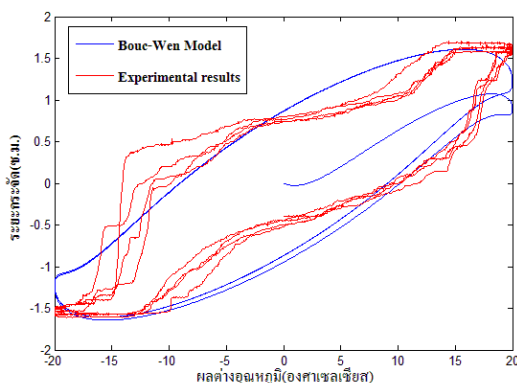
ภาพที่ 5 กราฟฮิสเตอรีซิสที่เกิดขึ้นในระบบจริง

การสร้างแบบจำลองฮิสเตอรีซิสของระบบด้วยแบบจำลองของเบาว์-เวย์น (Bouc-Wen) สามารถเขียนอยู่ในสมการของระบบ ดังนี้

$$\dot{x} + x = k(du(t) - h) \quad (1)$$

$$\dot{h} = \alpha dT + \beta |\dot{T}| \dot{h} + \gamma T |h| \quad (2)$$

โดยที่ h คือค่าฮิสเตอร์รีซิส T คืออุณหภูมิ(เซลเซียส) และ d, α, β, γ คือค่าพารามิเตอร์เบาว์-เวย์น ซึ่งจากการศึกษาด้วยวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ จึงได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้ $d = 26$, $\alpha = 1.5$, $\beta = 0.4$, $\gamma = 0.001$ ภาพที่ 6 การแสดงการเปรียบเทียบระหว่างกราฟฮิสเตอร์รีซิสที่เกิดขึ้นในระบบจริงกับแบบจำลองเบาว์-เวย์น(Bouc-Wen)

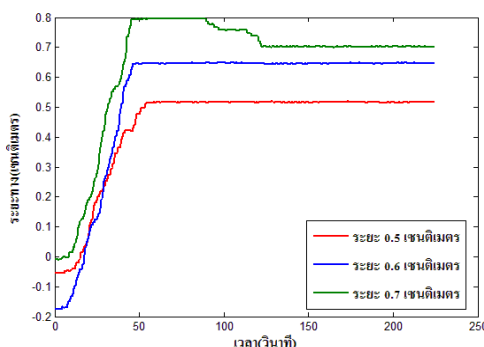


ภาพที่ 6 แบบจำลองเบาว์-เวย์น(Bouc-Wen) เปรียบเทียบกับกราฟฮิสเตอร์รีซิสที่เกิดขึ้นในระบบจริง

4.3 การควบคุมตำแหน่ง

ในการควบคุมตำแหน่ง กำหนดให้ผลตอบสนองผู้เข้าสู่ค่าสถานะคงตัวภายในเวลา 60 วินาที เช่นเดียวกับการควบคุมอุณหภูมิ

จากผลการควบคุมดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งใช้ค่า k_p และ k_i คือ 1 และ 0.6 ตามลำดับ พบว่าสามารถควบคุมให้อ่อนมวลไปอยู่ในตำแหน่งที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 เซนติเมตรได้ แต่ยังไม่มีความแม่นยำเท่าที่ควร ซึ่งเนื่องมาจากผลของฮิสเตอร์รีซิสและแรงเสียดทานของรางเลื่อน



ภาพที่ 7 ผลการทดลองการควบคุมตำแหน่ง

5.สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมอุณหภูมิของลวดไนท์อินออลได้อย่างถูกต้องและสามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมฮิสเตอร์รีซิสของระบบได้อย่างชัดเจน เมื่อทำการจำลองพฤติกรรมฮิสเตอร์รีซิสด้วยแบบจำลองของเบาว์-เวย์นพบว่าสามารถจำลองฮิสเตอร์รีซิสได้ ส่วนการควบคุมระยะทางมีแนวโน้มดีในระดับหนึ่ง แต่ความแม่นยำในการควบคุมยังไม่ดี เนื่องมาจากผลของฮิสเตอร์รีซิสและความเสียดทานของรางเลื่อน

ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปจะทำการนำแบบจำลองฮิสเตอร์รีซิสมาใช้ในการชดเชยค่าเพื่อให้การควบคุมมีความแม่นยำมากขึ้น ตลอดจนการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมประเภทอื่น ที่ให้ผลตอบสนองการควบคุมที่ดีกว่า

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Dutta, S.M. and Ghorbel, F.H., "Differential Hysteresis Modeling of a Shape Memory Alloy Wire Actuator", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.10, No.2, pp.189-197, April 2005.
- [2] Teh, Y.H. and Featherstone, R., "A new control system for fast motion control of SMA actuator wires". Submitted to The First International Conference on Shape Memory and Related Technologies, Paper ID 34, Singapore, November 2004
- [3] Kha N. B., Ahn K. K, 2006, "Position Control of Shape Memory Alloy Actuators by Using Soft Tuning Fuzzy PID Controller," In Proc. of IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics and Applications, Singapore.
- [4] Pfeiffer, C., DeLaurentis K.J. and Mavroidis C., "Shape Memory Alloy Actuated Robot Prostheses: Initial Experiments", Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on

Robotics and Automation, Detroit, MI, 1999, pp. 2385–2391.

[5] Song, G., Kelly, B., Agrawal, B.N., “Active position control of a Shape Memory Alloy wire actuated composite beam”. Smart Materials and Structures 9, 711-716(2000)

[6] A. Telba and Wahied G. Ali, Hysteresis Modeling in a Piezoelectric Nanopositioner Stage, Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol II, WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K

[7] M S Sofla, S. M. Rezaei M Zareinejad and M Saadat, “Trajectory tracking control of a piezoelectric stage for dynamic load applications”, IMechE, 2010, vol. 224 no. 8 983-994.

[8] J. Kudva, B. Sanders, J. Pinkerton-Florance, and E. Garcia, “Overview of the DARPA/AFRL /NASA smart wing Phase 2 program,” in Proc. SPIE , vol. 4332, 2001, pp. 383–389.

[9] J. Harrison and D. Hodgson, “Use of TiNi in mechanical and electrical connectors,” in Proc. Int. Symp. Shape Memory Effects and Applications, 1975, pp. 517–523.