

## ผลของความแข็งตึงของสเตเตอร์ต่อคลื่นเคลื่อนที่ในมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง

## Effect of stator stiffness for generating traveling wave on an ultrasonic curvilinear motor

ปานumas สุยบังดัม,<sup>1</sup> พฤทธิกร สมิตไมตรี<sup>1</sup> และ พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล<sup>2</sup><sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทรศัพท์ (074) 287-035 โทรสาร (074) 212-893

<sup>2</sup>ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120

โทรศัพท์ (02) 564-6500 โทรสาร (02) 564 6501-5

Panamas Suybangdum<sup>\*1</sup>, Pruittikorn Smithmaitrie<sup>1</sup> and Pitak Laoratanakul<sup>2</sup><sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

Hat Yai, Songkla 90112, Tel (074) 287-035, Fax: (074) 212893

<sup>2</sup>Thailand Science Park, Phahonyothin Road, Klong 1, Klong Luang, Pathumthani 12120

Tel: (02) 564-6500, Fax: (02) 564-7001-5

\*Email: panumas.suybangdum@gmail.com

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าความแข็งตึง (stiffness) ของสเตเตอร์มอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้งด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มอเตอร์อัลตราโซนิกมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญสองส่วนคือ สเตเตอร์ และ โรเตอร์ ในกรณีศึกษานี้สเตเตอร์มีลักษณะเป็นคานโค้งทำหน้าที่ขับโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามแนวของคานโดยอาศัยคลื่นเคลื่อนที่ ซึ่งคลื่นเคลื่อนที่ที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของคานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณแบบฮาร์โมนิกส โดยทั่วไปวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ถูกใช้เป็นตัวทำงานที่กระตุ้นให้เกิดแรงแบบฮาร์โมนิกสในมอเตอร์อัลตราโซนิก ค่าความแข็งตึงของสเตเตอร์และผลการตอบสนองเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณฮาร์โมนิกสจากตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกถูกศึกษาด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จากผลการศึกษาพบว่าค่าความแข็งตึงของสเตเตอร์มีผลต่อความสูงของคลื่นเคลื่อนที่และความถี่ที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่ในระบบที่มีค่าความแข็งตึงต่ำจะมีค่าความถี่ทำงานต่ำกว่าระบบที่มีค่าความแข็งตึงสูง นอกจากนั้นระบบที่มีค่าความแข็งตึงต่ำจะให้แอมพลิจูดของคลื่นเคลื่อนที่สูงกว่าอีกด้วย ดังนั้นค่าความแข็งตึงของระบบจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบและประสิทธิภาพของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้นโค้ง

## Abstract

The main purpose of this research is to study system stiffness of curvilinear ultrasonic motors by using finite element method. An ultrasonic motor system consists of a rotor and a stator. The stator drives and guides a rotor along the curve beam to any specific angular position by using traveling wave. In this study, the stator is similar to a curve beam. The traveling wave is generated by piezoelectric actuators on the curve beam which is excited by the harmonic signal. The stator stiffness and the stator

response are investigated. The finite element results show that the stator stiffness have an effect on the wave amplitude and operating frequency of the traveling wave. The simulations show that the wave amplitude is high when the stator stiffness is decreased, while the operating frequency is increased as the stator stiffness increases. Accordingly, the system stiffness has an important role on the design and efficiency of the ultrasonic curvilinear motor.

## 1. บทนำ

มอเตอร์อัลตราโซนิกสามารถแบ่งออกได้สองรูปแบบด้วยกันคือ มอเตอร์อัลตราโซนิกที่มีการเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรง (linear motor) [1-4] และแบบหมุน (rotary motor) [4-7] โดยปกติแล้วมอเตอร์อัลตราโซนิกมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญสองส่วนด้วยกันคือ สเตเตอร์ (stator) และโรเตอร์ (rotor) ซึ่งกรณีศึกษานี้สเตเตอร์มีลักษณะเป็นคานโค้งทำหน้าที่ขับให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ตามแนวของคาน โดยอาศัยคลื่นเคลื่อนที่ (traveling wave) การเกิดคลื่นเคลื่อนที่นี้จะอาศัยตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกที่ติดตั้งบนคานโค้ง และเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณฮาร์โมนิกสส่งผลให้มีแรงไปกระทำต่อสเตเตอร์ทำให้เกิดการสั่นเกิดขึ้น เนื่องจากตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกมีคุณสมบัติที่สามารถเปลี่ยนขนาดเมื่อได้รับการกระตุ้นจากไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อนำไปติดตั้งเป็นตัวทำงานบนคานโค้งในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่แล้วกระตุ้นด้วยสัญญาณฮาร์โมนิกสจะทำให้คานเกิดการสั่นสะเทือนและส่งผลให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่ขึ้น มอเตอร์อัลตราโซนิกสามารถนำมาใช้เป็นตัวทำงานในอุปกรณ์สมัยใหม่ เช่น ควมคุมการเคลื่อนที่ของเลนส์ในกล้องถ่ายรูปซึ่งส่วนใหญ่จะประยุกต์ใช้งานจากอัลตราโซนิกมอเตอร์ทั้งสองรูปแบบที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ในปัจจุบันยังมีการอีกเป็นจำนวนมากที่ต้องการการเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง [8-9] เช่น การ

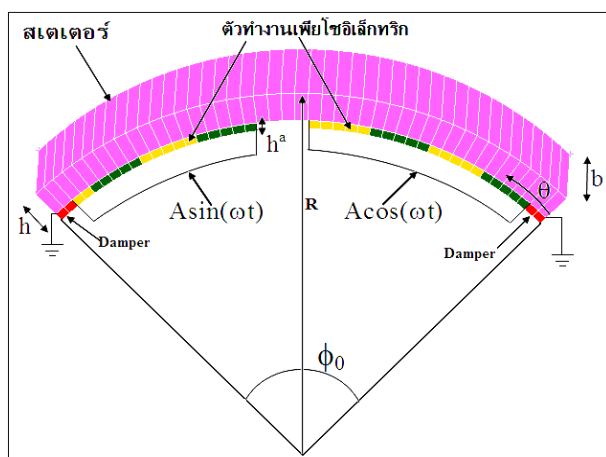
ปรับปรุงของกล่องจับภาพหรือข้อต่อของหุ่นยนต์ ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นในมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้ง [8,14] เป็นแบบเดียวกับคลื่นที่เกิดขึ้นกับคานตรง (beam) หรือแบบแผ่นแบน (plate) [1-3] วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้งเมื่อค่าความแข็งตึงของระบบเปลี่ยนไปเนื่องจากการเปลี่ยนความหนาของสเตเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## 2. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสเตเตอร์ของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้ง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาถึงผลที่เกิดจากความแข็งตึงของสเตเตอร์ที่มีผลต่อการกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่และพฤติกรรมการสั่นในมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้ง โดยเปลี่ยนความหนาของสเตเตอร์เมื่อตำแหน่งและจำนวนของตัวทำงานตัวทำงานยังคงเท่าเดิม

### 2.1 การจัดวางตัวทำงานบนสเตเตอร์

กรณีศึกษานี้ได้ออกแบบสเตเตอร์ที่มีความหนาของคานโค้งแตกต่างกันสองขนาด คือ ขนาดที่ 1 มีความหนา  $h = 1 \text{ mm}$  และขนาดที่ 2 มีความหนา  $h = 1.5 \text{ mm}$  ตามลำดับ โดยมีการจัดวางตัวทำงานบนคานโค้งเหมือนกัน คานโค้งมีรัศมี  $R=60 \text{ mm}$  เมื่อ  $h = 1 \text{ mm}$ ,  $R=60.5 \text{ mm}$  เมื่อ  $h = 1.5 \text{ mm}$ , กว้าง  $b=9 \text{ mm}$  และคานโค้งมีมุมเปิด  $\phi_0=\pi/2$  ใช้ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกชนิด Lead Zirconate Titanate (PZT) ที่มีความหนา  $h^a=0.5 \text{ mm}$  ดังแสดงในรูปที่ 1 ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกที่ติดบนคานโค้งขนาดความยาว  $\lambda/2$  หรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่น ตัวทำงานถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้า  $A\cos(\omega t)$  และ  $A\sin(\omega t)$  เมื่อ  $A$  คือขนาดของแอมพลิจูด,  $\omega$  คือความถี่ทำงาน และ  $t$  คือเวลา



รูปที่ 1 แสดงแผนภาพของระบบของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้ง

### 2.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสเตเตอร์ของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้งมีทั้งสองความหนาคือ  $h=1 \text{ mm}$  และ  $h=1.5 \text{ mm}$  ตามลำดับ ซึ่งติดตั้งตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกและวัสดุดูดซับการสั่นสะเทือน (damper) หนา  $0.5 \text{ mm}$  ติดอยู่ด้วย จากนั้นเปลี่ยนพิกัดที่ใช้จากพิกัดฉากเป็นพิกัดทรงกระบอก แล้วกำหนดเงื่อนไขขอบ (boundary condition) คือ โหนด (node) ที่ขอบ ณ ตำแหน่งกึ่งกลาง

ของคานยึด (fix) ทั้งแกน  $R$  และ  $\theta$  ส่วนที่โหนดปลายที่เหลือยึดเฉพาะแกน  $\theta$  เท่านั้น กระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้า  $A\cos(\omega t)$  และ  $A\sin(\omega t)$  ที่ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกดังแสดงในรูปที่ 1 และใช้ time step เท่ากับ  $0.027 \text{ วินาที}$  แบบจำลองที่สร้างขึ้นแบ่งเป็น 175 เอลิเมนต์ มีทั้งหมด 269 โหนด โดยการวิเคราะห์ผลเลือกใช้แบบ transient analysis เพื่อการเกิดคลื่นเคลื่อนที่ ซึ่งการหาความถี่ที่ทำให้เกิดคลื่นเคลื่อนที่โดยเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่กระตุ้นแล้วสังเกตพฤติกรรมของคลื่นที่เกิดขึ้น โดยคลื่นเคลื่อนที่ที่จะเกิดเมื่อคลื่นที่ไปทิศทางเดียวและสมำเสมอตลอดคานโค้ง ซึ่งความถี่ดังกล่าวจะเรียกว่าความถี่ทำงาน

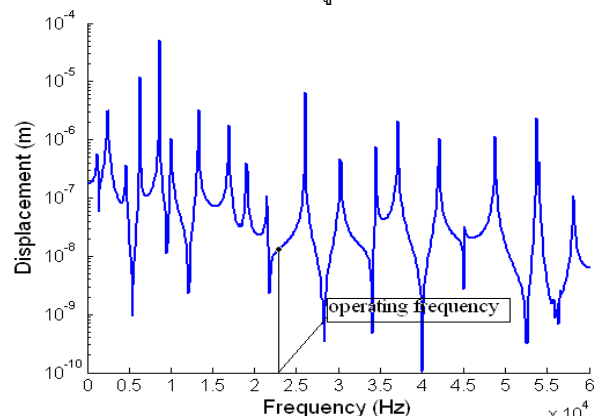
### 3. ผลการคำนวณ

จากตารางที่ 1 แสดงความถี่ธรรมชาติของระบบของมอเตอร์อัลตราโซนิคเชิงเส้นโค้งเมื่อความหนาของสเตเตอร์มีขนาดต่างกัน พบว่าความถี่ธรรมชาติของสเตเตอร์ที่หนาขึ้นทำให้ความถี่ธรรมชาติของระบบสูงตามไปด้วย

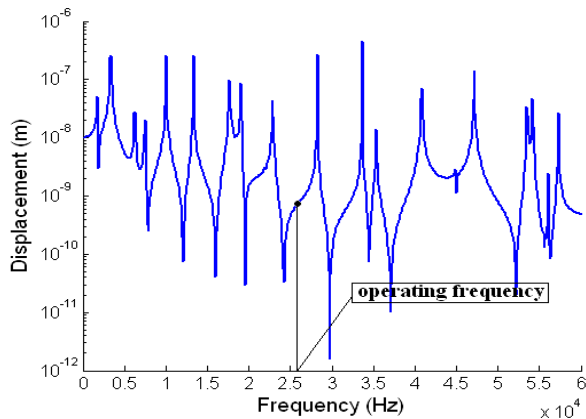
ตารางที่ 1 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ทั้งสองรูปแบบ

| Mode | ความถี่ธรรมชาติ (Hz) |                      |
|------|----------------------|----------------------|
|      | $h = 1 \text{ mm}$   | $h = 1.5 \text{ mm}$ |
| 2    | 1318                 | 1817                 |
| 3    | 2575                 | 3517                 |
| 4    | 4912                 | 6579                 |
| 5    | 6563                 | 10444                |
| 6    | 10589                | 14012                |
| 7    | 13960                | 18558                |
| 8    | 17731                | 23924                |
| 9    | 22537                | 29563                |
| 10   | 27283                | 34632                |

รูปที่ 3 และรูปที่ 4 แสดงผลการคำนวณการตอบสนองเชิงความถี่ทั้งสองพบว่า สเตเตอร์ที่มีความหนา  $1.5 \text{ mm}$  จะมีความถี่ทำงาน (operating frequency) สูงกว่าแต่มีขนาดของคลื่นเคลื่อนที่ต่ำกว่า ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าสเตเตอร์ที่บางกว่าจะให้แรงขับที่มากกว่าเพราะแรงขับของมอเตอร์ขึ้นกับขนาดความสูงของคลื่นเคลื่อนที่

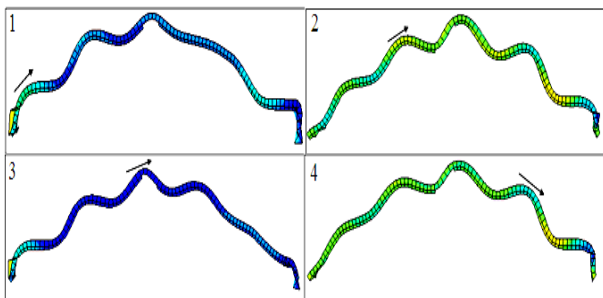


รูปที่ 3 แสดงผลการตอบสนองเชิงความถี่ของสเตเตอร์หนา  $1 \text{ mm}$

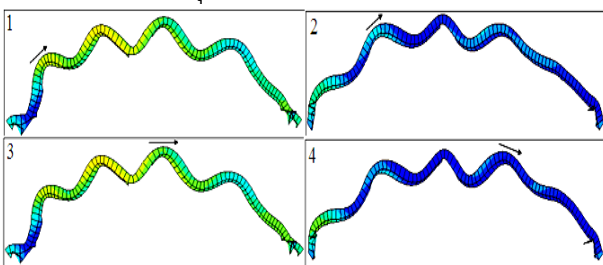


รูปที่ 4 แสดงผลการตอบสนองเชิงความถี่ของสเตเตอร์หนา 1.5 mm

รูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นของสเตเตอร์ความหนา 1 mm และ 1.5 mm ตามลำดับ เมื่อสเตเตอร์ถูกกระตุ้นที่ความถี่ทำงาน (operating frequency) พบว่าสเตเตอร์หนา 1 mm มีค่าความถี่ทำงานเท่ากับ 21000 Hz ซึ่งน้อยกว่าสเตเตอร์หนา 1.5 mm ที่มีค่าความถี่ทำงานเท่ากับ 26200 Hz และจากผลการคำนวณพบว่าพฤติกรรมของคลื่นมีลักษณะเหมือนกัน แต่ความถี่ทำงานและขนาดความสูงของคลื่นมีค่าแตกต่างกันซึ่งมีผลมาจากค่าความแข็งตึงของสเตเตอร์ที่ต่างกันซึ่งขึ้นกับความหนาของสเตเตอร์นั่นเอง

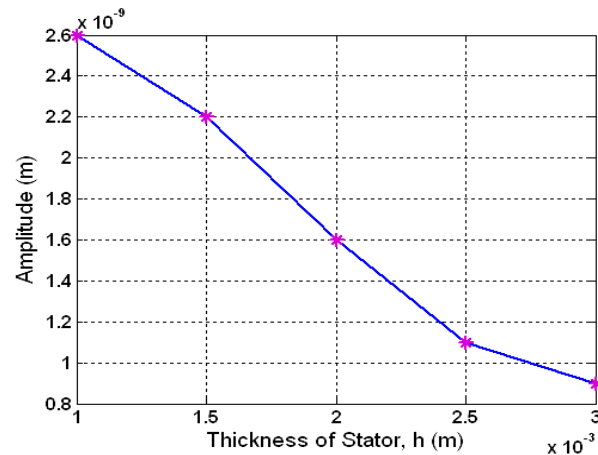


รูปที่ 5 แสดงคลื่นเคลื่อนที่ของสเตเตอร์ที่มีความหนา 1 mm ที่กระตุ้นด้วยความถี่ทำงาน 21000 Hz



รูปที่ 6 แสดงคลื่นเคลื่อนที่ของสเตเตอร์ที่มีความหนา 1.5 mm ที่กระตุ้นด้วยความถี่ทำงาน 26200 Hz

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของสเตเตอร์กับความสูงของคลื่นเคลื่อนที่เมื่อกระตุ้นที่ความถี่ทำงานซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น พบว่าสเตเตอร์ที่มีความหนาน้อยจะให้คลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงขณะที่ความสูงของคลื่นจะลดลงเมื่อสเตเตอร์มีความหนาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของสเตเตอร์กับความสูงของคลื่นเคลื่อนที่

#### 4.สรุป

จากผลการจำลองแบบสเตเตอร์ของมอเตอร์อัลตราโซนิกเชิงเส้น โค้งที่ความหนาต่างกันสรุปได้ว่า ค่าความสูงและความถี่ของคลื่นเคลื่อนที่ที่จะขึ้นกับค่าความแข็งตึงของสเตเตอร์ และพบว่าสเตเตอร์ของมอเตอร์ที่หนา มีค่าความแข็งตึงของระบบมากกว่าสเตเตอร์ของมอเตอร์ที่บาง จึง ส่งผลให้ความถี่ทำงานของสเตเตอร์แบบบางมีค่าต่ำกว่ามอเตอร์แบบหนา และขนาดความสูงของคลื่นเคลื่อนที่ของมอเตอร์แบบบางจะสูงกว่ามอเตอร์แบบหนา และจะลดลงอีกเมื่อความหนาของสเตเตอร์มากขึ้น ซึ่งขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นเคลื่อนที่ส่งผลโดยตรงต่อแรงขับของมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ที่มีแอมพลิจูดของคลื่นสูงจะทำให้แรงขับมากขึ้นด้วย

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสนับสนุนการวิจัยจากโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทยเลขที่ TGIST 01-50-037 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Hemsell, T., and Wallaschek, J., 2000. Survey of the present state of the art of piezoelectric linear motors. *Ultrasonics* 38 (2000), pp. 37-40.
- [2] Hermann, M., and Schinkoth, W.(IKFF)., 1999. Piezoelectric traveling wave motors generating direct linear motion. *Conference Proceeding, Bremen 26, 28 June 1996*, pp. 200-203
- [3] Yongrae, R., Susung, L., and Woosok, H., 2001. Design and fabrication of a new traveling wave-type ultrasonic linear motor. *Sensors and Actuators A* 94 (2001), pp. 205-210.
- [4] Ueha, S., Tomikawa, Y., Kurosawa, M., and Nakamura, N., 1993. *Ultrasonic Motors Theory and Applications*. Clarendon Press, Oxford, UK.

- [5] Sashida, T., and Kenjo, T., 1993. An Introduction to Ultrasonic Motors. Clarendon Press, Oxford.
- [6] Lih, S.S., Bar-Cohen, Y., and Grandia, W., 1997. Rotary Ultrasonic Motor Actuated By Traveling Fluxural Wave. Smart Structures and Integrated Systems", San Diego, CA, 3-6 March, pp. 912-917
- [7] Bar-Cohen, Y., Bao, X., and Grandia, W., 1999. Rotary Ultrasonic Motors Actuated By Traveling Flexural Wave. Proceedings of SPIE's 6<sup>th</sup> Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 1-5 March, pp. 698-704
- [8] Smithmaitrie, P., and Tzou, H.S., 2005. Electro-dynamics, micro-actuation and design of arc stators in an ultrasonic curvilinear motor. Journal of Sound and Vibration 284 (2005), pp. 635-650.
- [9] Soedel, W., 1993. Vibrations of Shells and Plate. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [10] Uchino, K., 1997. Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [11] Tzou, H.S., 1993. Piezoelectric Shell (Distributed Sensing and Control of Continua). Kluwer Academic, Boston/Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [12] Frangi, A., Corigliano, A., Binci, M., and Faure, P., 2005. Finite element modeling of a rotating piezoelectric ultrasonic motor. Ultrasonics 43 (2005), pp. 747-755.
- [13] Sun, D., Liu, J., and Ai, X., 2002. Modeling and performance evaluation of traveling-wave piezoelectric ultrasonic motors with analytical method. Sensor and Actuators A 100 (2002), pp. 84-93.
- [14] P. Smithmaitrie et al., Vibration response and harmonic wave propagation of ultrasonic arc drivers. Mechanical System and Signal Processing 21 (2007), pp 1174-1187.