

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	弾性要素による静電ベルの振動周波数向上効果の検証
Title(English)	Improvement of Driving Frequency for Self-excited Electrostatic Oscillator using Elastic Energy Recovery
著者(和文)	難波江裕之, 古村博隆, 鈴森康一, 遠藤玄
Authors(English)	Hiroyuki NABAE, Hirotaka KOMURA, Koichi SUZUMORI, Gen ENDO
出典(和文)	第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, Vol. , No. , pp. 853-855
Citation(English)	Proceedings of the 17th SICE System Integration Division Annual Conference, Vol. , No. , pp. 853-855
発行日 / Pub. date	2016, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2016 The Society of Instrument and Control Engineers

弾性要素による静電ベルの振動周波数向上効果の検証

○難波江 裕之（東京工業大学），古村 博隆（東京工業大学），
鈴森 康一（東京工業大学），遠藤 玄（東京工業大学）

Improvement of Driving Frequency for Self-excited Electrostatic Oscillator using Elastic Energy Recovery

○Hiroyuki NABAE (Tokyo Tech), Hirotaka KOMURA (Tokyo Tech),
Koichi SUZUMORI (Tokyo Tech), and Gen ENDO (Tokyo Tech)

Abstract: In drive of an electrostatic oscillator (also known as a Franklin's bell or Gordon's bell), its armature mainly loses its energy owing to collisions with electrodes to exchange the electric charges. This paper proposes an improving method for a self-excited electrostatic oscillator which decreases the energy loss due to an armature's collision with electrodes utilizing an elastic element for energy storage. The fundamental experiment implies that the proposed method can improve performance of electrostatic oscillators with regard of driving frequency.

1. 緒言

被災地での探索や狭隘箇所の検査など，小型のロボットがもたらす恩恵に寄せられる期待は大きく，次々と技術開発が進んでいる．中でも，昆虫サイズでの飛翔を可能とするロボット [1,2] では，従来の小型ロボットでは困難であるような場所にも侵入可能であり，災害現場での探索などへの応用において，高いポテンシャルを秘めている．このような用途では，エネルギー密度の高いアクチュエータの使用が不可欠であり，上記の例では圧電素子等が使用されている．一方，さらにスケールの小さな MEMS (Micro Electro-mechanical system) などの分野では，静電アクチュエータが多く用いられ [3]，一般的なものとなっている．静電気力はスケール効果により，体積スケールが小さい領域において優位であるとされている．静電アクチュエータには多くの種類が存在するが，静電自励振動を用いた静電ベル（ゴードンベル，フランクリンベル）は，直流電圧の印加により，往復運動を実現可能であるというユニークな特性を持っており，本体が 2 つの電極と導体振動子のみで構成可能である点と合わせて，振動を伴う小型デバイスに適したアクチュエータあると考えられる．この原理を利用したアクチュエータ [4,5] が開発されてきているものの，数が非常に少なくなっている．その要因としては，静電アクチュエータ特有の高印加電圧や，振動子と電極間の放電など幾つかの理由が考えられるが，電極と振動子の衝突によるロスの大きさも大きな要因の 1 つである [6]．単純には振動子と電極間の反発係数を高めることで，解決することができるが，その実現は容易ではない．そこで本研究では，弾性要素を用い，エネルギーを貯蔵することにより，衝突時のエネルギー消費の低減を図る．本論文では，まず提案手法のコンセプトについて説明し，周

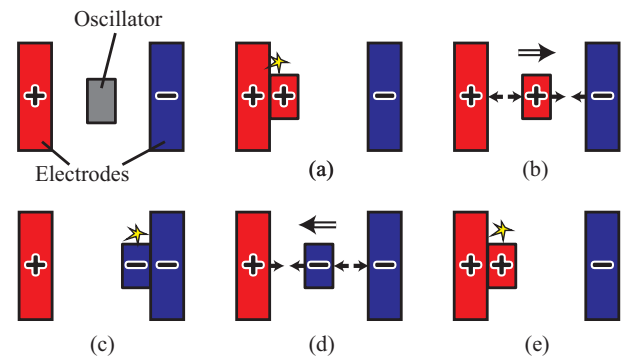


Fig. 1: Driving principle of electrostatic bell.

波数を評価基準として，弾性要素の剛性率変化による静電ベル型アクチュエータの動作への影響について検証する．

2. 弾性要素による静電自励振動子の周波数特性向上

本節では，背景で述べた提案手法の概要について述べる．静電自励振動子は，Fig. 1 に示す以下の様な原理により直流電圧の印加から自励振動が発生する．

- 振動子が片方の電極に接触し，帯電する（図の場合は正極で正に帯電）
- 正に帯電した振動子と正極の間に斥力，負極との間に引力が働き負極方向に移動する．
- 振動子が負極に接触し，負に帯電する．
- 負に帯電した振動子と負極の間に斥力が，正極との間に引力が働き，正極方向に移動する．

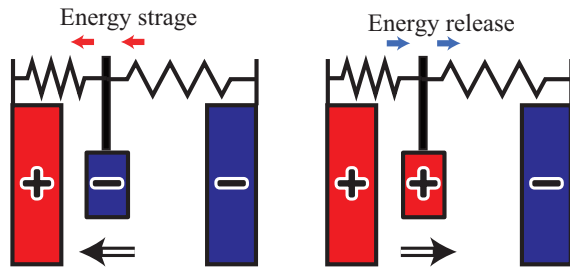


Fig. 2: Conceptual figure of proposed actuator.

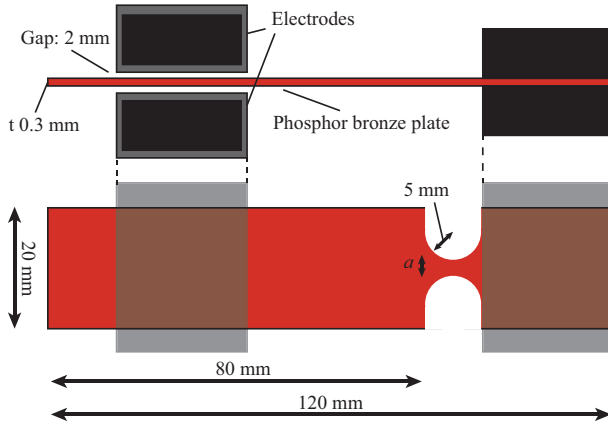


Fig. 3: Schematic figure of verification device.

- (e) 振動子が正極に接触することによって正に帯電し、
(a)に戻る。

以上の過程を繰り返すことによって、振動が発生する。この振動において、(a)、(b)において起こる衝突時の損失が、大きく駆動効率を低下させているものと思われる。提案する手法の概念図を Fig. 2 に示す。電極に近付く際に、弾性要素に運動エネルギーの一部を貯蔵し、衝突時のエネルギー損失を低減する (Fig. 2 の左)。衝突後、電極から離れる際に弾性要素に蓄えられたエネルギーが回生される (Fig. 2 の右)。以上により、駆動時のエネルギー損失の低減を図っている。

3. 提案手法の検証

3.1 試作機

Fig. 3 に提案手法検証のための試作機の模式図を、また Fig. 4 に製作した試作機の外観を示す。本稿では、振動子としてリン青銅板 (C5210P) を用いた。リン青銅板の電極間部分に静電機力が働き、往復運動が生じる。弾性による復元力は、リン青銅板の固定部 (電極に対して反対側) 付近が変形することにより生じる。Fig. 3 の a に示される切込み量によって 3 種類の弾性率を実現し、それぞれを高弾性率 ($a = 9$ mm)、中弾性率 ($a = 5.5$ mm)、低弾性

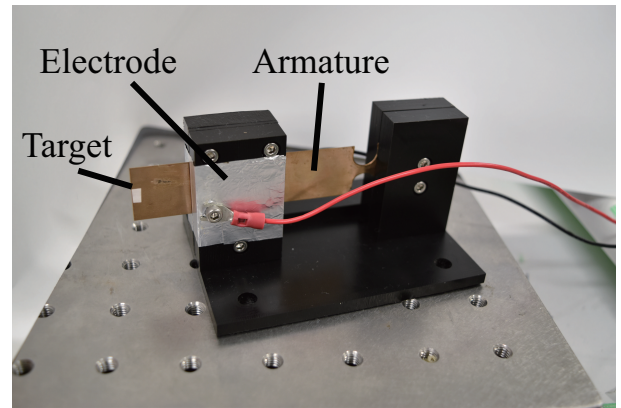


Fig. 4: Prototype for experimental evaluation.

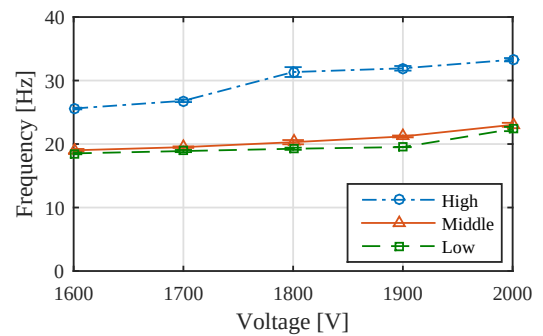


Fig. 5: Result of driving frequency measurement with various elastic moduli. High, Middle, and Low indicate results of high, middle, and low elastic moduli, respectively.

率 ($a = 3.5$ mm) とした。電極間距離は 2 mm となっている。切込部形状の静電気力への影響は、電極間の部分に電界が集中することにより、無視できるものと仮定した。

3.2 測定システム

Fig. 4 に示す測定システムにより、実験を行った。尚、変位の計測はレーザ変位計 (keyence 社製, LC2440) によって行い、高電圧電源 (TAKASAGO 製, BPS120-5) を用いて電極間に電圧印加を行った。また、データ取得にはオシロスコープ (DSO-X 2004A) を用いた。

3.3 検証実験

実験では、3 種類の弾性率の振動子に対して、100 V 刻みで、1600 V から 2000 V までの直流電圧を電極間に印加し、その時の振動子の変位をレーザ変位計により取得した。そして、得られた変位データから周波数を取得した。実験結果を Fig. 5 に示す。尚、それぞれ、4 回分の振動の平均

値及び分散を採用している。Fig. 5 では、低弾性率と中弾性率の違いは小さいものの、今回の実験範囲においては弾性率の増加によって振動周波数の上昇が確認された。

4. 結言

本稿では、弾性要素を用いたエネルギー回生によって静電自励振動子の効率化を図り、振動周波数向上を目指した。提案手法検証のため、試作機による検証実験を行った。検証実験では、弾性率増加による振動周波数の向上が確認された。今後、振動周波数上昇の条件や弾性率の最適化について、理論的・実験的検証を行っていく予定である。

参考文献

- [1] GCHE De Croon, KME De Clercq, Remes Ruijsink, B Remes, C De Wagter, “Design, aerodynamics, and vision-based control of the DelFly”, *International Journal of Micro Air Vehicles*, Vol. 1, 2, pp.71–97, 2009.
- [2] Robert J Wood, “The first takeoff of a biologically inspired at-scale robotic insect”, *IEEE transactions on robotics*, Vol. 24, 2, pp.341–347, 2008.
- [3] Jack W Judy, “Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications”, *Smart materials and Structures*, Vol. 10, 6, pp.1115–1134, 2001.
- [4] Akio Yamamoto, Hiroaki Katsurai, Toshiro Higuchi, “DC-Operated Electrostatic Impact Drive Actuator”, *Advanced Robotics*, Vol. 24, 10, pp.1441–1459, 2010.
- [5] Matej Forjan, Marko Marhl, Vladimir Grubelnik, “The electromechanical response of a self-excited MEMS Franklin oscillator”, *2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, pp.41–44, 2015.
- [6] Shai Shmulevich, Inbar Hotzen, David Elata, “Mathematical modelling of the electrostatic pendulum in school and undergraduate education”, *European Journal of Physics*, Vol. 35, 1, 015022, 2013.