

アンテザードな誘電エラストマアクチュエータ制御の研究

An untethered control system for Dielectric Elastomer Actuators

○学 南之園 彩斗 (芝浦工大) 学 村上 泰智 (芝浦工大)
 正 重宗 宏毅 (芝浦工大) 正 前田 真吾 (芝浦工大)

Ayato MINAMINOSONO, Shibaura Institute of Technology, md18069@shibaura-it.ac.jp
 Taichi MURAKAMI, Shibaura Institute of Technology, ab16118@shibaura-it.ac.jp
 Hiroki SHIGEMUNE, Shibaura Institute of Technology, hshige@shibaura-it.ac.jp
 Shingo MAEDA, Shibaura Institute of Technology, maeshin@shibaura-it.ac.jp

Soft robots have a potential to build human-machine coexistence. It is important for autonomous robots to adapt external force and locomote without external controllers. Since the electrical performance of Dielectric Elastomer Actuator (DEA) is similar to a capacitor, its power consumption is small. In addition, DEA is light in weight and thin in thickness. In this research, we developed an untethered control system for DEAs. From our experiments, we found that our controller can drive four DEAs and confirm that the power consumption of the DEA is low. Our research would contribute to develop untethered soft robots and open up the society of the human-machine coexistence.

Key Words: Dielectric Elastomer Actuator, Untethered system, Soft robot

1. 緒言

自然環境の中で活動するロボットにとって、自律して長時間移動でき、外的な負荷に耐える機能は非常に重要である。自律機能を付与するためにはシステムをアンテザード化する必要がある。先行研究では BigDog [1]のようなアンテザードロボットが開発されており、その実働性の高さが示されている。外的な負荷に耐える機能の形成のために我々はソフトロボットに着目した。多くのソフトロボットは柔らかい材料を利用し、外的負荷に順応できる機能を有する。誘電エラストマアクチュエータ(Dielectric Elastomer Actuator : DEA) [2]は、ソフトロボットに適合できる電気駆動型の人工筋肉の一つである。DEA は単位密度あたりのエネルギー密度が高く、消費電力が小さい特長を持つ。図1はDEAの駆動メカニズムを示す。式(1)はDEAの駆動力となる静電気がエラストマに付与する圧力 P [N/m²]を示す[3]。

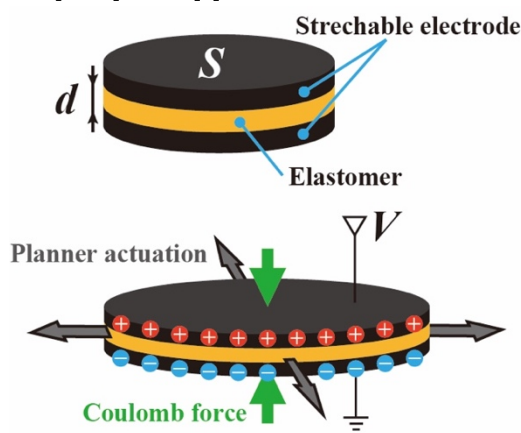


Fig.1 Structure of DEA

$$P = \epsilon_r \epsilon_0 E^2 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{V}{d} \quad (1)$$

- ϵ_r : エラストマの比誘電率
- ϵ_0 : 自由空間の誘電率 (8.854 × 10⁻¹² F/m)
- E : 電界強度 [V/m]
- V : 印加電圧 [V]
- d : 電極間距離 [m]

DEA を用いてロボット開発をすることによって、そのロボットは軽量かつ長時間駆動し、外的負荷を許容できる可能性を持つ。DEA は駆動に高電圧を要するため、駆動システムのアンテザード化が1つの課題とされていた。従来研究ではDEA が用いられた高電圧を制御するアンテザードシステムが提案されている[4][5]。しかし、先行研究が提案しているアンテザードシステムでは、高電圧用の電子素子の制約により、駆動できるDEAの数が少ない。また近年の研究では、低電圧で動作するDEAを3つ以上駆動可能なアンテザードシステムも提案されたが、人工的な薄膜の形成とその薄膜の積層技術が必要であるため、製作は容易ではない[6]。我々は以前の研究で、既に容易に製作可能な高電圧駆動型のDEAを4つ駆動できる回路の開発に成功している[7]。しかし、DEAデバイスの外部にバッテリーや回路を設置していたため、アンテザードなシステムには成り得ていなかった。

2. 研究目的

本研究では容易に製作可能な高電圧駆動型のDEAを複数制御できるアンテザードなシステムを開発する。DEAの長所を保持するため、コンパクトで軽量のシステム構築する。

3. 製作方法

3.1 DEAの製作 我々はこれまで報告してきたDEAの製作方法でアンテザードシステムを評価した[7][8]。エラストマはアクリルゴム (VHB4905-J)、電極は多層カーボンナノチューブ (MWCNT)を用いた。図2は製作したDEAを示す。実験では異なる面積を有したDEAでシステムの比較を行うため、φ20mm, φ50mm, φ90mmのDEAモデルを製作した。複数のDEA制御の実験のためφ50mmのモデルは4つ製作した。

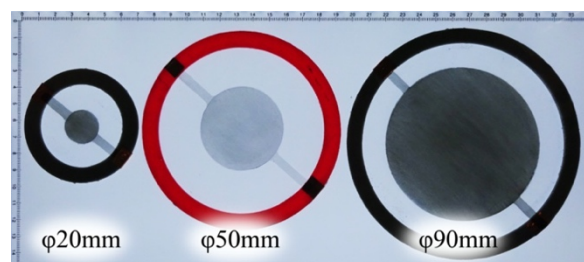


Fig.2 Model of the DEAs for an experiment

3.2 回路設計 我々は過去の研究で、外部電源を用いた高電圧制御法を確立した[7]。DC/DC コンバータと MOSFET を使用した高電圧制御方法を本研究でも用いた。本研究で用いた DC/DC コンバータは EMCO AG20P-5, MOSFET は IXGT2N250 である。バッテリーは電圧が 3.7V, 容量が 110mAh のものを使用した。レギュレータ 1 (TPS1200) はバッテリーの電圧を 5V に昇圧する。その 5V は DC/DC コンバータとレギュレータ 2 へ入力される。この時、DC/DC コンバータに入力される 5V は Cont. resistor によって降圧される。Cont. resistor の大きさを調節する事で DC/DC コンバータの出力電圧が変化する。レギュレータ 2 (NJM2845DL1-33) は 5V を 3.3V に降圧し、マイコン に電力を供給する。DC/DC コンバータが出力した高電圧は Power MOSFET によってスイッチングされる。スイッチングの命令はマイコン (LPC1114FN28) の出力信号がフォトカプラ (TLP172A) を介して Power MOSFET に入力されたものである。図 3 は Untethered controller を示す。大きさは直径 80mm, 厚み 10mm, 重量は 63g である。

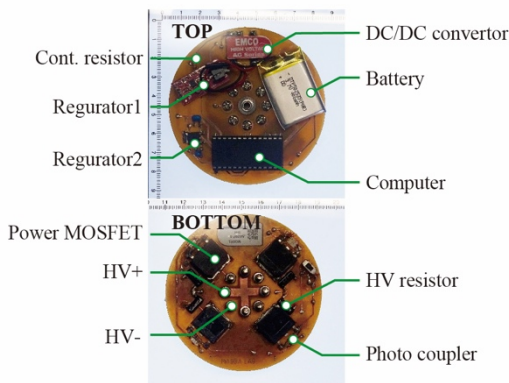


Fig.3 Untethered controller

4. 実験

4.1 実験条件 Untethered controller の性能を調べるため、DEA の面積とシステムの消費電力、DEA の個数とシステムの消費電力の関係性を明らかにする。DEA の面積が大きくなるにつれて、理論的にはシステムの消費電力は大きくなる事が推測できる。制御する DEA の数が増加した場合も同様に、システムの消費電力が大きくなる。図 4 は Untethered controller が出力する波形を示す。電圧は 1.6kV, 駆動周波数は 1Hz に設定した。使用する DEA は図 2 で示した $\phi 20\text{mm}$, $\phi 50\text{mm}$, $\phi 90\text{mm}$ のモデルである。制御する DEA の個数と消費電力の関係性を求めるため、複数の $\phi 50\text{mm}$ モデルを使用した。

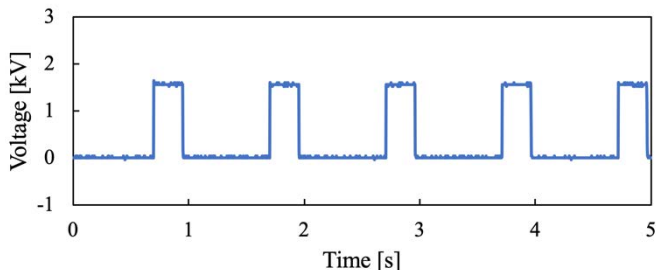


Fig.4 Output waveform from the untethered controller

4.2 実験結果・考察 図 5 は DEA の条件とシステム駆動時間の関係性を示す。電極の面積とシステムの駆動時間の関係性は、 $\phi 20\text{mm}$ の DEA のシステムは 786 秒, $\phi 50\text{mm}$ は 763 秒, $\phi 90\text{mm}$ は 670 秒駆動した。 $\phi 20\text{mm}$, $\phi 50\text{mm}$, $\phi 90\text{mm}$ の実験結果より、それぞれの消費電力は、1.86W, 1.92W, 2.18W であるので、DEA の消費電力は $4.93\text{mW}/\text{cm}^2$ であることが求まる。

制御する DEA の数とシステム駆動時間の関係性は、 $\phi 50\text{mm}$ の DEA を 1 つ駆動させる時は 763 秒, 2 つでは 750 秒, 3 つでは 726 秒, 4 つでは 695 秒であった。1-4 つの DEA の実験結果より、それぞれの消費電力は、1.92W, 1.95W, 2.08W, 2.11W であるので、DEA の個数と消費電力の関係性は $48.3\text{mW}/\text{個数}$ (1 つの DEA あたり 19.6cm^2) になる。

これらの結果より、DEA の消費電力は極めて小さいことが分かる。また、DEA の消費電力から逆算すると、Untethered controller の消費電力は 1.85W である。この数値は DEA の消費電力に比べてかなり大きい。原因は DEA に蓄積した電荷を取り除くために挿入した、HV resistor で常に電力が消費されているためである。HV resistor の抵抗値を下げることで消費電力の改善が見込まれるが、同時に DEA の電荷の除去時間が増えるため、応答性が低下する可能性が考えられる。

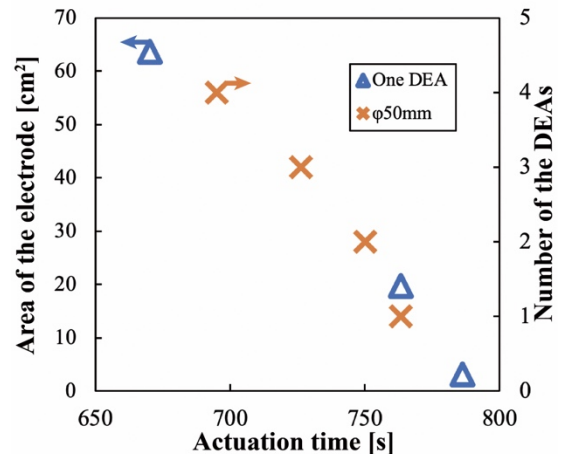


Fig.5 Performance of the untethered system with DEA

5. 結論

本研究はアンテザードシステムによる複数の DEA の駆動を目的としていた。我々が開発した Untethered controller は最大 4 つの DEA を駆動させられる。しかし、消費電力の面で DEA に対しかなり劣勢であるので、今後の改良の余地が必要である。本研究の内容は DEA デバイスの実用性を高める技術であり、今後の独立型ソフトロボットを発展させる可能性がある。

参考文献

- [1] M. Raibert et al., "Big dog, the rough-terrain quadruped robot," *Proceedings of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control*, vol. 41, no. 2, pp. 10822-10825, 2008.
- [2] M. Duduta et al., "Realizing the potential of dielectric elastomer artificial muscles," *PNAS*, vol. 116, no. 7, pp. 2476-2481, 2019.
- [3] R. Pelrine et al., "High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%," *Science*, vol. 287, no. 5454, pp. 836-839, 2000.
- [4] J. Cao et al., "Untethered soft robot capable of stable locomotion using soft electrostatic actuators," *Extreme Mechanics Letters*, vol. 21, pp. 9-16, 2018.
- [5] F. Berlinger et al., "A Modular Dielectric Elastomer Actuator to Drive Miniature Autonomous Underwater Vehicles," in *Robotics and Automation (ICRA), 2018 IEEE International Conference on*, pp. 3429-3435, 2018.
- [6] X. Ji et al., "An autonomous untethered fast soft robotic insect driven by low-voltage dielectric elastomer actuators," *Science Robotics*, vol. 4, no.37, pp. 1-11, 2019.
- [7] A. Minaminosono et al., "A deformable motor driven by dielectric elastomer actuators and flexible mechanisms," *Front. Robot. AI*, vol. 6, no. 1, 2019.
- [8] H. Shigemune et al., "Dielectric elastomer actuators with carbon nanotube electrodes painted with a soft brush," *Actuators*, vol.7, no. 3, 2018.