

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	大規模積層型静電アクチュエータの開発
Title(English)	Development of a Large-scale Stacked-type Electrostatic Actuator
著者(和文)	伊藤誠
Author(English)	Makoto Ito
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9376号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:實吉 敬二,中村 隆司,垣本 史雄,柴田 利明,宗宮 健太郎
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9376号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻: Department of	基礎物理学	専攻	申請学位 (専攻分野): Academic Degree Requested	博士 (理学) Doctor of
学生氏名: Student's Name	伊藤 誠		指導教員 (主): Academic Advisor(main)	実吉 敬二
			指導教員 (副): Academic Advisor(sub)	陣内 修

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文はロボット用人工筋肉としての応用を目指した静電アクチュエータの開発について述べている。

近年の自律型ロボットやパワーアシストスーツの需要に伴い、これらに要求される運動特性をみたすアクチュエータの必要性が高まっている。自律型ロボットやパワーアシストスーツ用アクチュエータの性能としては、発生力が大きくストロークが長いことだけでなく、軽量であること、高効率で安全性の高いことが必要である。これに対して、従来のアクチュエータにおいて上記の生体筋肉のような特性をもったものは実用化されていない。

現在、空気圧アクチュエータ、形状記憶合金アクチュエータ、電場応答性高分子などがロボット用人工筋肉として有力視されているが、それぞれ克服し難い駆動原理上の短所を抱えている。その中で静電アクチュエータは軽量で高効率であるなど人工筋肉として理想的な特性をもっている。静電アクチュエータの短所として唯一、発生力の小ささが指摘されているが、電極間隔を狭くし発生力密度を高めることと、電極間隔が広がり過ぎないためのバネ特性をもたせることで、静電アクチュエータは大発生力で高効率な人工筋肉となり得る。

本論文では、ロボット用人工筋肉への応用を目指して開発された静電アクチュエータである大規模積層型静電アクチュエータ (LSEA) の駆動原理と特徴について述べている。LSEA はフィルム状の電極 (PET-銅箔-PET の 3 層構造) を市松模様様に接着して積層した静電アクチュエータで、平行平板電極としての役割を担う電極部とこれらを電氣的・機械的に接続するヒンジ部の集合体であり、ヒンジ部の特性として電極間隔が広がり過ぎないためのバネ特性を有している。その固有の構造により、広い電極面積を有したまま電極間隔を狭くすることが原理的に可能なため大発生力を得ることができ、また積層数を増やすことで大きなストロークを得ることができ、LSEA はロボットの人工筋肉として有力候補であると考えられる。

LSEA の製作工程は、フィルム状電極の切り出し、端面に露出した電極のエッチング、電極の接着・積層の 3 工程のみで非常に製作が容易である。切り出し工程ではレーザーアブレーション技術を用いることで、また接着工程ではスクリーン印刷技術を応用することで精度よく LSEA を製作することができた。また電極同士の接着力を高める方法として UV オゾン法が有効であった。

本論文の後半では試作した LSEA の性能を評価している。評価対象とした性能は、バネ特性、収縮率、応答性、発生力、消費電力である。

バネ特性の測定では、LSEA が静電アクチュエータの有すべきバネ特性 (ソフトレンジとハードレンジ) をもっていることを実験的に示し、このバネ特性がヒンジ部の形状変形による力とヒンジ部を介して電極部同士が互いに引き合う力により得られることを実験結果と片持ち梁モデルによるヒンジのたわみ計算から求めた。また大気圧中と真空中でのバネ特性の測定結果を比較することにより、電極間隔が狭い領域で空気抵抗の影響が現れることと、ヒンジ部の厚みの変化が LSEA のバネ定数に影響することを明らかにした。

収縮率の測定では、LSEA が生体筋肉以上の収縮率を有するという測定結果を得た。また収縮率の負荷依存性、保管条件依存性について測定して、ヒンジ部の厚さを薄くし電極部同士の接着力を向上することでこれらの依存性を排除できることを指摘した。応答性の測定では、LSEA の応答性が負荷の慣性の影響を大きく受けていることから、電極間隔を狭くし発生力密度を向上することで応答性が改善できることを示した。大気圧中と真空中での応答性の比較から、空気抵抗が試作した LSEA の応答性においては本質的にはたらいっていないことを明らかにした。発生力の測定では、測定結果を基に LSEA の発生力生成メカニズムについて線形バネで接続された積層平行平板電極モデルを用いて考察した。これにより電圧印加時に LSEA 内部で pull-in 現象が積極的に起こり、発生力は pull-in 現象後に電極間にはたらく静電引力と電極間の弾性力の増分の和とするモデルが実際の現象を良く表していることを明らかにした。

消費電力の測定では、試作した LSEA の消費電力は mW オーダーであったが、この時のリーク電流量（定常電流）は PET の体積抵抗値から推測される値を大きく上回っていたため、端面において露出した電極から持続的な縁面放電が生じている可能性が考えられた。LSEA の消費電力はこの放電を防ぐことにより低減できるものと考えられる。また同時に、静電容量が時間経過に伴い増加していることを測定して、前記の pull-in 現象を実験的に確かめることができた。

本論文では、LSEA を物理エンジンでシミュレーションするためのモデリング及び計算手法についても提案をしている。本モデリングでは厳密な計算が難しいヒンジ部のたわみと発生力との関係を、線形バネとねじりばねを組み合わせたモデルにより簡単に近似して低計算コスト化を図った。この計算手法により得られた LSEA の変形シミュレーションの例と、ヒンジを片持ち梁とみなして材料力学的に求めた解とは良く一致しており、この計算手法の妥当性を支持する結果が得られた。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻 : Department of	基礎物理学	専攻	申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested	博士 (理学)
学生氏名 : Student's Name	伊藤 誠		指導教員 (主) : Academic Advisor(main)	実吉 敬二
			指導教員 (副) : Academic Advisor(sub)	陣内 修

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

Electrostatic actuators have the advantages of light weight, flexibility, and high energy efficiency, which make them suitable for use as artificial muscles. However, a traditional electrostatic actuator cannot generate long strokes and a high force density at the same time because such actuator would excessively widen the gap between the electrodes because of its structure.

This paper presents a newly developed large-scale stacked-type electrostatic actuator (LSEA) intended for use as an artificial muscle for robots. An LSEA is a multi-stacked electrostatic actuator that can be linearly contracted by the application of a voltage. It has a unique structure that prevents overextension of the gap between the electrodes. It can therefore generate a large force.

In this study, two different prototypes were made to experimentally determine the spring characteristics, the relationship between the contractive force and the stroke, and power consumption. The findings showed that LSEA prevents the overextension of the gap between the electrodes and has a high contraction ratio that is equivalent to that of a mammalian skeletal muscle. The force density (or the actuation energy density) was hundredth smaller than that of muscles, but it can be improved by applying short and thin hinge parts. The experiment in vacuum shows the effect of air drag. The effect was not change the performance of the prototype although it might be not negligible when the air gaps between the electrodes are short considerably.

As an additional study, fundamental concept of a physics engine was proposed as a method to simulate the performance of LSEAs. In this simulation, the hinge parts were considered as compounds of linear springs and torsion springs in order to simplify the hinge model and reduce the calculation cost. This concept enables us to calculate more complex LSEA models in less time in comparison with FEM model. The result example of calculation of spring characteristics showed the adequacy of the spring hinge model in the case of a 6-layered 3 x 1 LSEA model.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).