

機関番号：54101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560048

研究課題名（和文） シミュレーションに基づく積層型静電アクチュエータの特性改善とその試作

研究課題名（英文） Characteristic Improvement and Experimental Manufacture of Stacked-type Electrostatic Actuator based on Simulation Results

研究代表者

奥田 一雄 (Okuda Kazuo)

鈴鹿工業高等専門学校・電気電子工学科・准教授

研究者番号：00214057

研究成果の概要（和文）：本研究は、人工筋肉への応用を目的として、軽量かつ応答性と瞬発力に優れた新しい積層型静電アクチュエータを開発するものであり、これを微小化・集積化することによって、電磁力を利用したモータの性能を超える静電アクチュエータの実現を目指している。実験結果および有限要素法解析結果から、アクチュエータの形状変化とバネ特性の関係、すなわち、アクチュエータの電極とヒンジの形状がアクチュエータの収縮性能と負荷に対して伸びにくくなる性質との関係を明らかにした。また、均一に $1/n$ に縮小したアクチュエータを元の大きさになるように集積化したアクチュエータは、元のアクチュエータのバネ特性とストロークが等しく、発生力が n^2 倍となる優れたアクチュエータとなることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have developed a new stacked-type electrostatic actuator, which has the light weight, the excellent response characteristic and the instantaneous force. The purpose of this research is to achieve the electrostatic actuator that can be used for the artificial muscle by the minimization and integrating this actuator. We have measured the spring characteristic of this actuator, and have simulated it by the nonlinear structural analysis including the contact problem using the finite element method. It has been understood that the spring characteristic can be improved by thickening the electrode and thinning the hinge. In addition, the stroke of the actuator can be controlled by changing the length of the hinge. When the actuator is reduced to $1/n$, and this is integrated until becoming the same volume, the actuator has the same spring characteristic and the stroke, and the value of the generative force can be increased to former n^2 times.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,617,882	785,364	3,403,246
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,617,882	1,085,364	4,703,246

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎，応用物理学一般

キーワード：マイクロマシン，静電アクチュエータ，シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 従来型のアクチュエータは用途別に電磁モータ，油圧式アクチュエータ，空気式アクチュエータ，エンジンなどに大別されているが，軽量でしかも瞬発力に優れた機能を有するアクチュエータは数少ない。

(2) 静電アクチュエータの発生力は弱いものとされているが，対向する電極の間隔を狭くすればするほど，より大きな力を発生させることができるため，微小世界では十分な力を発生できるアクチュエータである。特に正負の電極を交互に重ねて電極面と垂直方向に駆動させる積層型静電アクチュエータは，大きな発生力と長い駆動距離を両立させることができるアクチュエータであり，人工筋肉への応用が有望である。

(3) 10年以上も前からいくつかの積層型静電アクチュエータが提案されているにもかかわらず，未だに実用化に至っていない。その大きな理由はアクチュエータのバネ特性に最適値を見つけにくいことである。すなわち，アクチュエータの剛性を低くすると外部負荷等によってアクチュエータ自身が変形しやすくなり，電極間隔が広がった部分で急激な静電力の減少を招く。また逆にこれを防ぐためにアクチュエータの剛性を高くすると静電力のほとんどがアクチュエータ自身を収縮させることだけに使用されるため，アクチュエータの発生力を効率良く利用することが困難となる。

2. 研究の目的

(1) 本研究は，人工筋肉への応用を目的として，軽量かつ応答性と瞬発力を兼ね備えた特徴を持ったサブミクロンスケールから通常のスケールまで対応可能な積層型静電アクチュエータを開発することである。

(2) この積層型静電アクチュエータに求められるバネ特性，すなわち，アクチュエータが伸縮する領域（駆動領域）では柔らかく，アクチュエータが伸びてはいけない領域（過負荷領域）では硬くなる特性を実現し，両者の比（バネ定数比）が10倍程度になることを目標とする。

(3) 積層型静電アクチュエータの設計手法を確立することを目的として，有限要素法を用いた接触問題を含む非線形構造解析により，アクチュエータの構造変化とバネ特性の関係をシミュレーションする。

3. 研究の方法

(1) 本研究で取り扱うアクチュエータは2本の絶縁されたリボン状フィルムを交互に折り込んだ紙バネのような構造であり，上述したバネ特性を実現するために，使用するフィルムには電極部が厚くヒンジ部が薄い構造（厚薄構造）を形成させる。

(2) 実用化が可能な小型の積層型静電アクチュエータを試作するための前準備としてリボン幅が2mm以下のリボン状フィルムを用いて次のようにアクチュエータを作製する。

① 駆動領域におけるアクチュエータの柔軟性を向上させるために，リボン状フィルムの厚さを数 μm 以下まで低減する。実際に使用したリボン状フィルムは，厚さ $0.2\mu\text{m}$ ，幅 1.8mm の銅薄膜電極を厚さ $1.5\mu\text{m}$ のPETフィルム2枚でサンドイッチした構造とし，全体の厚さを約 $4\mu\text{m}$ まで抑制した。尚，リボン状フィルムは東京フィルム加工株式会社と共同で開発したものである。

② ①で作製したリボン状フィルムの上下に別のPETフィルムを接着する方法によって厚い電極部分と薄いヒンジ部分が規則的に

交互に形成させる。このとき、工作精度が少なくとも $\pm 10\mu\text{m}$ 以下となるように、特別な治具やレーザ加工機などを使用する。

③ ②で作製した厚薄構造を持つリボン状フィルムを用いて、アクチュエータを作製し、そのバネ特性と発生力を測定する。

(3) シミュレーション環境を整備し、積層型静電アクチュエータの構造とバネ特性の関係を定量的に把握する。このときアクチュエータの電極のサイズ・厚さ・ヤング率・ポアソン比、ヒンジ部の形状・厚さ等をいろいろ変化させ、アクチュエータに加えた外力と変位量の計算結果からアクチュエータのバネ特性を求め、これを評価する。

(4) 積層数が多いアクチュエータの製作工程を効率化するために、リボン状フィルムの折り込み作業の自動化を検討する。具体的には、2本のリボン状フィルムの端部を接着した後、接着部分を中心とした回転運動と端部の水平および回転運動を組み合わせることによって、積層構造が自動的に形成される機構を試作する。

4. 研究成果

(1) 有限要素法解析ソフトウェア ANSYS (Academic Teaching Advanced) (最大節点数 256,000) を導入することによって、シミュレーション環境を整備するとともに、接触問題を含む非線形構造解析によって積層型静電アクチュエータのバネ特性を計算するための手法を確立した。

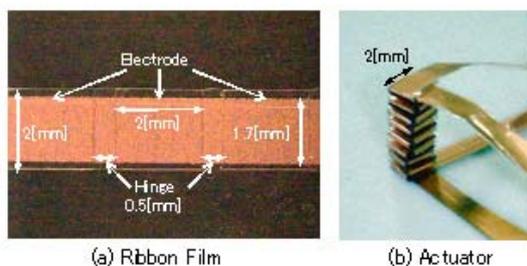


図1 リボン状フィルムとアクチュエータ

(2) 図1に示すように、2mm幅のリボン状フィルムを用いたアクチュエータを試作した。また、電極数が8, 16, 32のアクチュエータを作製し、それらのバネ特性を測定するとともに、図2のように同じ形状と同じ物性値を有するシミュレーションモデルのバネ特性を計算し、実験結果と比較した。図2から明らかのように、計算値と実験値は良好な一致を示しており、計算方法の妥当性を検証することができた。尚、図2から求めたバネ定数は9.4で、ほぼ当初の目標を達成できた。

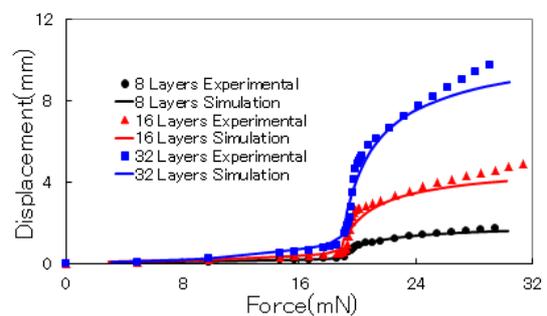


図2 実験値と計算値の比較

(3) 図3にヒンジの厚さと長さが $4\mu\text{m}$ と $500\mu\text{m}$ で、電極の厚さを $54\mu\text{m}$, $74\mu\text{m}$, $94\mu\text{m}$ と変化させた場合のアクチュエータのバネ定数を示す。図からアクチュエータのバネ定数は電極の厚さのほぼ2乗に比例して大きくなること、すなわち、電極を厚くすることによって駆動領域のバネ特性をやや劣化(収縮しにくく)させることになるが、過負荷領域のバネ特性を大きく改善(負荷に対して伸びにくく)することができることが分かった。

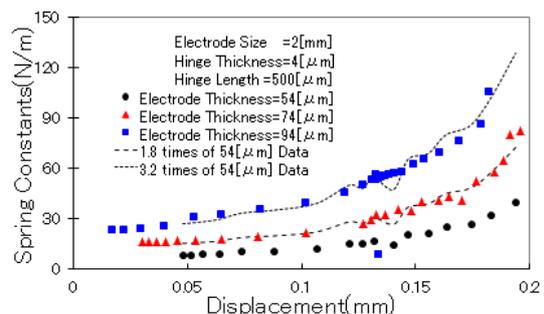


図3 電極の厚さ変化とバネ定数

(4) 図4に電極の厚さを $74\mu\text{m}$ 、ヒンジの長さを $500\mu\text{m}$ とし、ヒンジの厚さを $1\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $4\mu\text{m}$ に変化させたときのアクチュエータのバネ定数を示す。図から、ヒンジの厚さを変化させると、駆動領域ではバネ定数に大きな違いが見られるが、過負荷領域に入るとつれてその差は減少し、ほぼ同じバネ定数値に収束するようになることが分かる。このとき、ヒンジが厚くなるほど駆動領域のバネ定数が大きくなることから、アクチュエータの収縮特性を改善するためには、ヒンジを薄くしなければならないことが明らかとなった。

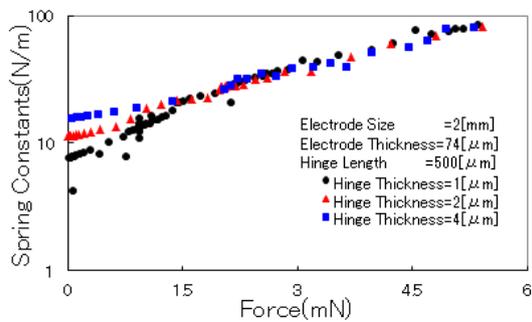


図4 ヒンジの厚さ変化とバネ定数

(5) 図5に電極の厚さを $56\mu\text{m}$ 、ヒンジの厚さを $6\mu\text{m}$ とし、ヒンジの長さを $300\mu\text{m}$ 、 $400\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ に変化させたときのアクチュエータのバネ定数を示す。図からヒンジの長さを変化させると、アクチュエータのバネ特性に大きな変化はなくストロークだけが変化することが分かる。

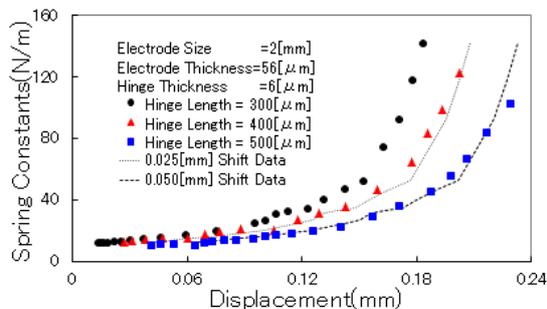


図5 ヒンジの長さ変化とバネ定数

(6) 図6に電極サイズが 2mm のアクチュエータとこれを均一に $1/2$ 倍に縮小、すなわち、全体の体積が $1/8$ 倍に縮小された場合のアクチュエータのバネ定数を示す。ここで、 2mm サイズのアクチュエータは電極の厚さが $54\mu\text{m}$ 、ヒンジの厚さと長さが $4\mu\text{m}$ と $200\mu\text{m}$ である。図からアクチュエータを均一に $1/n$ 倍に縮小するとバネ定数も大きさに比例して $1/n$ 倍に減少することが分かる。このとき、電極面積は $1/n^2$ 倍となるが、電極間隔も $1/n$ 倍となるため、アクチュエータの発生力は変化しない。次に、アクチュエータを縦方向と横方向に n 個ずつ集積化するとアクチュエータの発生力は n^2 倍となり、アクチュエータのバネ定数は元のアクチュエータの n 倍となる。さらにアクチュエータのストロークを元に戻すために長さ方向に n 段集積化すると、発生力は変化せずバネ定数は元の値となる。以上のことから、アクチュエータを $1/n$ 倍に縮小化し、同じ体積になるまで集積化した場合を考えると、発生力は元の n^2 倍、バネ定数とストロークは元と同じアクチュエータとなることが明らかとなり、将来、静電アクチュエータを人工筋肉に応用する可能性を再確認した。

(7) 東京工業大学バイオ研究基盤総合支援センターアイソトープ分野実吉研究室と共同で 2mm 幅リボン状フィルムの自動折り込み装置を試作し、厚薄構造を有する四角形状お

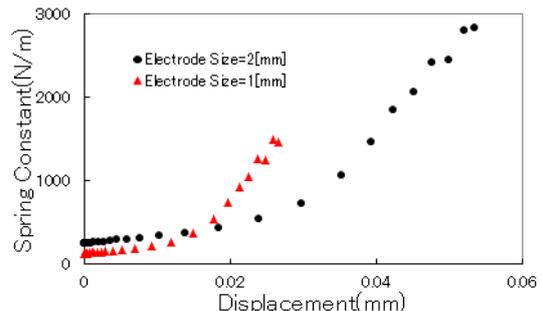


図6 サイズ変化とバネ定数

よび三角形形状アクチュエータの折り込み作業を行った。尚、電極数は 200~300 程度でトラブルなくスムーズな自動折り込み動作を確認している。

(8) アクチュエータの微細化の効果を確認するために、フォトリソグラフィ技術を利用して、厚薄構造を有する 0.5mm 幅のリボン状フィルムを作製するとともに、このフィルムを用いたアクチュエータを試作し、その動作確認を行った。得られた発生力はほぼ理論値通りであり、大気中で 608V の電圧を加えた場合、1cm² 当たり 82.5g の発生力が得られたことを確認した。

(9) 本研究の成果を「2本のリボン状フィルムを用いた積層型静電アクチュエータの開発」のタイトルで博士論文（東京工業大学）にまとめた。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

① 奥田一雄, 掛川真一, 伊藤誠, 実吉敬二, シミュレーションに基づく積層型静電アクチュエータの特性改善, 第 16 回ロボティクスシンポジウム, 査読有, 2011, 487-492

〔学会発表〕（計 5 件）

① 奥田一雄, 実吉敬二, シミュレーションに基づく積層型静電アクチュエータの特性改善, 第 16 回ロボティクスシンポジウム, 2011 年 3 月 15 日, 指宿シーサイドホテル（鹿児島）

② 掛川真一, 伊藤誠, 奥田一雄, 実吉敬二, 積層型静電アクチュエータ用リボンの製作, ロボット学会, 2010 年 9 月 23 日, 名古屋工業大学（愛知）

③ 伊藤誠, 掛川真一, 奥田一雄, 実吉敬二, 積層型静電アクチュエータの自動折込機の開発, ロボット学会, 2010 年 9 月 23 日, 名古屋工業大学（愛知）

④ 藤川健一, 実吉敬二, 積層型静電アクチュエータ用電極リボンの製作, 静電気学会, 2008 年 9 月 18 日, 大分大学（大分）

⑤ Kazuo Okuda, Keiji Saneyoshi, Simulation of Relation between Electrode Thickness and Spring Characteristic of a New Stacked-type Electrostatic Actuator, ICEM2008 (International Conference on Electrical Machines), 2008. 9. 9, Vilamoura-Algarve (Portugal)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥田 一雄 (OKUDA KAZUO)
鈴鹿工業高等専門学校・電気電子工学科・
准教授
研究者番号：002140457

(2) 研究分担者

実吉 敬二 (SANEYOSHI KEIJI)
東京工業大学・バイオ研究基盤支援総合セ
ンターアイソトープ分野・准教授
研究者番号：80143650