

機関番号：32612

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760202

研究課題名（和文） 変位増幅型マイクロアクチュエータの開発研究

研究課題名（英文） Micro actuators with displacement amplification mechanisms

研究代表者

三木 則尚（MIKI NORIHISA）

慶應義塾大学・理工学部・専任講師

研究者番号：70383982

研究成果の概要（和文）：皮膚を機械的に変形、皮膚内部に分布する触覚受容器群を時空間的に刺激し、触覚情報を人に提示する触覚ディスプレイや、大容量のマイクロバルブの実現には、大変位マイクロアクチュエータの開発が不可欠である。本研究では特に、MEMS 技術を用い、上下面で断面積の異なるマイクロチャンバ内に非圧縮性流体を封入した変位増幅機構を有する、変位増幅型マイクロアクチュエータを実現し、特性評価を行った。

研究成果の概要（英文）：Development of large-displacement micro actuators is mandatory for tactile displays that deforms finger skins, stimulates tactile receptors, and deliver tactile information and micro valves controlling large mass flows. We have developed and characterized large-displacement MEMS actuators with hydraulic amplification mechanism that encapsulates incompressible fluid in a micro chamber whose input and output surfaces have different cross-sectional areas.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロマシン、ユーザーインターフェース、知能機械、バーチャルリアリティ、マルチモーダルインターフェース

1. 研究開始当初の背景

ヒトが機械を操作する時の双方向制御、仮想空間内で再構築された物体情報のヒトへの直感的な提示、音声、画像に続く新たな情報通信メディアとして、触覚情報の利用が強く期待されている。触覚は点字のような凹凸から、「ざらざら」「つるつる」などの手触り、柔らかさの分布など、多くの情報を伝えるが、全て触覚受容器が検出する時間的、空間的な情報を元に再構成されている。逆にその情報

を触覚受容器が検出するように、マイクロアクチュエータアレイを用いて皮膚を刺激することで、触覚情報の伝達が可能である。

触覚受容器は、マイスナー小体、メルケル小体、パチニ小体、ルフィニ小体の4つが知られており、それぞれ時間的、空間的周波数帯域を分担して検出している。マイスナー小体とパチニ小体は応答が速く FA (Fast Adapting) と呼ばれ、速度および加速度を検出している。一方でメルケル小体、ルフィニ

小体は応答が遅く SA (Slow Adapting) と呼ばれ、変位を検出している。それぞれの触覚受容器には、周波数ごとに検出できる最小変位 (振動検出閾値) が存在する。すなわち、高機能な触覚ディスプレイを実現するためには、マイクロアクチュエータアレイが、適切な時空間周波数で、振動検出閾値を越える変位を皮膚に与えなくてはならない。そのため微小なアクチュエータを、高密度にアレイ状に配置しなければならない。これまでにさまざまな触覚ディスプレイが開発されてきたが、SA および FA の両方を刺激できるものは実現されてこなかった。これは低周波から高周波まで、振動検出閾値を越える変位を与えられるマイクロアクチュエータアレイが、小型化による発生変位量不足、密配置の困難さから開発されていないためである。

MEMS 技術は、微細化および一括製作によるアレイ化に適している。そこで MEMS 技術により製作されたアクチュエータアレイを用いた触覚ディスプレイの実現が強く期待されるが、実現されていなかった。その理由は上述したように、触覚受容器を刺激するために必要な変位が $100 \mu\text{m}$ と大きく、このような大変位 MEMS アクチュエータの実現が困難であったためである。また触覚ディスプレイに限らず、大容量マイクロバルブなど、大変位 MEMS アクチュエータの開発が強く求められている。

2. 研究の目的

本研究では、触覚ディスプレイなどに適用可能な大変位 MEMS アクチュエータとして、入力および出力面で断面積の異なるマイクロチャンバ内に非圧縮性流体を封入した変位増幅機構を有する、変位増幅型マイクロアクチュエータを実現することを目的とする。入力面の断面積が、出力面の断面積と比べて大きい場合、入力面に与えられた変位が、断面積の比に応じて出力面において増幅される。製作には MEMS 技術を用い、微細化、アレイ化を目指す。本研究で実現を目指す変位増幅型マイクロアクチュエータは、封入液体を利用する新しいコンセプトの MEMS であり、その機構、また製作プロセスは、新規 MEMS デバイスのシーズとなると考えられる。また、触覚ディスプレイに必要な大変位を実現することで、高機能な触覚ディスプレイが初めて実現でき、触覚利用研究のプラットフォームとなる。また触覚ディスプレイが伝えるべき触覚情報を検出するための触覚センサの開発を平行して行う。

3. 研究の方法

本研究では触覚ディスプレイに適用可能な、液体封入部を有する変位増幅型マイクロアクチュエータを実現するために、具体的に

以下の4つを明らかにする。

- (1) マイクロチャンバ内への液体封入技術：液体を均一に、気泡の混入なく封入するために、液中で接合を行う。接合層材料、接合面に液体が残留しないための表面処理、封入液体による接合強度の変化、液中での自己組立的アライメント技術に関する研究を行う。
- (2) 非圧縮性流体を封入した変位増幅機構の特性：変位増幅機構は、図1に示すように、非圧縮性流体を大変形可能なポリマ薄膜で封止した構造になっている。入力の変位および周波数に対する応答を理論的・実験的に導出し、その特性およびマイクロ化に伴うスケール効果を明らかにする。
- (3) 変位増幅機構を有する変位増幅型マイクロアクチュエータのダイナミクス：変位増幅機構と圧電素子を組み合わせ、大変位、高応答を実現する変位増幅型マイクロアクチュエータを実現する。変位増幅機構と圧電素子間における力および変位伝達の周波数特性を評価し、ダイナミクスを明らかにする。
- (4) 触覚センサ：ヒトは指紋構造により触覚情報を感度良く検出していることが知られている。ヒト指紋構造を模したマイクロポリマ構造を用い、触覚センサの高感度化を図る。

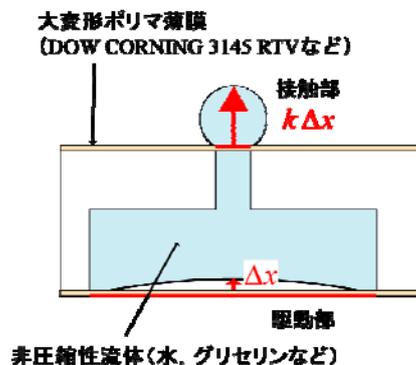


図1 液体封入型変位増幅機構

4. 研究成果

まず、液体封入プロセスとして、液中にて接合を行う Bonding-in-Liquid Technique (BiLT) を開発し、その接合強度およびアライメント精度について評価を行った。BiLT においては、紫外線硬化樹脂を接着剤に、封入液体中でアライメント、コンタクトし、紫外線照射により接合する。接合強度評価実験の結果、純水、グリセリン、PBS 溶液を封入した時は、図2に示すように、空気中での接合同等の接合強度が実現できること、および有機溶媒は封入に適さないことが明らかになった。また液中でのアライメントには、凹

凸構造のパッシブなアライメントを用いたが、凹凸構造の数、形状を改良することにより $6\ \mu\text{m}$ の精度を実現した。以上の結果を国際論文誌 *Journal of Micromechanics and Microengineering* において発表するとともに、複数の国際学会、国内学会において発表した。

開発したプロセスを用い、変位増幅機構を製作し、その特性評価を行った。まず駆動しているうちに上部の大変形ポリマ薄膜が剥離していたデザインを、図3のように大変形ポリマ薄膜をチタン薄板で抑え込む形に変更した。これにより上部断面積はチタン薄膜により決定される。変位増幅機構デザインを、FEM シミュレーションおよび実験結果に基

ができることが明らかになった。これは従来点字ディスプレイが用いていた SA タイプの触覚受容器だけでなく、FA タイプの触覚受容器を利用することができたためであると考えられる。この結果を、国際学会 MEMS をはじめとする複数の国際学会ならびに国内学会で発表した。

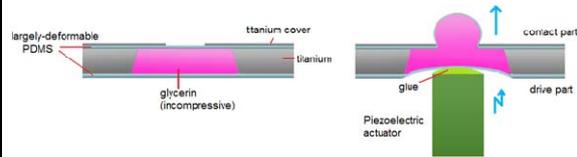


図3 変位増幅機構のデザイン改良

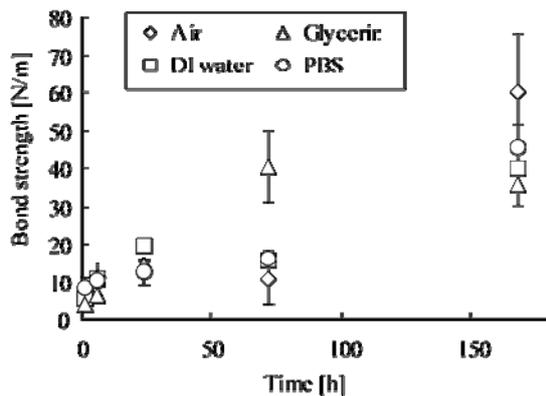


図2 液体封入プロセスの接合強度

づいて最適化した。変位の増幅度は上下面の断面積の違いにより決定されるが、上部断面積を小さくしすぎると、大変形 PDMS 薄膜が過度に圧縮され、変位としては増幅されないことが明らかになった。図4に示すように、上部断面積およびポリマ薄膜の厚さにより、増幅度が大きく異なることがわかった。膜厚 $90\ \mu\text{m}$ 、上部断面直径 $480\ \mu\text{m}$ 、下部断面直径 $2.2\ \text{mm}$ のときに、最大で静的な増幅度 18 倍を実現した。また、変位増幅機構は、封入液体を質量とするバネマスダンパ系と考えることができ、図5に示すように、共振周波数を有すること、またその共振周波数が封入液体の体積で変化させることができることを明らかにした。この結果を国際論文誌 *Sensors and Actuators A* および *Sensors* において発表するとともに、複数の国際学会、国内学会において発表した。

また、変位増幅機構とアクチュエータを組み合わせた大変位 MEMS アクチュエータを作成し、点字伝達の基礎実験を行った。周波数を固定し、アクチュエータに与える電圧を徐々に増加し、被験者が感知できた点での電圧を記録した。より低電圧で被験者が感知できれば、効率の良い点字ディスプレイと言える。その結果、図6に示すように、振動による点字提示により、より効率よく情報の伝達

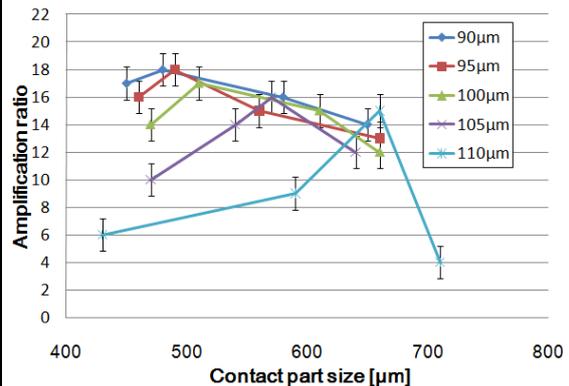


図4 上部断面積、ポリマ薄膜による増幅度の違い

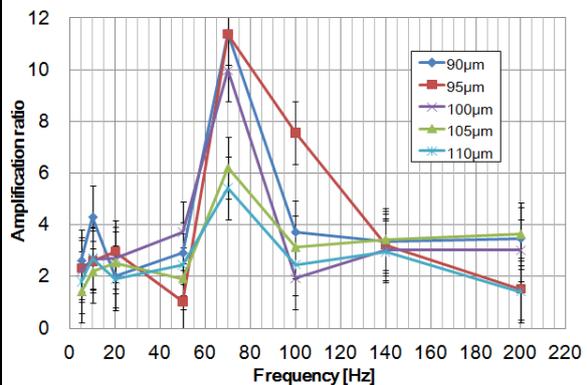


図5 変位増幅機構の動的特性

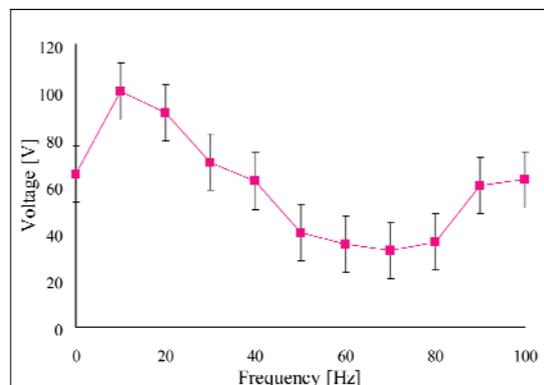


図6 振動型点字ディスプレイ性能

将来的な触覚ディスプレイの実現に向けて、開発した大変位 MEMS アクチュエータに与えるべき時空間振動を明らかにするため、触覚センサの開発を行った。特に、図 7 に示すようにヒトの指紋構造を模したポリマ構造を従来型の歪ゲージを用いた触覚センサの上部に配置することで、触覚センサ感度を向上できることを計算および実験から明らかにした。特に、垂直応力の検出およびせん断応力の検出それぞれについて、FEM シミュレーションにより、ポリジメチルシロキサンを材料として使い、指紋構造の幅を 400 μm に固定したとき、せん断力の検出には高さ 160 μm の指紋構造が、また垂直力の検出には高さ 110 μm の指紋構造が最適であることを明らかにしている。実験により検証した結果、指紋構造により、垂直力およびせん断力の検出において、それぞれ 1.8 倍、3.0 倍の感度増強を実現した。この結果を国際論文誌 *Journal of Micromechanics and Microengineering* で発表するとともに、複数の国際学会、国内学会で発表した。

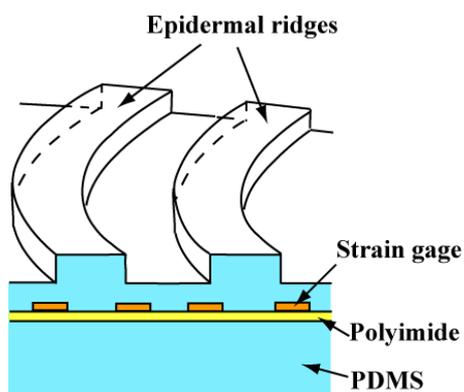


図 7 ヒト指紋構造を模したポリマ構造を有する触覚センサ

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 5 件)

- ① T. Ninomiya, Y. Okayama, Y. Matsumoto, X. Arouette, K. Osawa, and N. Miki, “MEMS-based Hydraulic Displacement Amplification Mechanism with Completely Encapsulated Liquid” *Sensors and Actuators A: Physical*, 査読有, 166, pp. 277-282, 2011.
- ② Y. Okayama, K. Nakahara, A. Xavier, T. Ninomiya, Y. Matsumoto, Y. Orimo, A. Hotta, M. Omiya, and N. Miki, “Characterization of a Bonding-in-Liquid Technique for Liquid Encapsulation into MEMS Devices” *Journal of*

Micromechanics and Microengineering, 査読有, 20, 095018 (6 pp), 2010.

- ③ X. Arouette, Y. Matsumoto, T. Ninomiya, Y. Okayama and N. Miki, “Dynamic Characteristics of a Hydraulic Amplification Mechanism for Large Displacement Actuators Systems” *Sensors*, 査読有, 10, pp. 2946-2956, 2010.

[学会発表] (計 19 件)

- ① Y. Hotta, Y. Zhang, and N. Miki, “Flexible Distributed Capacitive Sensor with Encapsulated Ferroelectric Liquid” IEEE MEMS2011, 2011 年 1 月 25 日, Cancun, Mexico.
- ② X. Arouette, Y. Matsumoto, T. Ninomiya, Y. Okayama, and N. Miki, “Dynamic Response of Hydraulic Displacement Amplification Mechanism Applicable to Braille Code Display” The 5th Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro-Nano Technology (APCOT) 2010, 2010 年 7 月 9 日, Perth, Australia.
- ③ Y. Matsumoto, X. Arouette, T. Ninomiya, Y. Okayama, and N. Miki, “Vibrational Braille Code Display with MEMS-Based Hydraulic Displacement Amplification Mechanism” IEEE MEMS2010, 2010 年 1 月 25 日, Hong Kong, China.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.miki.mech.keio.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三木 則尚 (MIKI NORIHISA)
慶應義塾大学・理工学部・専任講師
研究者番号：70383982

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし