

平成 21 年 6 月 18 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360109
 研究課題名 (和文) 力触覚提示に適した電磁-圧電・ハイブリッドアクチュエータシステムの開発
 研究課題名 (英文) Development of Electromagnetic-Piezoelectric Hybrid Actuator system for Force-Feedback Interface
 研究代表者
 青柳 学 (AOYAGI MANABU)
 室蘭工業大学・工学部・准教授
 研究者番号：80231786

研究成果の概要：高速応答に優れる超音波モータを用いて、電磁モータによる提示が容易でない、リアルな「硬さ」、「粗さ」の感触の再現を行う力触覚デバイスを開発した。無感触を再現するため、ロータとステータ間の予圧力を電氣的に高速に変える機能を備えた超音波アクチュエータを実現した。無感触および「硬さ」、「粗さ」の感触の再現を試み、リアルな感触の提示が実現できた。しかし、「柔らかさ」の提示に課題を残し、更なる改良が必要である。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18 年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
19 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
20 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	9,400,000	2,820,000	12,220,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：機械力学・制御 バーチアルリアリティ 電気機器工学 メカトロニクス

1. 研究開始当初の背景

(1) メカトロニクスの高度化において、高速動作性、速度安定性、制御性等の要求が厳しくなっている。キーデバイスとなるモータの改良が進み、ダイレクト・ドライブ・モータなどの使用で制御性が向上している。しかし、電磁力を利用しているモータには依然として、応答特性、保持時に電力消費を伴うなどの問題点が存在する。

(2) 一方、超音波モータや圧電アクチュエータは低速時に高トルク、応答性に優れ、自己保持力があり保持電力消費が無いなど、一般

のモータには無い特性を持つ。しかし、摩擦駆動であるため、磨耗による耐久性や速度安定性などが一般モータより劣る。

(3) 力触覚デバイスはコンピュータ画面上に表示される仮想物体の感触を得ながら操作することができる。力触覚デバイスには、ユーザの動作と仮想物体の状態に対応した感触を再現することが要求される。コンピュータ画面上の仮想物体の感触を提示するため、力触覚デバイスは以下に示すように主に3つの状態に対応した感触を再現しなければならない。

- ① 空走状態：仮想物体に触れていなく、自由に動くことができ、何も感じない。
- ② 抗力発生状態：仮想物体に触れることで動きが止まり、抗力を感じる。
- ③ 反発力発生状態：仮想物体が元の形状に戻ろうとする弾性力を感じる。

また、これら3つの状態を組み合わせることで、仮想物体表面の粗い感触も再現することができる。

(4) 既存の力触覚デバイスは主に電磁モータ (EMM) を使用している。 EMM はこれら3つの状態を電気入力 of ON/OFF で再現することができる。また、EMM はトルクフリー状態を有し、トルク制御も簡便である。そのため、空走状態と反発力発生状態の制御が容易であり、主に柔らかい感触の再現に優れる。しかしながら、EMM は外力に対する応答があまり速くないため、仮想物体の硬い感触や粗い感触の表現は困難である。もし、応答を速くするためにシステムのゲインを増加させたならば、フィードバックシステムは不安定になる。さらに、EMM は位置を保持するために大きな電力を消費する。

(5) 一方、超音波モータ (USM) は振動子とロータやスライダ間の摩擦力によって駆動するため、高速応答である。さらに、USM は位置を保持するために大きな電力を消費しない。そのため、USM は仮想物体のリアルな硬い感触や粗い感触の再現に効果的であると考えられる。しかし、通常の USM は常に振動子がロータやスライダに予圧され、ブレーキトルクが発生しているため、空走状態を再現できない問題点がある。一般的に、USM の動作中に予圧を任意に変化させることは困難であり、研究例も少ない。

2. 研究の目的

(1) 理想的な感触が提示できる力触覚デバイスの実現のために、電磁モータ、超音波モータ、圧電アクチュエータの互いの短所を補い、長所を組み合わせた新しい高機能アクチュエーション・システムを開発する。つまり、立ち上がり時の高速応答と大きなトルクが要求される場合は、電磁サーボ・モータ (EMM) + 超音波モータ (USM)、高速回転時、速度・負荷変動の少ない場合は EMM の単独駆動、停止・保持時は USM をブレーキとして使用する。

(2) 幾つかのアクチュエータの組み合わせの中でも、最も簡便で効果的な構成から検討する。つまり、電氣的に予圧力を変化できるクラッチ機能を有する超音波アクチュエータを提案する。ブレーキ状態、USM 動作状態の他に、クラッチ機能を持たせることでトルクフリー状態が実現でき、空走、抗力発生、反

発力発生 of 3つの状態が再現できる。

つまり、クラッチ機能を有する超音波アクチュエータで、リアルな硬い感触や粗い感触を再現できる力触覚デバイス開発する。

3. 研究の方法

(1) 図 1(a) および 1(b) に試作した圧電クラッチ (piezo-clutch) を有する超音波アクチュエータを用いた力触覚デバイスの構造とその写真をそれぞれ示す。このアクチュエータは推力を発生する超音波モータ (USM) 部と予圧を制御するクラッチ部から構成されている。このクラッチは高速応答性に優れている積層圧電アクチュエータ (MPA) と変位拡大機構から構成される。USM 部のステータはロータの側面に予圧されており、摩擦力によってロータを回転する。

(2) 回転軸の外側に振動子が置かれているこの構成は進行波タイプなど、振動子の中心に回転軸がある USM に比べて予圧を変化させることが比較的容易な構造である。図 1(b) に示されているステージによって初期予圧を調整することができる。ロータのシャフトにはロータリエンコーダとひずみゲージが取り付けられており、それらからロータの回転速度とトルクを計測することができる。また、ロータのシャフトに取り付けられたレバーによって、ユーザは一軸回転上の仮想物体の感触を簡単に得ることができる。

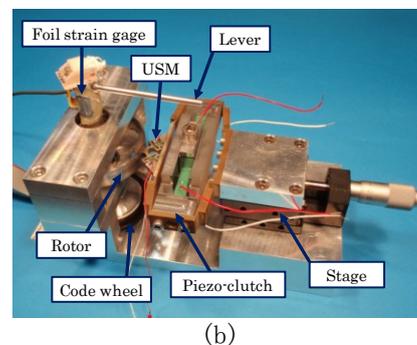
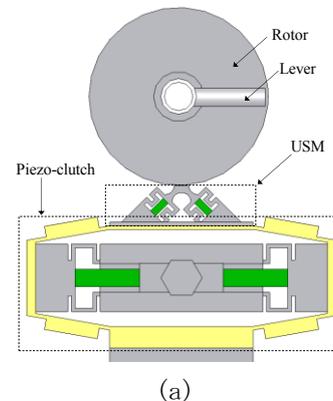


図 1 力触覚デバイス用超音波アクチュエータ

(3) 図 2 に示すように、圧電クラッチの上に配置されている USM のステータは二つの MPA とホルダーとその先端部から構成されている。二つの MPA がホルダーの中で互いに直交するように配置されている。互いに 90 度位相の異なる電圧を印加することで、先端部に楕円変位を発生させることができる。

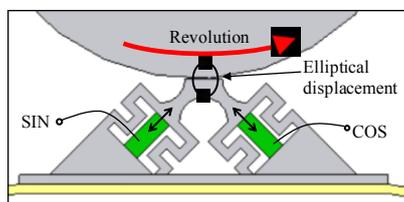


図 2 V字型超音波モータ

(4) 図 3(a) および 3(b) に圧電クラッチの動作原理を示す。2つの MPA と変位拡大機構と金属治具から圧電クラッチは構成されている。同図(a)に示されるように、通常 USM 部の先端はロータに予圧され、クラッチが ON となっている。この状態では、このデバイスは二つの状態の感触を再現することができる。USM 部が駆動していない時には、USM 部とロータ間に発生するブレーキトルクによって抗力発生状態の感触を再現できる。USM 部が駆動していてトルクが発生している時には反発力発生状態の感触を再現できる。

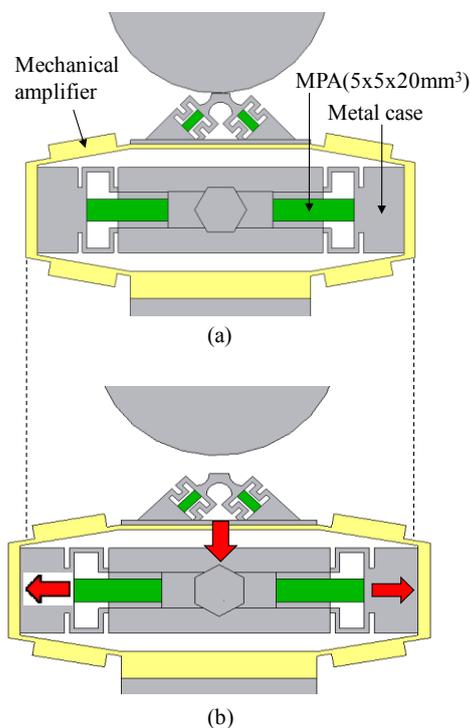


図 3 圧電クラッチの構造

直流電圧 (クラッチ電圧, V_{Clutch}) を印加することで MPA が伸び、変位拡大機構の両サイド

を押し上げ、USM 部の先端が下方方向に動き、同図 (b) に示すようにロータから離れるため、クラッチが分離状態となる。この状態では、このデバイスは USM 部とロータ間の摩擦力がまったく無くなるため空走状態の感触を再現することができる。MPA は高速応答特性を有しているため圧電クラッチは高速に動作し、電氣的に予圧力を制御することができる。

4. 研究成果

(1) 静的クラッチ機能内蔵超音波モータによる予圧制御の検討

① USM 部の先端を 15.7N でロータに予圧し、USM 部に正弦波電圧 ($V_{USM}=48V_{p-p}$, 31.0kHz) を印加して USM を駆動した。さらに圧電クラッチ部に 150V, 1Hz の矩形波を印加して、クラッチ動作させた。クラッチ動作を伴ったロータの回転速度を図 4 に示す。クラッチ電圧が印加され、クラッチが OFF のときはロータが回転していない。これは USM 部の先端がロータから分離するためである。回転軸のボールベアリングによる機械的損失が大きいため、クラッチ電圧が印加されるとすぐにロータは停止した。一方、クラッチ電圧が 0V に戻り、クラッチが ON になるとすぐにロータはまた回転し始めた。この結果より、このアクチュエータは駆動状態とトルクフリー状態が高速に切り替わるクラッチ機能を有した超音波アクチュエータとして動作していることが確認できた。

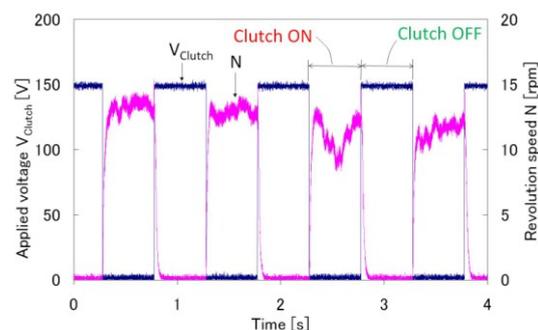


図 4 圧電クラッチ動作を伴った回転速度

② USM 部の先端とロータ間に 15.7N の初期予圧を与え、USM 電圧 (31.0kHz) の大きさを变化させたときのトルクを図 5 に示す。トルクは $V_{USM}=38V_{p-p}$ から線形的に増加し始めた。この結果より、USM 部の印加電圧の大きさを変えることで USM の発生トルクを制御できることを確認した。

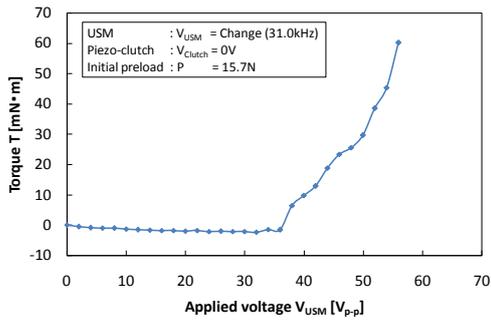


図 5 USM の印加電圧と発生トルク特性

③ USM 部の先端とロータ間に 24.5N 初期予圧を与え、USM 部に $V_{USM}=44V_{p-p}$, 31.0kHz の正弦波電圧を印加して USM を駆動した。クラッチ電圧の大きさを変化させたときのトルクを図 6 に示す。クラッチ電圧の大きさによって予圧力が変わるため、発生トルクも変化した。クラッチ電圧を増加すると、 $V_{Clutch}=40V$ までトルクは得られなかった。これは USM 部の先端とロータ間の予圧力が強すぎるためと考えられる。 $V_{Clutch}=40V$ からトルクは増加し、 $V_{Clutch}=86V$ でトルクが最大になり、その後 $V_{Clutch}=120V$ までトルクは減少した。 $V_{Clutch}>120V$ では予圧力が小さすぎるか USM 部の先端がロータから分離するためトルクは発生しなかった。この結果より、圧電クラッチ部の印加電圧を変えることで発生トルクを制御できることを確認した。

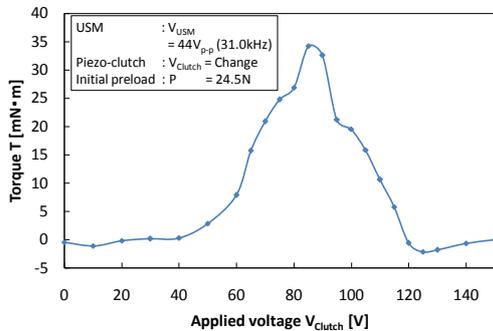


図 6 圧電クラッチへの印加電圧と発生トルク特性

④ USM 部を駆動せずに、USM 部の先端とロータ間に 26.7N の初期予圧を与えた。そして、レバーを手動で動かし、ロータが回転するまでの最大静止トルクを測定した。クラッチ電圧の大きさを変化させたときの最大静止トルクを図 7 に示す。最大で $70mN\cdot m$ の最大静止トルクが発生し、クラッチ電圧に対して直線的に減少した。この結果より、圧電クラッチ部に印加する電圧の大きさを変えることで最大静止トルクを制御できることを確認した。

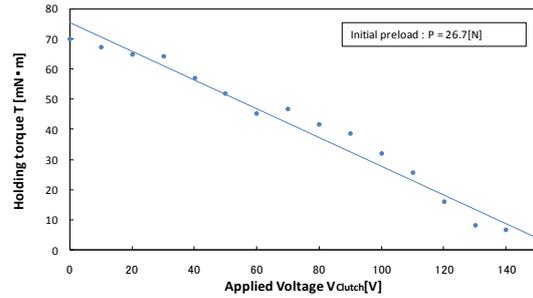


図 7 圧電クラッチへの印加電圧と保持トルク特性

⑤ 超音波モータの予圧を電氣的に制御することでロータへの回転力伝達の制御が可能になり、力触覚提示に必要な 3 つの状態（トルクフリー状態、ブレーキ（反力）状態、反発力発生状態）を実現した。

(2) 予圧の PID 制御と力触覚提示への応用

① ユーザは力触覚デバイスのレバーを操作することで仮想物体の感触を得ることができる。シャフトに取り付けたロータリエンコーダから出力された 2 相のパルスが、端子台を通して PC 内の DAQ ボードに入力される。また、シャフトに貼り付けたひずみゲージをブリッジボックスに接続し、動ひずみ測定器によりシャフトのひずみを検出して DAQ ボードに入力される。PC 上でプログラム (MATLAB/Simulink) によってロータリエンコーダの出力からレバーの角度と回転速度を求め、ひずみゲージの出力から反力を求める。それらの値をもとに決定されたクラッチ電圧を DAQ ボードから出力する。それを高出力増幅器で増幅し、圧電クラッチ部の MPA に印加することで USM 部の先端とロータ間の予圧を制御する。また、ファンクションジェネレータの出力を制御し、電力増幅器を介して USM 部の 2 つの MPA にそれぞれ印加することで USM の推力を制御する。さらに、図 8 に示すようにプログラムによってディスプレイ上に仮想物体を表示し、レバーの動きと仮想物体の動きを連動させている。このシステムを用いて、力触覚デバイスの制御実験および感触の再現実験を行った。

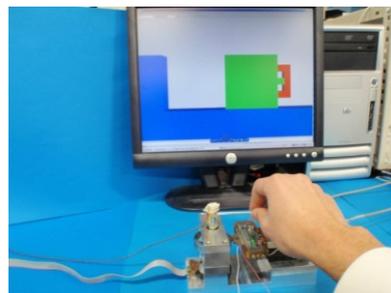
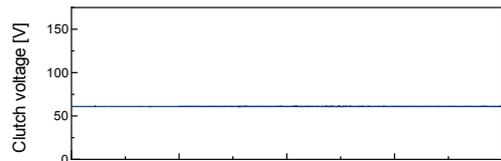
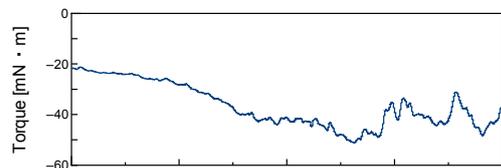


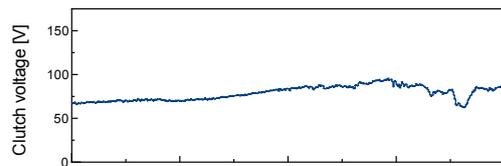
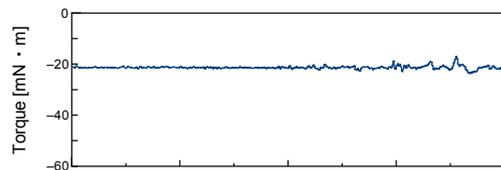
図 8 力触覚デバイスの操作の様子

② 予圧制御による回転制御圧電クラッチ部のMPAに150Vの電圧を印加したときに、レバーの角度が0degの位置でUSM部の先端とロータ間の距離を40 μm に調整した。そして、USM部を駆動せずに圧電クラッチ部のMPAに60V一定の電圧を印加した状態で、レバーを動かしたときの動摩擦トルクを測定した。そのときのトルク、クラッチ電圧、レバーの角度、回転速度の測定結果を図9(a)に示す。ロータの真円度が悪く、USM部の先端と接触するロータの場所によって摩擦むらが発生するため動摩擦トルクは安定しなかった。

MATLAB/SimulinkによるPID制御を用いてクラッチ電圧を変化させることで、動摩擦トルクを一定(-20mN \cdot m)に制御した。そのときの測定結果を図9(b)に示す。この測定結果より、PID制御によって動摩擦トルクを一定に維持できることが確認できた。



(a) PID制御なし



(b) PID制御あり

図9 ブレーキトルクの予圧制御の測定結果

③ 触覚提示を行った一例を報告する。図10に示すような壁を仮想物体として設定し、力触覚提示システムを用いて壁に触れたときの触覚を再現した。レバーを操作して壁に触れたときの、反力、クラッチ電圧、レバーの角度、回転速度の測定結果を図11に示す。壁に触れている時(B区間)では外力に応じて壁からの抗力を感じることができる。なお、この触覚の再現にはUSMによるトルクは発生していない。また、レバーの停止位置の誤差の低減のために、ロータの回転速度を監視し、

目標停止位置に到達する前にブレーキをかけるように制御することで停止位置の誤差を $\pm 0.1\text{deg}$ 以内に抑えた。

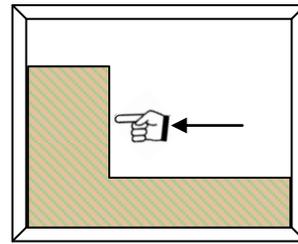


図10 ディスプレイ上の仮想物体(壁)

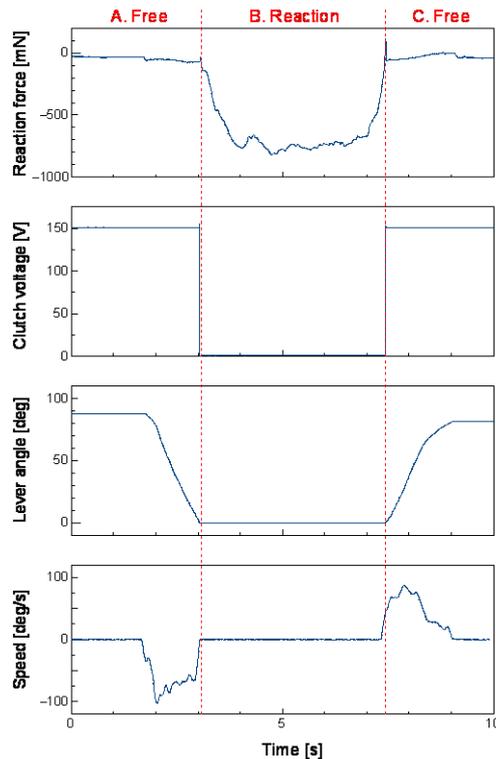


図11 反力、クラッチ電圧、レバーの角度、回転速度の測定結果

(3)まとめ

ロータとステータの圧接点、動摩擦力および回転速度はMPAによる電氣的予圧調整により一定値にPID制御可能であった。更に、本力触覚提示システムを用いて、様々な触覚の提示モデルを作成し、被験者からの感想を基に本システムの力触覚提示能力を試験した。その結果、硬い触覚や粗い触覚などをリアルに再現できることがわかった。しかし、柔らかい触覚の再現に問題があり、本システムの改良が必要であることがわかった。超音波モータが摩擦駆動であり、応答が速過ぎるためと思われる。弾性的な反発力の提示については電磁モータが適していると思われる。電磁・圧電モータのハイブリット化が最も有効であると思われる。

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2件)

- ① T. Takemura, M. Aoyagi, T. Takano, H. Tamura and Y. Tomikawa, Hybrid Ultrasonic Actuator for Force-Feedback Interface, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47, No. 5, (2008), pp. 4265-4270. 査読あり
- ② T. Takemura, M. Aoyagi, T. Takano, H. Tamura and Y. Tomikawa: An Ultrasonic Actuator with Electrical Preload Control Function for Force-Feedback Interface, Interactive Conference Proceedings of International Conference and Exhibition on New Actuators and Driving Systems, (2008) pp. 969-972. 査読なし

[学会発表] (計9件)

- ① 青柳学, 秋庭啓次郎, 武村剛志, 高野剛浩, 田村英樹, 富川義朗: 超音波アクチュエータの予圧制御と力覚提示への応用, 第21回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, pp. 445-450, 2009年5月, 長野市.
- ② 武村剛志, 秋庭啓次郎, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹, 富川義朗: クラッチ機能を備えた超音波アクチュエータ(第4報) — 力覚提示への応用の試み —, 2009年度精密工学会春季大会講演論文集, No. I06, pp. 613-614, 2009年3月, 中央大学.
- ③ 青柳学, 秋庭啓次郎, 武村剛志, 高野剛浩, 田村英樹, 富川義朗: クラッチ機能を備えた超音波アクチュエータ(第3報) — 予圧制御と負荷特性 —, 2008年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 939-940, 2008年9月, 東北大学.
- ④ 青柳学, 武村剛志, 秋庭啓次郎, 高野剛浩, 田村英樹, 富川義朗: 超音波アクチュエータの予圧制御の実験的検討, 信学会技術研究報告, US2008-39, pp. 41-45, 2008年9月, 東北大学.
- ⑤ 秋庭啓次郎, 武村剛志, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹, 富川義朗: クラッチ機能を備えた超音波アクチュエータ, 一構成条件と動作特性 —, 2008年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp. 89-90, 2008年9月, 旭川高専.
- ⑥ 武村剛志, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹, 富川義朗: クラッチ機能を備えた超音波アクチュエータ(第2報), 一構成と動作特性 —, 2008年度精密工学会春季大会講

演論文集, pp. 111-112, 2008年3月, 明治大学(川崎市).

- ⑦ T. Takemura, M. Aoyagi, T. Takano, H. Tamura and Y. Tomikawa, Hybrid ultrasonic actuator for force-feedback interface, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 28, (2007), pp. 441-442, 2007年11月, つくば市.
- ⑧ 武村剛志, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹, 富川義朗: 予圧制御と推力発生に異なる2種類のアクチュエータを用いる構成の試み — 力覚インターフェース用アクチュエータ(第2報) —, 2007年日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 1151-1152, 2007年9月, 山梨大学.
- ⑨ 武村剛志, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹, 富川義朗: クラッチ機能を備えた超音波アクチュエータの構成, 2007年度精密工学会秋季大会講演論文集, (2007), pp. 759-760, 2007年9月, 旭川市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青柳 学 (AOYAGI MANABU)
室蘭工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 80231786

(2) 研究分担者

富川義朗 (TOMIKAWA YOSHIRO)
山形大学・工学部・客員教授
研究者番号: 80007004
広瀬精二 (HIROSE SEIJI)
山形大学・工学部・教授
研究者番号: 70007201
高野剛浩 (TAKANO TAKEHIRO)
東北工業大学・工学部・教授
研究者番号: 50085411
田村英樹 (TAMURA HIDEKI)
山形大学・工学部・助教
研究者番号: 90396581

(3) 研究協力者

武村剛志 (TAKEMURA TSUYOSHI)
室蘭工業大学・大学院・大学院生