

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 11日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360106

研究課題名（和文）ハプティックインターフェース用電磁・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 haptic interface

研究代表者

青柳 学（AOYAGI MANABU）

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80231786

研究成果の概要（和文）：異なる特性を有するアクチュエータである，圧電ブレーキ(PB)と超音波モータ(USM)および電磁モータ(EMM)のハイブリッド化により，リアルで幅広い力覚提示に成功した。PC 内の仮想モデルを製作し，アクチュエータの組合せや制御方法を検討した。抗力，粗さは PB のみの摩擦力制御により十分に提示できた。EMM は弾性力，USM は撃力や急加速を伴う反発力の提示に適していた。さらにインターフェースを 2 自由度に拡張し，平面内動作を可能にした。被験者からの評価は良好であり，研究の目的はほぼ達成できた。

研究成果の概要（英文）：A hybrid system using piezoelectric brake (PB), ultrasonic motor(USM) and electromagnetic motor(EMM), which have different characteristics, successfully achieved to represent the realistic feeling with wide ranges of force. The combination and control method of the actuators were examined by virtual models produced in personal computer. The feelings of reaction and roughness were able to be represented enough with friction control by using only PB. The EMM and USM were suitable to represent an elastic force and repulsive force, respectively, which needed sudden acceleration. Moreover, the hybrid system extended to two-degree-of-freedom motion enabled a two-dimensional operation. The testers' evaluation of the hybrid system was high. Hence, the objective of this study was almost achieved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2011年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

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

1. 研究開始当初の背景

(1) 力覚提示には大きく分けて次に示すような3つの状態がある。

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。高いレベルでリアルに提示するには高速で広い動作領域（力・速度）を持つアクチュエータ・システム(AS)が必要であり、メカトロニクスの高機能化・高度化が要求される。つまり、より理想に近い AS の実現が望まれる。

(2)既存の代表的なアクチュエータには次のような長所、短所が存在する。

①電磁モータ (EMM)： 既存の力覚デバイスに主に使用されている。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り、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容易でない。また、EMM は位置を保持するために大きな電力を消費する。

②超音波モータ (USM)： 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 は振動子がロータやスライダに常に予圧され、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。しかし、当研究グループの研究により、USM の動作中に予圧を電気的に変化させることに成功している。

③圧電クラッチ/ブレーキ： 既存のブレーキ、クラッチでは応答が遅く力覚提示には不適合である。当研究グループにより積層圧電アクチュエータを用いた高速特性を有する圧電ブレーキ/クラッチが開発されている。他のアクチュエータよりも高速に応答するため、高速な運動制御に用いることができる。また、過渡動作時以外に電力を消費しない圧電ブレーキは EMM との併用で、高速・省電力な制動デバイスとしての使用が期待される。

(3)圧電・超音波アクチュエータ/モータと電磁アクチュエータ/モータの組合せはボールねじを用いたリニアステージ上に圧電アクチュエータを搭載し、粗微動の高精度位置決めに応用されている例がある。しかし、高速応答性の向上や動作領域の拡大のためのハイブリッド化は他に検討されていない。先の研究において、USM と圧電クラッチを併用した構成をもつ、クラッチ内蔵超音波アクチュエータを考案し、高速応答が必要な粗さや硬さの提示を実現している。さらに、柔らかさの提示に優れる EMM の付加により、理想

的な力覚提示システムが望める。

2. 研究の目的

(1) EMM と USM は対称的な動作特性を有し、両者で広い動作領域を網羅する。さらに圧電アクチュエータを加えたハイブリッド化によって、互いの短所を補い、長所を組み合わせ、幅広い感触を提示できる高機能アクチュエーション・システム（力覚デバイス）を実現する。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ことが考えられる。

(2)本研究では当研究グループで既に実現できている圧電クラッチ/ブレーキと USM のハイブリッドシステムに EMM を加えた AS を開発する。3 種類のアクチュエータ要素を含んだことにより、各種の力覚に対応するアクチュエータの組合せと制御方法について検討する。また、システムの多自由度化を試み、より実用的なシステムへの検討を行う。

3. 研究の方法

(1)図 1 に試作したハイブリッドアクチュエータシステムを示す。この AS は推力を発生する USM 部と予圧を制御するクラッチ部、EMM 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。ロータの回転軸は EMM と連結されている。

(2)図 1 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、ロータの回転速度とトルクを計測する。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。

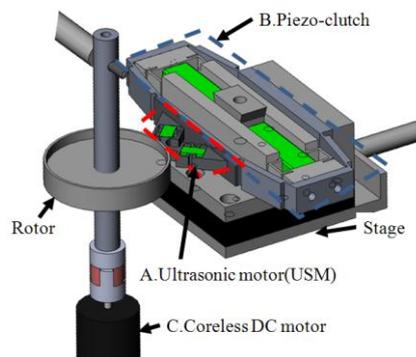


図 1 ハイブリッドアクチュエータシステム

(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。

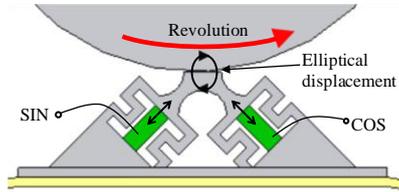


図2 V字型超音波モータ

(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部が非駆動時には、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提示できる。USM部が駆動時には発生トルクにより反発力を提示できる。

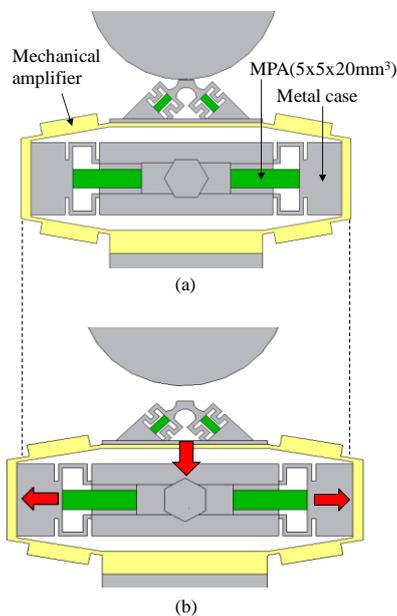


図3 圧電クラッチの構造

(5) 直流電圧（クラッチ電圧，VClutch）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広げ、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り、空走状態の感触を提示することができる。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。

表1に感触例と提示に用いるアクチュエータの組合せを示す。ばね（弾性力）に関しては複数の方法が考えられる。

表1 感触提示とアクチュエータの組合せ

感触	USM	EMM	ブレーキ
粗さ			○
慣性 + 摩擦力			○
ばね	○		(クラッチ)
		○	○

4. 研究成果

(1) 力覚提示実験

①粗さ（圧電ブレーキ(PB)による表現）

図4に示す5つの突起を仮想物体と設定し、突起上を指で撫でる力覚提示を行った。突起幅1[deg]、間隔を1[deg]に設定した。力覚提示中の諸量を図5に示す。

- ・A,C区間（トルクフリー状態）：クラッチ電圧を最大（150V）にすることで、USM先端がロータから離れ、レバーを自由に動かすことができる状態を提示した。

- ・B区間（粗さの再現）：突起の位置に合わせてクラッチ電圧を急激に変化させて撃力を発生して粗さを提示した。

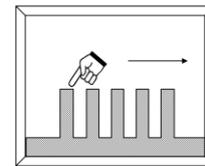


図4 突起（粗さ提示）

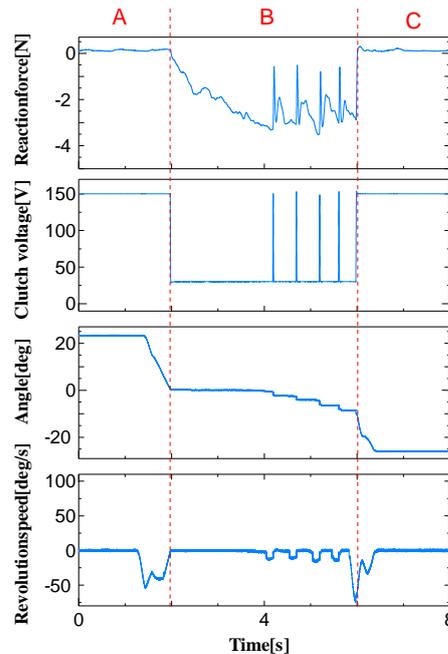


図5 反力，クラッチ電圧，レバーの角度，回転速度の測定結果（PBによる粗さ提示）

②ブロック移動

図6に示すように平坦な床に置いているブロックを仮想物体と設定し、このブロックを押して移動させたときの力覚提示を行った。力覚提示中の諸量の測定結果を図7に示す。ここでは圧電ブレーキのみを使用している。

- ・A, C 区間 (トルクフリー状態)
- ・B1, B3 区間 (静止摩擦状態)： ブロックの初期位置 (0deg) にレバーが来た時、または加わる力が閾値以下になったとき、ブレーキをかけることで静止摩擦状態を表現した。
- ・B2 区間 (動摩擦状態)： ユーザが加える力が設定した閾値を超えたときに、反力を一定に保つようにクラッチ電圧をPID制御して動摩擦状態を表現した。これにより、ブロックを押している時の感触を提示できた。

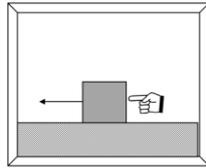


図6 ブロックの移動 (摩擦力提示)

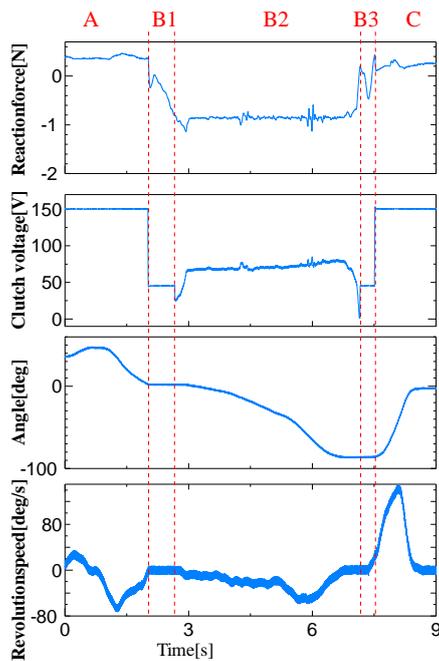


図7 反力, クラッチ電圧, レバーの角度, 回転速度の測定結果 (PBによる摩擦力提示)

③USM によるばね (弾性力) の提示

図8に示す有限長のばねを仮想物体として力覚提示を行った。図9にUSMと圧電クラッチを用いた場合の諸量の測定結果を示す。

- ・A, C 区間 (トルクフリー状態)
- ・B 区間 (弾性力再現)： レバーがばねの位置 (0deg) に来た時、反発力を感じる状態となる。反発力提示はUSMの印加電圧を一定とし、レバーの角度に対応してクラッチ電圧を変化させて反発力制御を行った。

USM によるばねの感触提示は、操作中にモデルとは無関係のロータとの摩擦感触やトルクの不安定さの問題があった。

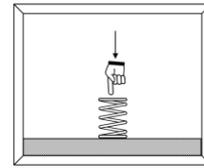


図8 ばね (弾性力提示)

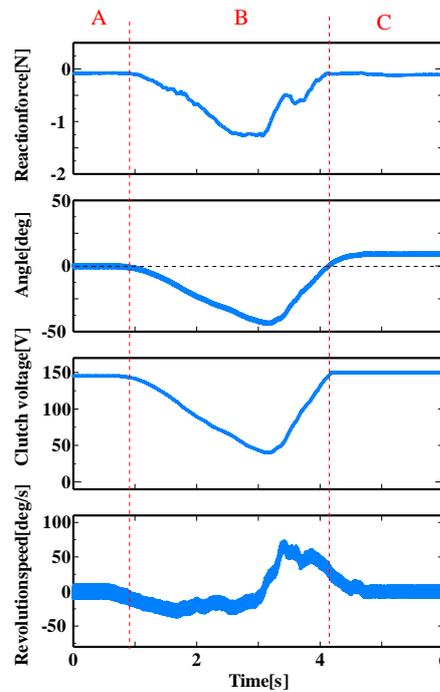


図9 反力, レバーの角度, クラッチ電圧, 回転速度の測定結果 (USMによる弾性力提示)

④EMM+圧電ブレーキによる提示

図10にEMMと圧電ブレーキを用いた場合の諸量の測定結果を示す。

- ・A, C 区間 (トルクフリー状態)
- ・B1, B3 区間 (弾性力提示)： レバーがばねのある位置 (0deg) に来た時、または、ユーザが加える力が閾値を下回るか、床から離れる方向にレバーを動かしたとき、ばねの反発力を感じる状態となる。EMMをレバーの角度に対応させPWM制御することで反発力を制御し、ばねの感触を提示した。
- ・B2 区間 (抗力発生状態)： レバーの位置が図9におけるばねの終端 (30deg) に来た時、ばねによる反発力状態から床からの抗力を感じる状態へと移行する。ばね終端に達した瞬間 EMMの印加電圧を0Vとし、クラッチ電圧を0Vとすることで、ブレーキをかけ、床に触れた状態を提示した。

EMMの最大トルク時にブレーキをかけることで、設定したモデルにより近い感触を提示することができた。

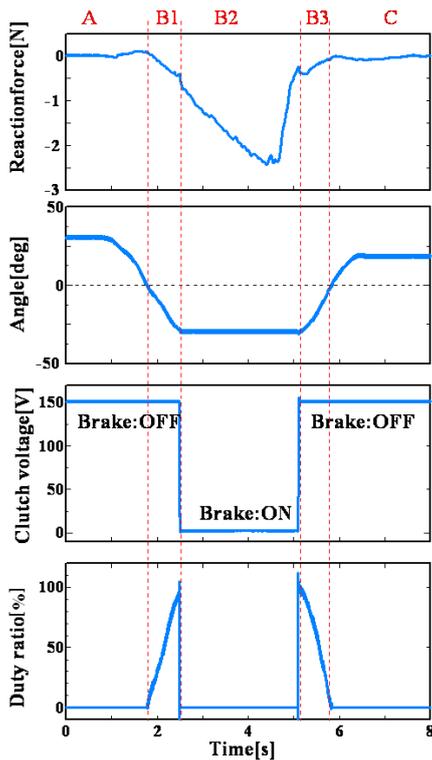


図10 反力, レバー角度, クラッチ電圧, Duty比の測定結果 (EMM+PBによる弾性力提示)

(2) アシスト駆動

①実験方法： 本システムで力覚提示を行う際に、USM、EMMを同時に駆動する状況が考えられるため、アシスト駆動時の回転速度応答特性を測定した。アシスト駆動の方法として、まず、EMM・USMを同時に駆動する。回転速度が設定値に達したときクラッチによりUSMを切り離し、以降はEMMのみで駆動した。

②実験結果： 一例としてUSMの切り離し回転速度を25[rpm]に設定した場合を図11に示す。EMMの単独駆動に比べて、USM併用の場合は、立ち上がり時間がおおよそ20%短縮した。EMMは立ち上がり時にUSMのアシストを受けて、ほぼUSMの特性で立ち上がった。したがって、アシスト駆動を用いて反発力を瞬時に変化させることが可能であると考えられる。

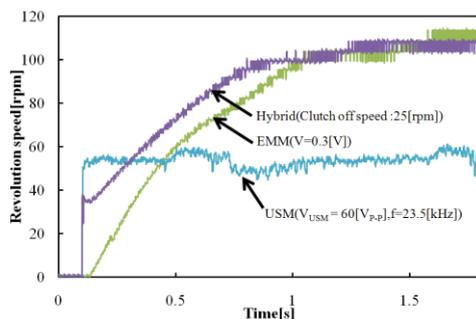


図11 回転速度の立ち上がり特性

(3) 力覚提示実験

視覚情報がない状態での力覚の識別およびディスプレイ上に仮想物体を表示した状態で、力覚を提示し、再現度の評価を行った。被験者は20歳代から30歳代までの男性11名である。

① 感触のみによる力覚識別

力覚をブロック移動→ばね→壁→突起の順番で提示した。壁モデルはPBにより単純に抗力を返す。ばねについては、USM+圧電クラッチによる提示の場合のみとした。

実験結果を図12に示す。全問正解は6人/11人中であった。項目別には突起が全員正解であり、他の3つの正解率も70%以上であった。突起とその他で正解率に違いが出た原因として、操作量過剰または不足により感触の誤認があったものと考えられる。また突起の正解率が高い要因として、突起への接触、分離を繰り返すイメージが他に比べて理解しやすいためだと考えられる。

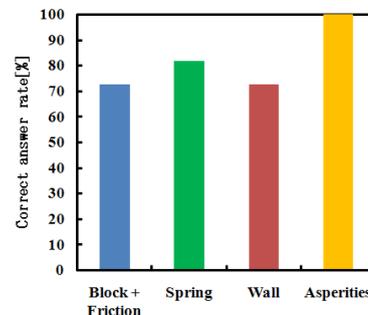


図12 力覚別の正答率

② 視覚情報を含めての再現度の評価

力覚に対応した画像をディスプレイに表示した状態で力覚提示し、その再現度を5段階(5:とてもよく再現できている~1:まったく再現されていない)で被験者による評価を行った。再現度評価の平均値を表2に示す。なお、ばねの提示は、USM、EMMの双方で提示した場合について評価した。評価の結果、いずれの感触についても4以上の高評価を得た。その中でも『壁』の感触が最も評価が高かった。突起の評価が正答率に対してそれほど高くなかった原因として、ブレーキ力を低めに設定していたため、ディスプレイから得られる情報と感触との不一致が考えられる。また、ばねの感触についてはUSMの評価が低かった。原因として、ロータとUSM先端の摩擦による不均一な感触が考えられる。

表2 力覚提示の再現度評価

壁	ブロック + 摩擦力	突起	ばね	
			USM	EMM
4.6	4.2	4.3	4.0	4.2

(3) 2自由度への拡張

ハイブリッドASを2組用いて、図13に示すような2自由度の力覚インターフェースに拡張した。操作範囲を図14に示す。実線と破線で囲まれた範囲内で操作可能であり、初期位置付近で最大半径40mmの円が描ける。今後、性能評価を行っていく。

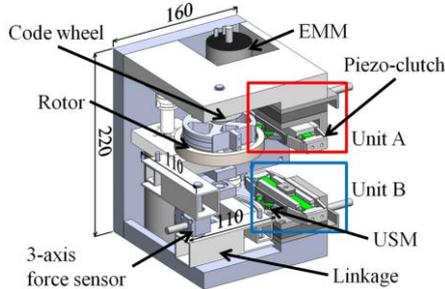


図13 ハイブリッドアクチュエータシステムを用いた2自由度力覚インターフェース

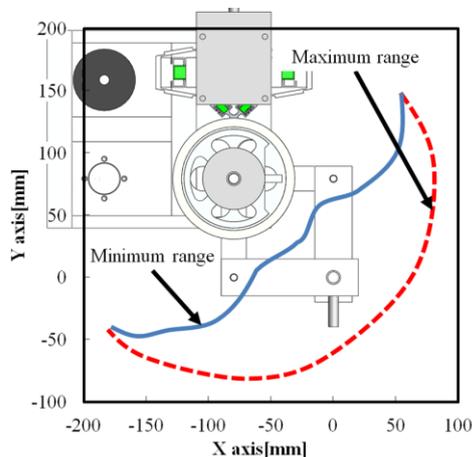


図14 操作範囲

(4) まとめ

電磁モータ、超音波モータおよび圧電クラッチ/ブレーキを組み合わせたハイブリッドアクチュエータシステムを試作し、力覚インターフェースに応用した。アクチュエータの組合せにより幅広い感触を再現性良く提示できることを示し、基礎的な部分においては研究の目的を達成した。また、EMMとUSMによるアシスト駆動は立ち上がり特性の改善に有効であり、メカトロニクスの高度化に寄与できる。また、ユニークな力覚を提示できる可能性がある。2自由度への拡張も可能であり、今後の研究により性能を明かにする予定である。

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)

[学会発表] (計5件)

- ① Ryota Okeya, Manabu Aoyagi, Takehiro Takano, Hideki Tamura, Development of electromagnetic and piezoelectric hybrid actuator system, Book of abstract of 9th International workshop on piezoelectric materials and applications in actuators, 2012年4月, 弘前市
- ② 桶谷涼太, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹, 電磁-圧電ハイブリッドアクチュエータシステムの研究(2), 第29回日本ロボット学会学術講演会, No. 3K1-3(2pages), 2011年9月, 芝浦工業大学
- ③ 桶谷涼太, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹, ハイブリッドアクチュエータシステムの開発とその応用, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 講演論文集, No. 1A2-F07(4pages), 2011年5月, 岡山大学
- ④ 桶谷涼太, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹, クラッチ機能を備えた超音波アクチュエータの構成(第5報)―電磁モータとのハイブリッド化の試み―, 2011年度精密工学会春季大会講演, No. M14, pp. 935-936, 2011年3月, 東洋大学
- ⑤ 桶谷涼太, 秋庭啓次郎, 青柳学, 高野剛浩, 田村英樹, 電磁-圧電ハイブリッドアクチュエータシステムの研究(1), 第28回日本ロボット学会学術講演会, No. 301-1, 2010年9月, 名古屋工業大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青柳 学 (AOYAGI MANABU)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 80231786

(2) 研究分担者

田村 英樹 (TAMURA HIDEKI)

東北工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 90396581

工藤 すばる (KUDO SUBARU)

石巻専修大学・工学部・教授
研究者番号: 20214968

広瀬 精二 (HIROSE SEIJI)

山形大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 70007201

(H23:連携研究者)

高野 剛浩 (TAKANO TAKEHIRO)

東北工業大学・工学部・教授
研究者番号: 50085411

(H22→H23:連携研究者)

(3) 研究協力者

桶谷 涼太 (OKEYA RYOTA)

室蘭工業大学・大学院・博士後期課程