

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02052

研究課題名（和文）光熱磁気駆動サーボアクチュエータを用いた完全ワイヤレスマイクロマニピュレータ

研究課題名（英文）Complete wireless micromanipulator using opto-thermomagnetical servoactuator

研究代表者

佐藤 海二（Sato, Kaiji）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：00215766

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：汎用性の高い高性能ワイヤレスマイクロマニピュレータを、感温磁性体を利用したワイヤレスアクチュエータで実現するために、把持、回転、平面運動を統合し（課題1）、感温磁性体を用いたワイヤレスアクチュエータをサーボアクチュエータとして長時間利用するための冷却装置を実現する（課題2）、ことに取り組んだ。その結果として、（課題1）については、2種類の方法の有望性を解析と試作装置を用いた実験により調べて提示し、（課題2）については、感温磁性体を用いたこれまでのワイヤレスアクチュエータ技術を活かす効果的な冷却装置を設計試作し、有効性を示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

感温磁性体とレーザー光を用いたワイヤレスアクチュエータは、材料の熱磁気特性を利用するため、本質的に単純な構造と微小化に適しワイヤレスで駆動できるというほかに類を見ない利点を持つ一方で、制御性が低く実用化のためには解決しなければならない未解明、未解決な課題がある。本研究課題では、そのための重要な課題に取り組み、まだ十分ではないが、その成果として有望な解決方法を提示しており、学術的意義が高く、社会的に有用な知見を提供している。

研究成果の概要（英文）：In order to realize a highly versatile high-performance wireless micromanipulator with a wireless actuator using a temperature-sensitive magnetic material (TSMM), it is necessary to integrate the grasping, rotation, and planar motion functions into one unit (Issue 1) and to realize a cooling device for wireless actuators that are used for a long time (Issue 2). For (Issue 1), the prospects of the two methods were investigated by magnetic analysis and experiments using a prototype device. For (Issue 2), the effective cooling system for wireless actuator technology using TSMM was designed, and fabricated and its usefulness was verified.

研究分野：機械工学

キーワード：感温磁性体 磁気 ワイヤレス マニピュレータ アクチュエータ 光熱磁気駆動 サーボ

1. 研究開始当初の背景

微小かつ高性能なデバイスは、情報ネットワーク・IoT 応用のための重要な基幹部品であり、現在進行中の社会の情報・デジタル化のために更なる機能・性能向上が強く求められている。そのためには、性質の異なる多様な材料からなる微小体を、自由に組み合わせ、立体構造にする高機能な装置が望まれる。また、再生医療や病気治療、センサ応用など、バイオエンジニアリング技術の利用範囲は大きく広がり、集合体としての特性だけでなく、単一細胞や生体分子の特性解明が求められている。微小体である細胞や生体分子を利用したセンサやアクチュエータは、発展が大きく期待されるデバイスであり、その研究開発・製作には、微小物である細胞や生体分子を選別し、個別に検査、把持・加工する等の多様な操作が必要となる。そしてその発展のために、性質の大きく異なる細胞・生体高分子と、マイクロ人工部品を同時かつ柔軟に操作できる新たな高機能マイクロマニピュレーション技術が強く望まれる。

これまでに、汎用性の高い機械式マニピュレータ、光透過性の微小物操作に適した光ピンセット、フェムト秒レーザーの衝撃力を利用する方法が提案・利用されている。しかし装置が大型である、対象物が限定される、対象にダメージを与えるなど、方式毎に異なる様々な課題があり、多様なマイクロ物を柔軟に操作できるマイクロマニピュレーション技術は実現されていない。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、次の5種類の特性をもつアクチュエータを実現し、汎用性の高い高性能マニピュレータの構成方法を明らかにすることである。

- 特性 動作の障害となる信号・電力を供給するワイヤが不要。
- 特性 構造が単純で、小型化容易。
- 特性 小型化しても操作に必要な十分な発生力が得られる(細胞操作では1mN以上)。
- 特性 把持、回転、平面運動が可能。
- 特性 サーボアクチュエータとして、長期間利用が可能。

申請者はこれまでに感温磁性体を利用したワイヤレスアクチュエータの研究に取り組み、特性の達成方法を明らかにしている。しかし特性を実現できていない。そこで本研究課題では、特性の実現方法を検討し、実現方法を提示することを目的としている。

3. 研究の方法

3.1 ワイヤレスアクチュエータの駆動原理

本研究のワイヤレスアクチュエータの駆動原理を説明する。図1がその原理図である。本アクチュエータは永久磁石、レーザー光源と感温磁性体より構成される。感温磁性体は、温度の上昇とともに磁気抵抗が増加する性質をもつ。図1(a)は初期状態で、永久磁石から生じた磁束が感温磁性体を通る磁路を形成している。この感温磁性体内の磁路にレーザー光を照射して加熱する(図1(b))と、その部分の磁気抵抗が増加する。すると、その部分が磁路外にできるように推力が発生する(図1(c))。レーザー光の照射位置を固定すれば、その間推力が連続的に発生し、その位置によって推力方向が変わる。同様の原理で、回転運動や平面運動も実現可能である。

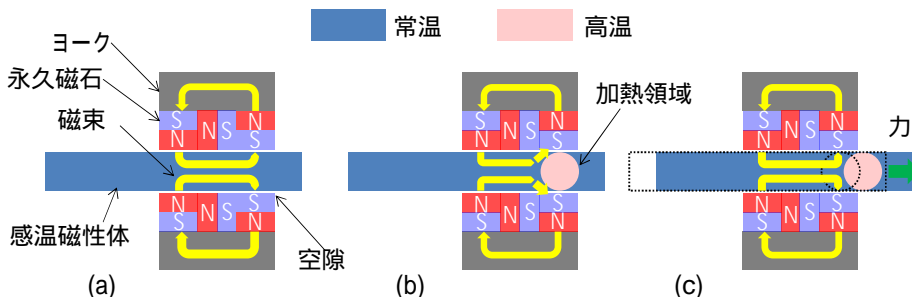


図1 感温磁性体を用いたワイヤレスアクチュエータの駆動原理

より構成される。感温磁性体は、温度の上昇とともに磁気抵抗が増加する性質をもつ。図1(a)は初期状態で、永久磁石から生じた磁束が感温磁性体を通る磁路を形成している。この感温磁性体内の磁路にレーザー光を照射して加熱する(図1(b))と、その部分の磁気抵抗が増加する。すると、その部分が磁路外にできるように推力が発生する(図1(c))。レーザー光の照射位置を固定すれば、その間推力が連続的に発生し、その位置によって推力方向が変わる。同様の原理で、回転運動や平面運動も実現可能である。

3.2 特性のための構成案

これまでに、把持、回転、平面運動を独立したアクチュエータ(機能部)として実現している、しかしレーザー光の照射方向の関係から、単純に組み合わせることができなかった。そこで本研究課題では、図2に示されている光学系により、すべての運動機能を実現することを目指すこととした。図2のレーザー照射システムは、平面運動機能部用として実現さ

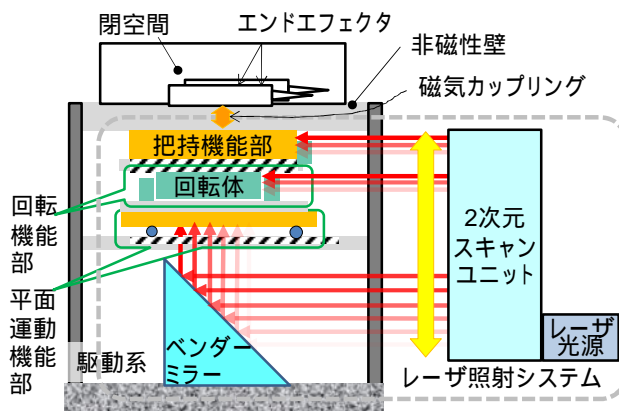


図2 マイクロマニピュレータの基本構成

れている。1個の光源から出力されたレーザー光は、2次元スキャンユニットにより光軸方向に垂直な平面の任意の位置に照射可能である。そのレーザー光がベンダーミラーで反射され、水平に置かれた感温磁性体平面の任意の位置を下方から照射され、その部分を加熱することができる。さらに、高さは限定されるが、水平から照射されるレーザー光を把持などに利用可能である。この構成を前提に、平面運動機能に回転運動機能と把持機能を、次の方法により、追加することを試みた。

(1) 機能統合を可能とする3自由度平面駆動機能部の設計と試作

平面上を水平2自由度方向に駆動できる平面運動機能部を提案・実現している。その駆動実験において、移動に伴い可動子が平面内で角度が変化する現象が観測された。しかしこれまでの平面運動機能部は、回転駆動を期待できない特性を持っていた。そこで固定子など他の構成要素をそのまま利用し、平面上で3自由度駆動が可能な可動子を設計し、試作可動子を用いて特性評価を行った。この運動機能が実現できれば、エンドエフェクタを取り付けた複数の平面運動機能部を利用して、把持機能も可能になると考えられる。

(2) 横方向からのレーザー照射により機能する把持機能部の設計と試作

図2のように、把持機能部は回転・平面運動機能部の上に設置される。そのため把持機能部の任意の位置にレーザー光を照射するのは難しい。よってレーザー光の照射位置ではなく、照射の有無によって把持機能部の開閉ができる必要がある。またレーザー光の照射面が広く、水平方向の任意の位置から照射可能であることが望まれる。さらに微小化のためには部品の構造は単純であることが望まれる。上記(1)と比較して構造は複雑になるが、総合的な制御性は向上することが期待される。以上の要求に応える構造を、磁場解析を用いて検討・設計した。

3.3 特性のための構成案

本研究のワイヤレスアクチュエータは、光熱磁気力を利用している。そのため駆動のための加熱時を除き、冷却し常温に近い状態を維持することが望まれる。平面機能部の固定子となる感温磁性体は、駆動時に常に加熱され、特に温度上昇に注意する必要がある。平面運動機能部では、画像処理により位置を検出し、ビジュアルフィードバック制御が行われる。これまでのシステムは制御周期が遅く、感温磁性体の温度上昇の影響を十分評価できなかった。そこでまずシステムを改良して制御周期を向上させたうえで、温度上昇の影響を評価する。その後、平面運動機能部用の冷却装置を設計し、評価を行った。固定子の上面は可動子の動作領域であるため、冷却機能を付加可能なのは下面となる。しかし下方の空間は加熱レーザーの光路であるため、加熱レーザー光を透過可能な冷却装置を設計・試作し、有効性を実験により検証した。

4. 研究成果

4.1 3自由度平面駆動機能部の試作と駆動試験

図3に、設計した3自由度運動機能部の可動子の上面図を、図4に理論的な推力・トルク特性を示す。0.25mm刻みに加熱点を変化させ、特性を調べた。感温磁性体の厚さは0.1mm、可動子と感温磁性体板間のギャップを0.1mm、レーザー加熱部は円形とした。加熱部とそれ以外に分け、それぞれの温度を一樣として解析を行っている。推力 F_{net} とは、摩擦力も含めた可動子に働く力のX方向成分とY方向成分の合力であり、図4(a)の矢印の方向と色は、それぞれ正味推力 F_{net} の向きと大きさを表している。また、トルク T_{net} も摩擦力の影響を考慮した値であり、図4(b)のヒートマップは各加熱点でのトルク T_{net} の大きさを示している。図4より、可動子の並進および回転駆動が可能であることが分かる。

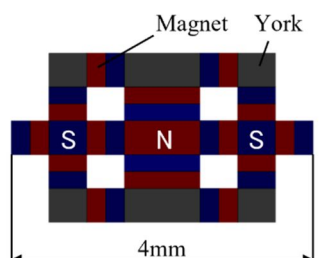


図3 3自由度平面運動機能部の可動子

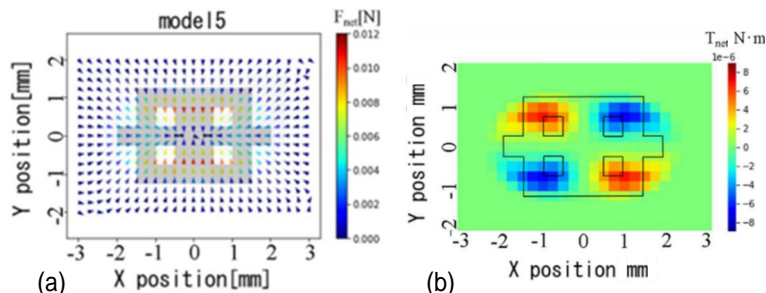


図4 理論的な推力・トルク特性

ビジュアルフィードバック制御系を構成し、直線運動実験を行った例が図5である。青色線は可動子の運動軌跡を示しており、矢印の向きは、可動子座標系に固定された方向(図3の縦方向: Y_M 方向)を表している。図5(b)は移動中の可動子の角度を示しており、絶対座標のX軸方向(水平方向)と可動子座標系に固定された Y_M 方向が一致する向きを 0° としている。目標到達時の可動子の角度は -26.3° であり、移動中は $\pm 90^\circ$ 以内であった。まだ安定性に課題はあるが、任意の位置・姿勢へ可動子を移動させることができ、3自由度制御する手段として有望であるこ

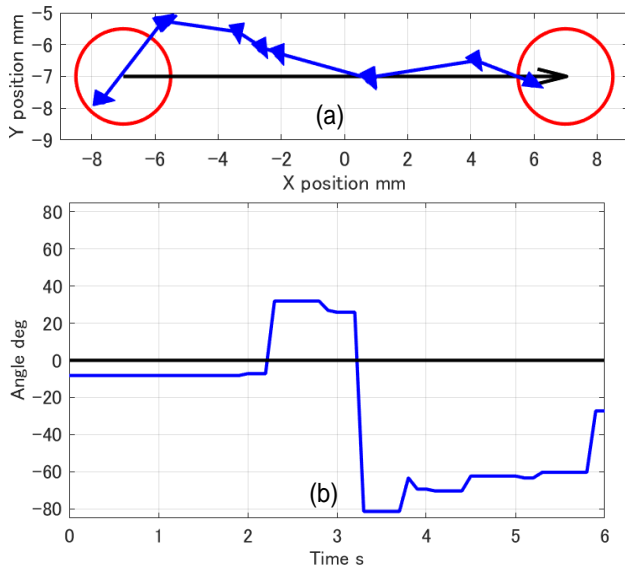


図5 理論的な推力・トルク特

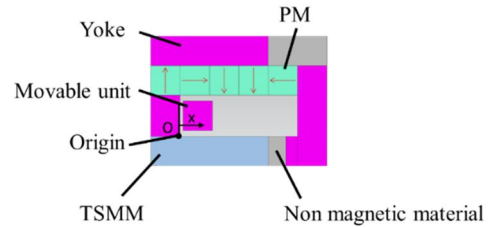


図6 把持機能部の磁場解析

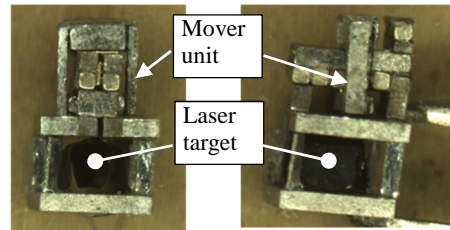


図7 試作把持機能部

とが示されている。

4.2 横方向からのレーザ照射により機能する把持機能部の試作と評価

製作の容易性を考慮し、部品の種類を減らし主要部品を他の機能部と共通化を図り、磁場解析を利用して設計を行った。図6は把持機能部の磁場解析モデルであり、永久磁石、ヨークから構成されている。この構造により、理論的に感温磁性体の温度調整だけで力の発生方向を切換え、物体の把持と解放が可能であることが確認できた。その結果を基礎に、試作した把持機能部を図7に示す。把持機構の可動部は、ころを用いた転がり案内で支持されている。全体のサイズは3mm×3mm×5mm程度である。必要な場所への熱伝達が十分行われることは確認できた。しかし動作を確認することはできなかった。組立精度不足が要因と考えられ、実現のためにはサイズの小ささを踏まえて組立方法を練り直す必要がある。また今回の設計では高さを抑制するのが難しく、重心を下げるための更なる工夫が必要である。以上から、4.1節のアクチュエータを複数用いる方法と比較すると、解決すべき課題は多いと考えている。

4.3 冷却装置の製作とその効果

まずレーザスキャンユニットの制御系を改善し、蓄積される熱量を低減した上で、レーザ加熱による蓄熱により、連続駆動に制約が生じることを確認した。次に冷却装置を試作し、特性を調べた。試作した冷却装置は液冷式である。構造上の制約から光路の一部を含んで配置されており、レーザ加熱を阻害しないように、材料と構造を工夫している。その試作装置を用いて実験を行い、駆動特性に顕著な悪影響を与えることなく、感温磁性体の冷却が早まることを確認した。

次に試作した冷却装置の効果を調べるために、特定の動作を可動子に繰り返し行わせる駆動実験を行った。平面上に正方形の頂点となる4点の目標位置を設定し、目標位置から半径0.5mm以内に到達したときに目標位置を更新して、反時計回りに周回させるようにした。加熱には出力1Wの赤外線レーザを利用し、冷却の際は冷却液の流量を一定にして行った。ただし冷却液の流れ方向と可動子の移動方向が一致すると、動作に悪影響があるので、可動子の移動方向と冷却液の流れ方向が常に逆になるよう流れ方向を変化させた。

以上の実験を40秒間連続して行ったときの、可動子の運動軌跡を図8に示す。冷却無しの場合の軌跡では、左側2点の目標位置周辺で様々な方向へ移動しながら目標位置へ向かっている。これは、周辺に蓄積した熱の影響を受け、発生推力の方向がずれたのが原因と考えて

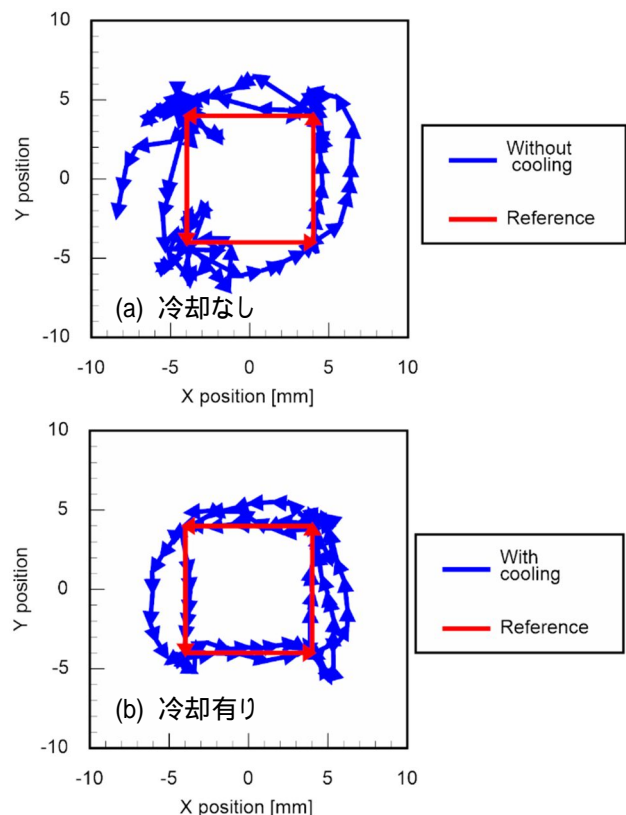


図8 可動子の運動軌跡

いる。一方冷却有りの場合、冷却無しの時に見られた望まれない動作が減少し、冷却装置の有効性が実証されている。

<引用文献>

小森雅己, 佐藤海二, 武田洸晶, 感温磁性体を用いた3自由度平面アクチュエータ -構成と基本特性-, 2023年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2023, 710-711.

佐藤海二, 中澤優仁, 佐野滋則, 感温磁性体を用いたワイヤレス平面アクチュエータの駆動特性, 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2020, 259-260,

中澤優仁, 佐藤海二, 佐野滋則, 武田洸晶, 冷却機能を備えた感温磁性体を用いた平面モータ駆動特性の改善法とその効果, 2021年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2021, 424-425.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤 海二, 中澤 優仁, 佐野 滋則
2. 発表標題 感温磁性体を用いたワイヤレス平面アクチュエータの駆動特性
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中澤優仁, 佐藤海二, 佐野滋則, 武田洸晶
2. 発表標題 冷却機能を備えた感温磁性体を用いた平面モータ駆動特性の改善法とその効果
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小森雅己, 佐藤海二, 武田洸晶
2. 発表標題 感温磁性体を用いた3自由度平面アクチュエータ -構成と基本特性-
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤海二, 武田洸晶
2. 発表標題 感温磁性体を用いたワイヤレスマイクロ平面モータの構成と基本特性
3. 学会等名 電気学会マグネティックス/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------