

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03909

研究課題名(和文)追加・交換が容易な光磁気駆動エンドエフェクタをもつマイクロマニピュレータ

研究課題名(英文)Micro-manipulator with magneto-optical driven end effector easy to add and exchange

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) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：細胞や生体分子、マイクロマシンといった様々な微小物を統合して扱うことができ、多様な場面で利用しやすいマニピュレータシステムとして、1) 気体・液中さらに密閉空間でも利用可能、2) 多様な特性の微小物を操作可能、3) ニードル(指先)の交換、機能変更、追加が容易、4) 駆動部がコンパクトで運動側に配線なしで遠隔操作可能。とするために、マニピュレータシステムの全体構成、概要を明らかにするとともに、そのシステムで中心的な役割を果たす重要な駆動ユニットを構成する把持機能部、回転機能部、並進機能部を設計試作し、その特性を調べている

研究成果の概要(英文)：Micromanipulator systems for handling a wide variety of micro-objects such as cells, biomolecules and micromachines are desired to have the abilities to operate objects which have various characteristics in gas / liquid more enclosed space and operate, and to easily exchange needles (fingertips) which have various functions, and be free from wiring problems for operating. In this research, the concept of the micromanipulator system for satisfying the above requirements was proposed. Then gripping, rotating and translational function parts constituting the driving unit for the system were designed, fabricated and their characteristics were examined.

研究分野：精密メカトロニクス、精密制御、アクチュエータ

キーワード：機能要素 マイクロマニピュレータ 感温磁性体 レーザ ワイヤレス

1. 研究開始当初の背景

近年、人工授精、人工生体の作成、センサやアクチュエータへのデバイス応用など、バイオエンジニアリングの応用が今後益々の発展が期待される重要な分野となり、集合体としての平均的な特性だけではなく、単一の細胞や生体分子の特性を明確にすることが求められている。そのため細胞や生体分子を個別に検査、把持・加工する等の多様な操作に適した支援装置が望まれている。

一方、機械加工を含む様々な方法でマイクロ部品が製造可能となり、多様な材料で製作された部品を組み合わせた高性能なマイクロマシンの実用化・普及が期待されている。さらに生体と融合させた新たなデバイスは、生物に近い動作・機能を可能とし、感覚的、物理的に人にやさしいシステムの実現に有用なデバイスとして大いに期待されている。そのような期待に応えるには、細胞とマイクロ部品の両方の操作を容易にできるマイクロマニピュレータの実現が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、細胞や生体分子、マイクロマシンといった様々な微小物を統合して扱うことができ、多様な場面で利用しやすいシステムとして、次の特徴をもつマニピュレータを実現することである：1) 気体・液中さらに密閉空間でも利用可能、2) 多様な特性の微小物を操作可能、3) ニードル(指先)の交換、機能変更、追加が容易、4) 駆動部がコンパクトに集約され、運動側に配線なしで微細な遠隔操作可能。

本研究課題では、まず上記の目的を達成するためのマニピュレータシステムの全体構成、概要を明らかにし、次にそのシステムで中心的な役割を果たす基本かつ重要な駆動ユニットを実現することを、個別の目標課題として設定し、取り組んでいる。

3. 研究の方法

(1) マニピュレータシステムの全体構成の提案
図1は、1個のマニピュレータシステムの全体構成を示している。駆動ユニットは、

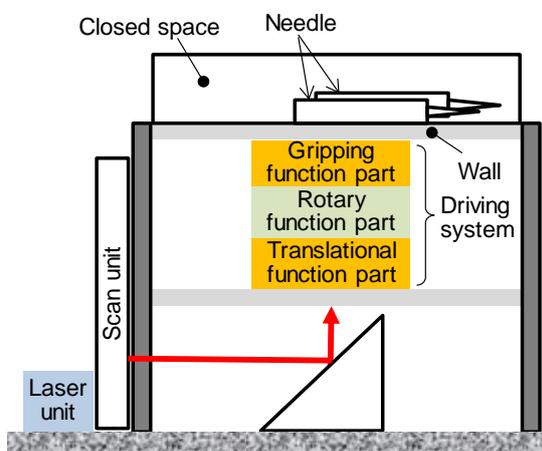


図1 マニピュレータシステムの全体構成

非磁性壁により、対象物と同じ領域に存在するニードルと空間的に分離されて、配置される。そのため駆動ユニットは、操作対象物が存在する環境に影響されない。予め対象物と同じ密閉空間にニードルを入れておけば、対象物をニードルで操作することが可能である。この構造により、研究目的の特徴1) 3)の実現が可能になる。

駆動ユニットは、把持機能部、回転機能部、並進機能部の3種類の機能部に分離され、階層構造をなしている。駆動ユニットへの動力供給および指令値は、レーザ光源とスキャンユニットからなる非接触駆動系から供給されることで、特徴4)を実現可能としている。レーザの照射位置を広い範囲で変更可能であり、その照射位置を変更することで、非接触駆動系における、駆動される機能部の選択、駆動方向を調整できるようになる。

本マニピュレータシステムは、対象物にニードルを接触させる機械式を採用しており、レーザマニピュレーションのような非接触式と比較して、操作対象物の制約が少ない。また駆動ユニットの運動、駆動力は、磁気カップリングを介してニードルに伝達されるため、特徴3)の交換容易性をもっている。

(2) ワイヤレス微小アクチュエータの構成と原理

感温磁性体は、温度上昇とともに飽和磁束密度や透磁率が低下する材料で、100℃以下の比較的低温でも、その変化が現れる。その感温磁性体と永久磁石、レーザを組み合わせてワイヤレス駆動を可能とした、微小アクチュエータを図2に示している。図2

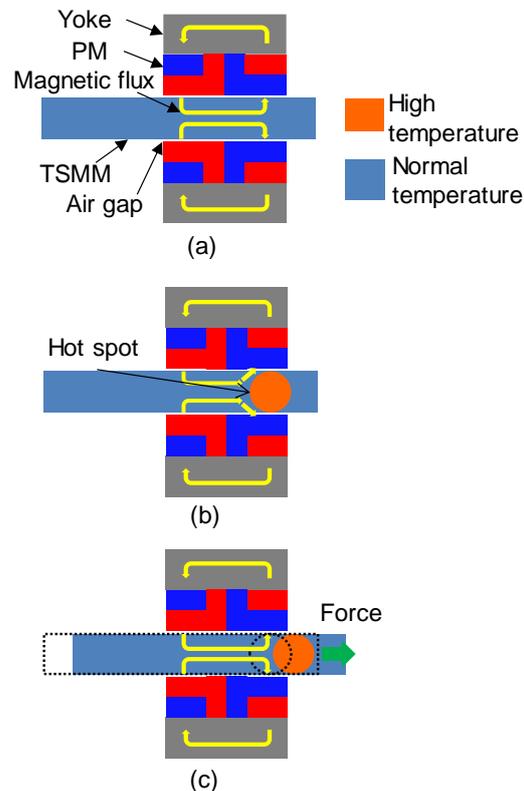


図2 アクチュエータの駆動原理

(a)はアクチュエータの初期状態を示している。2組の永久磁石グループから生じる磁束は、感温磁性体を介して元の永久磁石グループに流れ、磁路を形成している。この感温磁性体を通る磁路に、図2(b)のようにレーザを照射して加熱すると、磁気抵抗が増加する。そのため磁気抵抗が小さくなるように、加熱部分が磁路の外にできるように感温磁性体に推力が作用し、図1(c)に示されるように移動する。レーザの照射位置を固定すれば、同一方向へ移動する推力が連続的に発生し、照射位置をずらすことで、推力方向を変更することができる。すなわちレーザ光照射により、配線なしで感温磁性体の運動を制御することができる。図2は、並進運動の例を示しているが、回転運動も同様に実現される。

(3) 駆動ユニットの3種類の機能部の設計・試作と駆動実験 上記(1)(2)を基礎に、駆動ユニットを構成する把持機能部、回転機能部、並進機能部を個別に設計・試作し、その駆動特性を実験により確認した。第4章では、機能部ごとに、得られた成果を説明する。

4. 研究成果

(1) 開発した把持機能部の構造と特性 第3章(2)で説明した感温磁性体を用いたワイヤレスアクチュエータの原理を基礎に、把持機能部を設計・試作した。図3に設計した把持機能部の構造を示す。アクチュエータは、図2と同じ構造を採用している。図2の下方に示された側面図に示されるように、上部に配置されたニードルは、薄板により、アクチュエータが存在する空間とは分離されている。ニードルと磁気カップリングでつながる部分(磁気カップリング部)のうち、左側の磁気カップリング部は固定され、右側のみ感温磁性体製の可動子に接続され、レーザ加熱により駆動される。

この把持機能部は、1 mN以上の把持力が得られるように、磁場解析ツールを用いて設計された。設計では、感温磁性体製の可動子

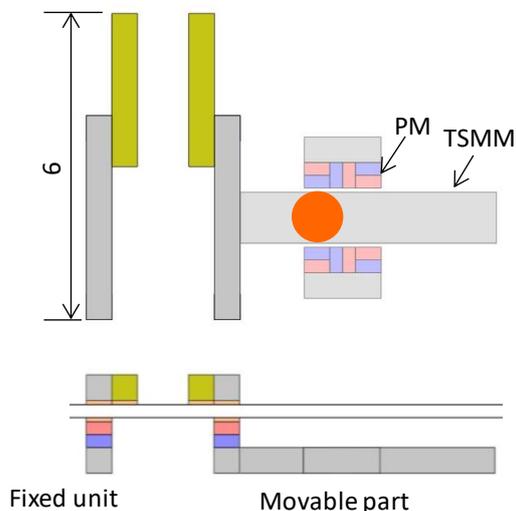


図3 設計した把持機能部の構造

の幅、磁石配置、加熱位置を変数とする解析を行い、寸法と照射位置を決定した。磁場解析により、図2の構造で、アクチュエータ自体の発生力は10 mN以上、磁気カップリングを介したニードルに作用する力でも、照射位置を適切に選べば、2 mN以上の力を発生できることを確認している。この設計に基づき把持機能部を試作し、駆動が可能であることを実験により確認している。

(2) 開発した回転機能部の構造と特性 回転機能部は2種類設計・試作している。まず動作の確認を目的に、直径10 mmのリング状の感温磁性体製の回転体をもつ回転機能部を試作した。この試作機能部では、簡単のため3個のすべり要素が用いられ、案内面にはPTFEフィルムを貼り付けている。用いたアクチュエータは、把持機能部と基本的に同じである。この試作装置を用いて、ワイヤレスで回転運動を実現できることを確認している。

その試作機能部は、構造が簡単である利点があるが、マイクロマニピュレータ用としてはサイズが大きく、すべり要素が特性劣化要因となりうる欠点がある。そこでこれらの課題を解決可能な、転がり軸受を用いた回転機能部を設計・試作した。図4はその構造図である。転がり軸受には、市販の入手性の高いマイクロラジアルベアリングを用いている。アクチュエータとしては、図3の場合よりも推力特性は劣るが、レーザの照射位置誤差の影響を受けにくい構造を採用し、従来よりも回転リングの直径を40%小さくした。

この構造をもつ試作回転機能部を用いて

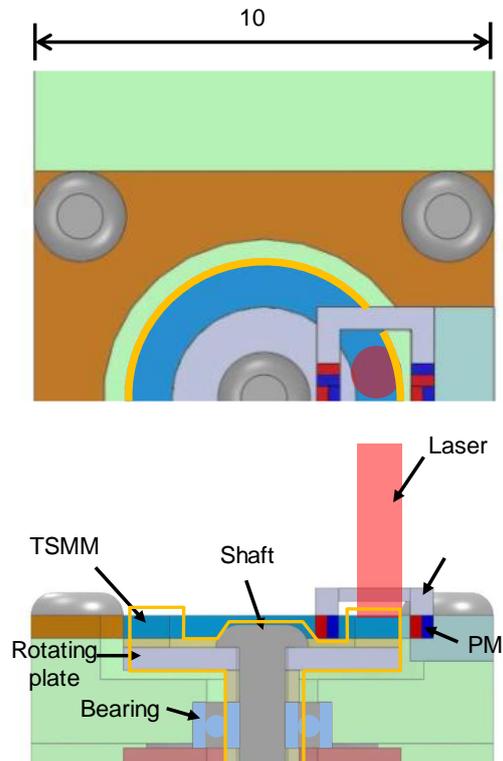


図4 回転機能部の構造

実験を行った結果、回転動作が実現できることを確認している、さらにそのトルク特性を実験と解析により調べ、そのトルク発生性能は、当初設計の通りであり、解析結果と実験結果はよく一致することを確認している。

一方で、試作機能部では、回転リングが振れまわり、固定部と接触してしまい回転角度が制限される問題が生じた。また熱を外部に適切に逃がす設計の必要性が明らかとなった。これらを解決する構造設計が今後の課題となっている。

(3)開発した並進機能部の構造と特性 並進機能部は、平面上を自由に移動できることを目指し、その原理、構造を検討した。図5は、その原理を説明する図であり、並進機能部を側面方向の断面を示している。可動子は複数の磁石で構成され、固定子は板状の感温磁性体である。可動子内の複数の磁石は、強い磁束を感温磁性体に通過させるように組み合わせられている。その磁束が描く磁路の一部をレーザで加熱することで、その加熱部を押し出す力が発生し、可動子を駆動させる。

局所的に加熱される感温磁性体は、均一の特徴をもつ板形状をもつ。把持機能部や回転機能部は、構造的に感温磁性体の特定の場所に磁束が流れるようになっており、力を発生させやすい。しかし並進機能部では、変位分解能や移動方向が制約を受けないようにするため構造的に均一であり、磁路が広がりやすい。その悪影響を抑制するために、磁石配置の最適化を図っている。また熱伝導性の低い微小球を可動子と感温磁性体板の間に挿入し、感温磁性体から永久磁石への熱伝達を抑制しつつ、摩擦力の低減を図っている。この原理に基づき、感温磁性体と対向する面が3mm×3mmの可動子を設計試作し、駆動能力を実験的に調べ、並進運動に必要な有効推力が得られることを確認している。

図5に示す原理に基づき、平面運動させるためには、レーザが感温磁性体に垂直に照射され、その状態を保ったまま照射位置を平面的に移動可能とするスキャン装置が必要である。市販品では条件を満たす装置が存在しないため、新たに設計・試作し、その有効性を検証した。試作スキャン装置は、2台の1軸スキャン装置から構成されている。各1軸スキャン装置は、2枚の並行に配置されたミラー対を回転させることで、照射光の光軸の角度を維持したまま、スポット位置を直線移動できる。1軸スキャン装置を直列にかつ直交配置することで、スポット位置を平面的に

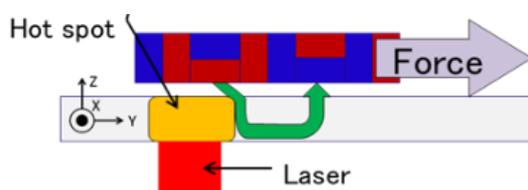


図5 並進機能部の駆動原理

移動させることが可能となっている。各ミラー対の角度をフィードバック信号とするセミクローズド制御系を構成し、照射位置誤差0.1mm以下を実現している。

このスキャン装置と可動子の位置情報を得るための画像処理システムとを組み合わせ、ビジュアルフィードバック系を構成し、位置制御を行い現状の性能と課題について調べた。使用した画像処理システムの特性上の制約のため、制御周期が大幅に制約される問題があったが、そのような制約下でも誤差は1mm以下に抑制できることを確認している。本研究で用いているアクチュエータは、熱磁気アクチュエータであるため、熱伝導に起因する遅れが発生する。今回は制御周期が遅いこととあいまって、緩やかで間欠的な応答となっている。画像処理系に起因する問題を解消し、並進機能部のハードウェア特性に起因する課題を洗い出し、それを解決して位置制御性能を改善することが、今後の課題である。

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4件)

- ① 佐藤海二, 島田忠志: ワイヤレス微小アクチュエータを利用したマイクロマニピュレータの構想とアクチュエータの基礎特性, 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2015) pp.837-838
- ② Kaiji Sato and Tadatoki Shimada : Micro-Manipulator System with Wireless Actuators Using Lasers and Thermo-Sensitive Magnetic Material - System Concept and Gripping Unit Design -, Proc. of ASPE2016, (2016.10) pp.244-247.
- ③ Kaiji Sato and Tadatoki Shimada : Wireless and Compact Rotary Actuator with Thermo-Sensitive Magnetic Materials for Micro-Manipulator, Proc. of ICPT2016, , (2016.11) P-13 ICPT16026_P13.pdf.
- ④ 佐藤海二, 辻澤優太: 感温磁性体を用いたワイヤレス小型回転アクチュエータの設計と試作, 2017年度精密工学会秋季大会学術講演会, (2017)(2017.9) pp.421-422, (豊中)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: アクチュエータおよび可動装置

発明者: 佐藤海二, 桃井大輔

権利者: 東京工業大学

種類: 特許

番号: 特願2016-201681, 特開2018-064386

出願年月日: 2016.10.13

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 海二 (SATO Kaiji)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00215766