

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03904

研究課題名(和文)非接触磁気駆動を用いたマイクロ空間弾性機構の製作および駆動技術の開発

研究課題名(英文)Development of fabrication and noncontact magnetic driving technique of spatial micro elastic mechanisms

研究代表者

松浦 大輔(Matsuura, Daisuke)

東京工業大学・工学院・特任准教授

研究者番号：40618740

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、非接触磁気マニピュレーションとマイクロ空間弾性機構の知見を融合して微小な出力変位・速度・力の生成・計測を行うためのマイクロ空間弾性機構の解析・設計および力に応答して変形する微小な空間弾性機構の組立と駆動に資する、体系的な技術を開発するものである。結果としてマイクロ弾性機構の解析・設計・製作に資する技術および非接触磁気駆動の原理を用いて磁性粒子へ印加される磁力を精度良く制御するためのモデル化と解析・計測技術および実験装置への実装技術が開発され、これらを組み合わせることでマイクロピースの把持・開放の作業を行えるサブミリメートルオーダーの大きさの空間機構の製作と非接触駆動が実現された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、浮遊しているプローブを扱う限り単一のその位置・速度・発生力しか制御できないという従来のマイクロ磁気駆動技術の制約を解消し多自由度運動を創成可能なマイクロ機械システムを実現するために、全体が柔軟かつ磁性材料で構成されるマイクロ空間機構の設計・製作および磁場を用いた非接触駆動を実現する一連のモデル化・解析・設計および実装に資する技術を開発した。得られた成果は関連分野の進歩に寄与するものであり、開発技術を用いて直径100 μ mのガラスピースを把持・開放可能なマイクログリッパ機構が試作され、バイオエンジニアリング分野およびそれ以外の産業分野への応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop a series of technologies for generation and measurement of micro-order displacement, velocity and force, and fabrication and driving of spatial several-hundred micro scale mechanisms of complicated structure capable of being deformed by external forces, based on the knowledge of noncontact magnetic actuation and analysis and design of elastic multiple-loop mechanisms. The obtained results can be summarized that analysis, design and fabrication techniques of micro elastic mechanisms composed of multiple chains of micro resin droplets containing a lot of magnetic particles, and modeling, analysis, measurement and control technology of magnetic driving and its implementation for an actual experimental setup have been developed. Based on this, a fabrication of a micro gripper, and grip / release operation of micro glass beads have been experimentally achieved.

研究分野：機械工学

キーワード：マイクロ弾性機構 冗長弾性閉ループ機構 非接触磁気駆動 磁場の解析・計測・制御 アディティブ
マニファクチャリング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

申請者は、磁気テザーの解析・設計技術の開発過程で、応用可能な分野を模索してきた。しかし磁気駆動の原理から来る制約により、バイオエンジニアリング分野以外への応用は難しかった。この状況を打開するため、初めにマイクロ構造物の造形技術へ応用すること、続いて粒子同士の接合に樹脂を用い、閉ループ構造を設けることで空間弾性機構として利用可能とすること、その駆動をも非接触磁気駆動の原理で行うことを考案した。磁気駆動による微小粒子の位置制御技術は、ドイツ(Technische Univ. Munchen, Forschungszentrum Julich GmbH)や米国(Univ. of North Carolina)で行われているが、いずれも作業空間の大きさが100 μm 程度であり、申請者らが目指す直径200 μm の空間内で百pN以上の発揮力を達成している例は無く、空間機構の作成に適した性能を実現している例は見られない。一方、磁気駆動の造形への応用については、米ボーイング社の特許「Free-Form Spatial 3-D Printing Using Part Levitation (US 20160031156 A1)」等が見られるが、これは超伝導体のピン止め効果を利用して造形物を空中に固定し、周囲から造形材を供給するコンセプトであり、造形材そのものの運動を磁気により駆動するものではない。本研究のような磁気駆動を用いた空間弾性機構の製作・駆動を試みた研究開発事例は、申請者の知る限りでは存在していなかった。

2. 研究の目的

磁気駆動は作業空間の磁場を制御することで行われ、その中に含まれている全ての磁性体が一様に影響を受ける。一方、作業空間内の磁場も、内部に存在する磁性体の影響を受ける。そのため、複数の磁性体と磁場が相互作用する磁気駆動系の解析と制御は困難であり、これまでの申請者の研究および類似研究の多くでは、単一の球形状の磁性粒子が液体中に浮遊しているか、複数の粒子が互いに離れて細胞等の非磁性体の表面に接着された状態を想定していた。この事は、磁気駆動による非接触マニピュレーションの応用範囲がバイオ実験等の限られた範囲に限定される原因となっている。このような状況を打開し、非接触磁気駆動技術の応用性を広げるために、申請者は複数の粒子を組み立てた立体形状の造形技術の開発を着想した。申請者は磁気テザーの研究に着手する以前から冗長機構・弾性機構の解析と設計にも取り組んできており、磁気により非接触駆動される弾性機構は非常に興味深いテーマと考えている。本研究は、非接触磁気マニピュレーションとマイクロ空間弾性機構の知見を融合して、3次元の微小な変位・速度・力の精密な創成や計測を行うためのマイクロ空間弾性機構の解析・設計・製作ならびに複雑な形状を有し、力に応答して変形する空間機構の組立と駆動に関する非接触磁気マニピュレーション手法に関する、体系的な技術を開発するものである。

3. 研究の方法

本研究では、上記の目標を達成するために(A)磁気テザーによりマイクロ空間弾性機構を製作する手法、(B)マイクロ空間弾性機構の非接触磁気駆動手法、ならびに(C)上記2項目に基づき所望の運動を達成可能とする弾性空間機構の設計手法、の3つの研究項目を設定した。(A)については、磁性粒子を組立て空間構造物を製作する手法を開発した。磁性粒子間の接合は、事前に粒子を紫外線硬化樹脂等で覆い、位置決め完了後にこれを硬化させることで行う。また、次に述べる(B)の磁場解析手法に基づいてマイクロピペットから放出される単一の磁性ビーズを画像計測系で捕捉し位置制御を開始するために好適な磁場を作業領域内に形成する手法を開発した。(B)については、多数の閉ループおよび開ループを結合して構成されるマイクロ弾性機構にその機構を取り囲む磁場により生じる外力が加わった際の弾性変形を解析する手法を構築し、さらに組立ての際の個々の磁性粒子および組み立て後のマイクロ弾性機構を駆動するために必要となる作業領域内の磁場解析を簡便かつ精度良く行うための計算手法を開発する。(C)については上記(B)で開発された弾性変形の解析手法を応用して、具体例としてガラス製マイクロビーズの把持運動を実現するためのマイクログリッパ機構の設計を行い、グリッパの試作とデモンストレーションを行った。

4. 研究成果

前節で挙げた研究開発項目に関して、マイクロ弾性機構の解析と設計、製作について述べる。まず(A)の微小磁性粒子を所望の位置に位置決め後に接合し高アスペクト比の微小立体形状を造形可能とするアディティブマニファクチャリングの実現に関しては、ガラス管を引き延ばして切断し、その後先端を加熱整形して製作した微細なピペットをマイクロコンピュータに取り付けたマニピュレーションシステムを用いて多数の磁性粒子を混入させた直径数十 μm ~百数十 μm の紫外線硬化樹脂液滴をハンドリングし、別のマイクロピペットを土台として液滴同士をひとつずつ接触させ、紫外線を照射することで結合する操作を必要な回数繰り返すことで微小な弾性構造物を製作する手法を構築した。さらに、この方法で製作した長さ200 μm の弾性梁の先端に磁性粒子を接着して磁気テザーの磁極により磁力を印加し、弾性梁に変形を生じさせられることを確認した。(B)に関してはこのような微小な液滴が連なった弾性構造の外力の印加に伴う変形を解析するため、個々の液滴と接合部を剛体リンクと弾性ばねに置き換えた直列連鎖としてモデル化し、内力の釣り合いおよび各弾性要素に蓄えられる弾性エネルギーの総和の最小化に基づく最適化計算により、分岐も含む弾性機構の解析を行えるようにした。(C)に関しては上記の解析方法に基づいて長さ・幅が約400 μm のマイクログリッパを設計し(A)の手法により実際に製作することに成功した。さらに、このグリッパの2つの指先に直径100 μm の磁性粒子を取付け、磁力が印加されている間はグリッパを閉じ、無くなると弾性変形により再び開かせることに成功した。このグリッパを用いて、直径100 μm の硝子製粒子の保持と釈放ができることを確認した。

次に作業領域内の磁場の解析と制御に関して述べる。多数の磁極に取り囲まれた作業領域内の磁場は各磁極に取り付けられたコイルへの印加電流により生じるが、1本の磁極から発生した磁束は作業領域の中心方向へ向かうもの他に、他の磁極へ吸収されるものがある。すなわち、磁極間の相互作用を考慮に入れなければ作業領域内の磁場を目標の状態に一致させることが難しい。これを解決するため、1本の駆動対象磁極から発生した磁束を他の磁極へ距離に応じて分配し、その重ね合わせを用いて精度良く作業領域内の磁場の強度と勾配を計算する手法を構築した。さらに、一度磁化された磁極はコイル印加電流が消滅した後も磁化され続けるため、この残留磁化の影響も計測しなければならない。しかし、本研究が対象とする作業領域は直径が200 μm 程度で極めて小さく、磁気センサを組み込むことは物理的に不可能である。そのため、磁極後端にホール素子を取り付けその計測電圧に基づき先端側の磁束密度を推定する手法を導入した。これらの解析・制御技術により、(B)の個別微粒子およびマイクロ弾性機構の非接触磁気駆動の精度向上に資する手法を構築した。以上の手法に基づいて6本の磁極を有する磁気テザー装置の作業領域内の磁場の制御を行い、磁気テザーに内蔵したホール素子の計測信号に基づき作業領域内の磁場を目標の状態に保つことで、作業領域外に置かれたマイクロピペットから磁性粒子を放出して光学計測系の視野中心方向へ誘導する実験を行った。この結果、磁性粒子が所望の位置に誘導されることが確認でき、画像解析によりこれを識別した直後にビジュアルサーボにより位置制御を開始し捕捉するという、マイクロ弾性機構を組み立てるのに必要な一連のプロープの個別導入手順の実現可能性が確かめられた。この技術を用いることで、複数の磁性粒子混入液滴を断続的に生成し磁気テザーの作業領域に送り込むことができ効率の良い磁性マイクロ弾性機構の製作に寄与するほか、製作された磁性マイクロ弾性機構を駆動する際にも目標運動の達成に必要な磁場を精度良く生成することが可能となった。

以上をまとめると、本研究によりマイクロ弾性機構の解析・設計・製作に資する技術および非接触磁気駆動の原理を用いて磁性粒子へ印加される磁力を精度良く制御するためのモデル化と解析・計測技術および実験装置への実装技術が開発され、これらを組み合わせることでマイクロピエゾの把持・開放のような作業を行えるサブミリメートルオーダーの大きさの空間機構の製作と非接触駆動が実現された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 南雲 周, 有尾 知朗, 松浦 大輔, 菅原 雄介, 武田 行生
2. 発表標題 非接触磁気駆動されるマイクロ弾性グリッパの解析, 設計と製作
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019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
---------	---------