

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04319

研究課題名（和文）多指ハンド双腕光マニピュレータを用いた3次元マイクロ操作と計測

研究課題名（英文）3D Micromanipulation and Measurement using a Multi-Finger Hand Dual-Arm Optical Manipulator

研究代表者

田中 芳夫（TANAKA, Yoshio）

香川大学・創造工学部・客員研究員

研究者番号：30357454

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電気的焦点可変レンズと2軸走査ミラーを用いる3次元走査型光ピンセットを2組構築する双腕型光ピンセットに対し、観測系と制御系間の各種非線形歪みを校正する手法を開発し、高精度な双腕型3次元光ピンセットシステムの設計手法を確立した。また、画像処理技術を用いて、双腕操作時に被操作対象と球形エンドエフェクタ間の反力を作業者にリアルタイムで視覚的に提示する視触覚マイクロ操作システム概念を提案し、珪藻などの非球状微小物の双腕協調光ピンセット操作に適用することでその有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した光ピンセット光学系は、従来の多点光ピンセットでは実現の困難な安定かつ高精度な双腕型マイクロ操作のため基盤的システム設計法を提供するものである。安定した双腕操作においては、対象物の把持時の接触力の検出が重要であり、リアルタイムに接触反力を視覚的に提示しながら操作できる視触覚双腕光マニピュレータは、細胞の3次元精密操作が不可欠なライフサイエンス分野などにおける光ピンセットの有用性と優位性を高めるものである。また、本システムは、多様な分野における汎用非接触マイクロ操作ツールとして、より一層の学術的貢献も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have developed the precise correction method of various nonlinear distortions in the observation and control systems for the dual-arm optical tweezers system that consists of two sets of 3D scanning optical tweezers with an electrically focus tunable lens and two-axis scanning mirror, and have established the design method for a high-precision dual-arm 3D optical tweezers system. We have also proposed the concept of a visuo-haptic micromanipulation system that uses image processing technique to visually present the contact forces between a manipulated object and spherical end-effectors to the operator in real time during the bimanual cooperative micromanipulation, and have demonstrated its effectiveness by applying it to the cooperative micromanipulation of single non-spherical micro-object such as a diatom. The unique capabilities offered by the dual-arm visuo-haptic system will open up new possibilities in single cell and 3D biology.

研究分野：知能機械学

キーワード：光ピンセット マイクロマニピュレーション 知能機械 マイクロ・ナノデバイス 画像処理

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マイクロ・ナノテクノロジー、再生医療・バイオテクノロジーにおける細胞操作など、21世紀の科学・産業の核となる様々な分野で、光学顕微鏡下の微小物の内外部の状態を観測し、結果に基づき、精密あるいは自動的に操作・配置・分別を行う技術が重要となっている。マイクロ操作技術は、接触型と非接触型の2つに分類され、接触型はマイクロマシンPJで開発されたマイクロハンドやAFMプローブを利用する方法が知られている。一方、非接触型は、 μ -TAS中などの微小閉鎖空間で雑菌の混入を防止しつつ遠隔操作も可能という、ライフサイエンス分野での応用に適した特徴を有する。特に、レーザ光を用いる光ピンセットはAshkin博士(2018年ノーベル物理学賞)により1970年に初めて報告されて以来、走査法、ホログラム法、一般化位相コントラスト法、時分割法など、ここ数十年の間に1本のレーザ光で複数対象物を同時操作できる様々な方法が提案されると共に、1分子DNA操作、精子や細胞内の微小な力の計測など、ライフサイエンスを中心に応用分野が広がっている。しかし、光ピンセットは、レーザ光の焦点位置での捕捉とその移動による操作を基本原理とし、その原理的制約から、操作対象は主にマイクロビーズや浮遊細胞などの球状微小物に限定され、一般的に光ピンセットに用いる高倍率対物レンズでの観察は、焦点深度の関係で2次元的な観察にとどまっていた。一方、光学顕微鏡下の観察・操作対象物は、非球状かつ内部屈折率も不均一であるものが一般的である。それ故、光ピンセット操作における操作可能対象分野を拡大し、また、CT技術による内部構造や3次元(以下3D)像の再構成のために多方向からの2次元観察像を得る上で、非球状物の3D空間での位置と姿勢の6自由度操作(3D回転)法の開発が重要かつ不可欠となっている。さらに、3D細胞生物学における新たな知見獲得や複雑な3D微小構造物の組立のために、2本の腕を協調しながら、ねじりや対象の持ち替えなどの精密かつ複雑な作業を行える双腕協調型の高度なマイクロ操作法の開発も必要不可欠となっている。

2. 研究の目的

本研究では、1台の光源からのレーザ光を光学的干渉のない2本の偏光ビームに分割し、この2本の腕に対応する各々のビームに対し、マイクロ操作時のエンドエフェクタとなるレーザ光焦点位置や高輝度光パターンを精密に実時間制御できる多点光ピンセット光学系を構成することで、双腕多指ハンドとして機能する非接触操作型の光マニピュレータを開発する。この双腕多指システムの制御・観測系に、光学顕微鏡下の観測画像の実時間画像処理と画像再構成技術を統合することで、多様な形状の微小物の視覚認識に基づいた能動的な捕捉・把持と双腕系の協調動作を用いた非接触3Dマイクロ操作と計測技術の高度化・自動化について検討する。これにより、接触型マイクロ操作技術を補完し、かつ凌駕する技術として、光ピンセットマイクロ操作技術の学術的確立を行うとともに、3D細胞生物学、Bio-MEMSなど多様な学術分野への展開と顕微鏡熟練作業の自動化に貢献できる基盤要素技術を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、1台の光源からのレーザ光を光学的干渉のない2本の偏光ビームに分割し、各々のビームに対し、レーザ光焦点位置や高輝度光パターンを高精度に実時間制御できる3D多点光ピンセット光学系を2組構成することで、

(1)多指ハンド双腕光マニピュレータを試作し、両手を用いた双腕マニュアル操作のユーザインタフェースについて検討する。

(2)双腕光マニピュレータの制御系に、高フレームレートCCDカメラ等を用いて獲得する光学顕微鏡下の観察画像の実時間画像処理技術を統合することで、視覚認識に基づいたアクティブな対象物の捕捉と双腕系の協調制御による3Dマイクロ操作の高度化・自動化について検討する。このために観察系と制御系間の非線形歪みなどを実時間で高精度に較正し補正する方法について検討する。

(3)光捕捉からの逸脱のない安定かつ高精度な双腕協調光ピンセット操作を実現するため、対象物の双腕把持・操作時における対象物からの接触反力の検出法について検討する。

4. 研究成果

レーザ光は偏光成分で分割することで、1台のレーザ光源から光学的干渉のない2本の光トラップ用ビームを生成できる。本研究では、市販の電氣的焦点可変レンズと2軸走査ミラーを用いて3D光ピンセットを2組構築し、各々に時分割法を適用して多点化を図ることで、多指ハンド双腕型光ピンセットを開発した。また、この双腕型システムに対し、画像処理による実時間での球検出と市販の3D座標指示・触力覚デバイスを用いることで、微小球エンドエフェクタと被操作対象間の接触力を検出・提示しながら双腕マイクロ作業を行う視覚双腕光ピンセットの概念を提案・開発し、珪藻などの非球状物の双腕協調操作により有効性の検証を行った。

(1)多指ハンド双腕型光ピンセットと接触力の検出法の開発

図1は電氣的焦点可変レンズと2軸走査ミラーを用いる双腕型光ピンセットの光学・制御系の構成を示している。幾何光学に基づいた本システムは、光トラップ点の3D座標と指令DA電圧が1対1に対応し、時分割法による多点化や画像処理結果に基づく知的な実時間制御が容易であるうえに、作業領域全域にわたり均一かつ高出力な多点光ピンセット操作が行える。2本のアームを用いた双腕協調マイクロ操作においては、安定した操作を遂行する上で把持の際の反力検出が重要である。しかし、ガラスキャピラリなどの機械式アームを用いた操作では、作業者が目視で接触状態を観察する以外にエンドエフェクタと対象物の接触を検出することはできず、また、接触力の方向と大きさに対応する定量的な反力を操作者に提示することは困難であった。一方、微小球の光トラップではビームの焦点位置と球の中心との偏差がバネとして作用するので、微小球をマイクロ操作時のエンドエフェクタとして用いる間接光ピンセットマイクロ操作においては、反力 F を図1中の式 $F = k(P_B - P_C)$ で求めることができる。この式に基づく反力の計算には、マウス等で指示される3D捕捉位置 P_C へのレーザ光の正確な照射と捕捉された微小球の中心位置 P_B の検出が重要である。そこで、2軸走査型光学系の高精度な較正と円ハフ変換による実時間での複数の微小球検出法に基づいた接触力提示法を考案し、視触覚双腕光ピンセットを試作開発した。

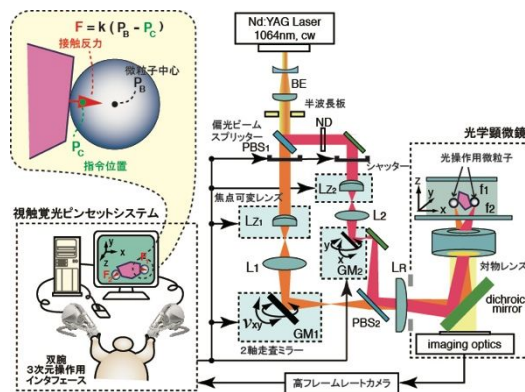


図1 試作開発した視触覚双腕光ピンセット

(2) 視触覚双腕光ピンセットによる双腕協調マイクロ作業

図2は市販の3D指示・触力覚デバイスを用いて両手で光ピンセットの位置制御とシャッターの開閉操作を行っている様子である。把持部のボタンをシャッターの開閉制御に用いることで、手を離すことなく同時に2つの光ピンセット操作が可能となった。これにより、従来のマウスによる操作では困難であった双腕を利用した3D協調マイクロ作業が操作竿のXYZ方向への感覚的な移動操作で可能になった。また、双腕協調作業では、安定した捕捉と作業を遂行するうえで把持の際の反力の検出が重要である。本システムでは、実時間画像処理による微小球検出を利用して、マイクロ操作時の接触反力の大きさと方向を視覚的に提示することができる。図2(b2, b3)は、操作作用エンドエフェクタである径 $8\mu\text{m}$ の市販ガラス球を左右2つの光ピンセットで各々捕捉し、両者を接触させた際の反力の大きさと方向を黄色線でリアルタイム表示している様子である。なお、図2(b1)は、微小球を高速で動かした際に周囲の媒質により進行逆方向の抵抗力を受ける様子を表している。

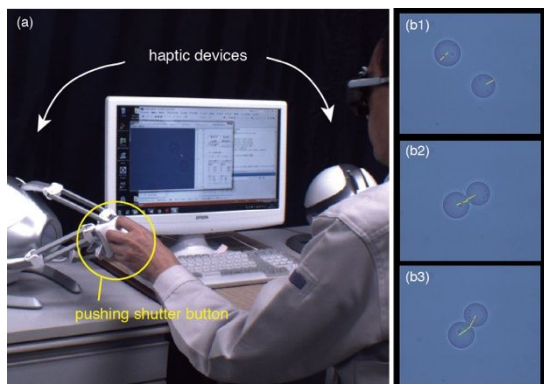


図2 双腕操作と反力の提示の様子

以上、電氣的焦点可変レンズと2軸走査ミラーを用いる3D時分割走査型光ピンセットを2組構築する双腕型多点光ピンセットに対し、観測系と制御系間に発生する各種非線形歪みを較正し操作時に補正する方法を開発し、高精度な多指ハンド双腕型3D光ピンセットシステムの設計法を確立した。また、実時間画像処理技術を用いて、双腕操作時に被操作対象と球形エンドエフェクタ間の接触反力を作業者にリアルタイムで視覚的に提示する視触覚マイクロ操作システムの概念を提案し、市販マイクロピースを2つのエンドエフェクタとして利用することで、その有効性を実証した。本研究で開発した光ピンセット光学系は、ホログラムなどの従来の多点光ピンセットでは実現の困難な、安定かつ高精度な双腕型3Dマイクロ操作のため光ピンセットシステム設計の基盤的方法を提供するものである。安定した双腕操作においては、対象物の把持時の接触力の検出が重要であり、リアルタイムに接触反力を視覚的に提示しながら操作できる視触覚双腕光ピンセットは、細胞の3次元精密操作が不可欠なライフサイエンス分野などにおいて、接触型マイクロ操作技術を補完し、かつ凌駕する技術として光ピンセットの有用性と優位性を高めるものであり、また、多様な学術分野における汎用非接触マイクロ操作ツールとして、より一層の貢献も期待できる。今回、研究代表者が所属を変更し、また、その後の研究実施期間の大半がコロナ禍環境下での研究となったため、学会発表を通じた海外での研究成果の発信が不十分なまま研究を終了することになった。しかし、本研究の成果の1つである視触覚双腕光ピンセットは、研究代表者が世界的にも初めて試作開発し、その有効性を実証した技術であり、今後、3D細胞操作が不可欠なライフサイエンス分野での貴重な研究ツールとなることが期待できるので、学会専門誌への解説記事執筆などを通じて成果の普及を図る予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tanaka Yoshio, Fujimoto Ken'ichi	4. 巻 13
2. 論文標題 Dual-Arm Visuo-Haptic Optical Tweezers for Bimanual Cooperative Micromanipulation of Nonspherical Objects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 1830 ~ 1830
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/mi13111830	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中芳夫, 藤本憲市, 福岡隆彦
2. 発表標題 視触覚双腕光ピンセットを用いた非球状物の協調マイクロ操作
3. 学会等名 第40回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中芳夫, 藤本憲市
2. 発表標題 視触覚を有する双腕光ピンセットを用いたマイクロ操作
3. 学会等名 日本機械学会 2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中芳夫, 藤本憲市
2. 発表標題 3D光ピンセットによるマイクロ容器への微粒子の挿入
3. 学会等名 令和3年度電気電子情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中芳夫, 藤本憲市
2. 発表標題 双腕光ピンセットマイクロ作業時の接触力の検出
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中芳夫, 藤本憲市
2. 発表標題 光ピンセット作業時の接触力検出法
3. 学会等名 令和2年度電気電子情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中芳夫, 藤本憲市
2. 発表標題 触力覚インタフェースを用いた双腕光ピンセットの制御
3. 学会等名 第24回知能メカトロニクスワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中芳夫, 藤本憲市
2. 発表標題 2台のFalconによる双腕光ピンセットの制御
3. 学会等名 令和元年度電気関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中芳夫, 藤本憲市
2. 発表標題 マイクロ作業時の接触力検出が可能な双腕光ピンセット
3. 学会等名 第36回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム
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
研究分担者	藤本 憲市 (FUJIMOTO Ken'ichi) (20300626)	香川大学・創造工学部・教授 (16201)	

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
---------	---------