

2本の柔軟なガラス針を用いた脆弱な微小物体のマニピュレーション Manipulation of Micro Fragile Objects Using Two Soft Glass Needles

○川口 敏史, 井上 健司
○Toshifumi Kawaguchi, Kenji Inoue

山形大学
Yamagata University

キーワード：マイクロマニピュレーション (micro manipulation), マイクロマニピュレータ (micro manipulator), 画像処理 (image processing), 珪藻 (diatom)

連絡先：〒992-8510 山形県米沢市城南4-3-16
山形大学大学院理工学研究科応用生命システム工学専攻 井上健司
TEL&FAX: 0238-26-3335, E-mail: inoue@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

バイオ分野や細胞工学の進展にともない、顕微鏡下で細胞を迅速かつ正確に移動・回転する技術が求められている。そこで本研究室では、2本のガラス棒で微小物体を把持し、移動・回転できるマイクロマニピュレーションシステムを開発している[1]。

珪藻類をはじめとし、資源生物として大いに注目されているにもかかわらず、その脆弱性による取り扱いの困難さから、研究が進展していない生物群が存在する。本研究室のシステムでも、ガラス棒が硬いために、2本の間隔に誤差があると、物体を破壊したり把持できないことがあった。

本研究では、珪藻類のような脆弱性のある微小物体の把持・移動・回転を可能にするため、2本の柔軟な極細ガラス針を用いたマイクロマニピュレーションシステムを開発することを目的とする。珪藻を把持して移動・回転する実験を行い、提案手法の有効性を検証する。

2. システムの構成

脆弱な物体を破壊せずにマニピュレーションする方法として、2本の柔軟な極細ガラス針で物体を把持する方法を提案する。

システムの構成を図1に示す。3自由度の直動ステージにガラス針を取り付けたものを2組作成し、倒立顕微鏡の両側に置く。現在の

システムでは、XY方向に電動ステージ(分解能 $1\mu\text{m}$)、Z方向に手動ステージ(分解能 $0.5\mu\text{m}$)を用いている。手動Zステージで2本のガラス針を物体の高さに調整し、顕微鏡の焦点を合わせた後、電動XYステージを制御して物体を把持・移動・回転する。作成したアダプタにより、ガラス針は水平に近い状態でシャーレ内の物体にアクセスできる。

顕微鏡画像はカメラで取得し、コンピュータで画像処理する。XY平面上のガラス針の操作には、マルチタッチディスプレイを用いる。表示された顕微鏡画像にタッチして、ガラス針と物体への操作入力ができる。

3. 柔軟な極細ガラス針

3.1 ガラス針の作成

ガラス針は、直径が 1mm のガラス棒を、プーラーで細く引き伸ばして作成した。ガラス針の性能を比較するため、シャンク部分(細長い部分)の直径が $15\mu\text{m}$ 以下で長さが約80, 400, $800\mu\text{m}$ のガラス針a, b, cを作成した。

3.2 性能評価実験

作成した3種類のガラス針について、物体把持の際のしなりの有無とその有用性を検証する実験を行った。珪藻を顕微鏡画像の上下から2本のガラス針で挟み、左に10回、右に10回の計20回、約 $1000\mu\text{m}$ を運搬した。把持または運搬中に、珪藻を破壊もしくは取り落とした時点で、失敗とした。

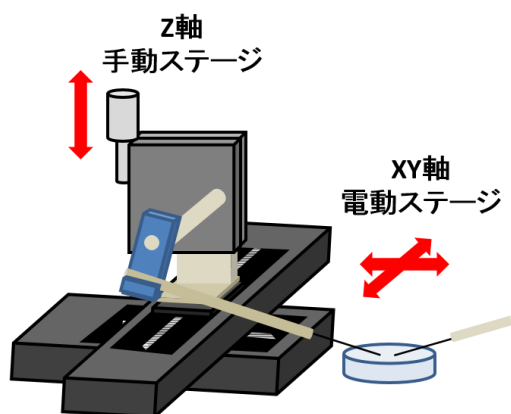


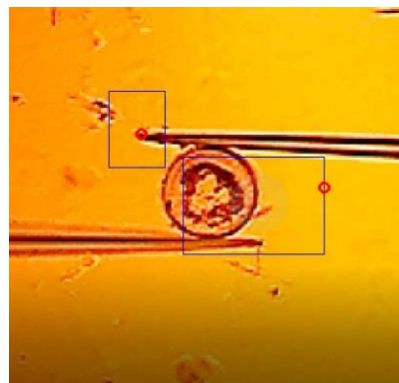
図1 システムの構成

ガラス針による珪藻把持の様子を図2に示す。実験の結果、ガラス針a, b, cの失敗回数は、それぞれ17回, 4回, 0回であった。ガラスaではしなりが見られず、2本の間隔が数 μm でも変化すると失敗した。一方、ガラス針bとcでは、それぞれ珪藻を破壊するまでに約25度, 50度の角度までしなりを生じ、2本の間隔が変化しても、ガラス針が柔軟に変形したため、成功率が向上した。このことから、しなりにより物体の把持性能が大きく向上することが確認できた。

4. ガラス針の検出法

ガラス針のしなり量を知るために、リアルタイムで顕微鏡画像上のガラス針を検出して先端位置 P を求める方法を開発した。

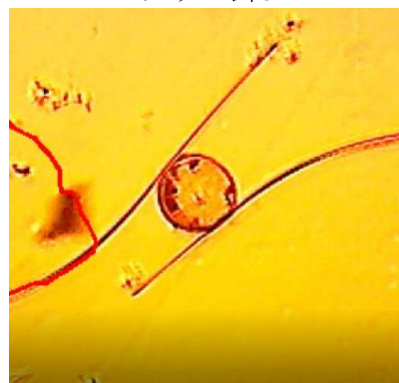
操作開始前のしなりが生じていない状態で、直線状のガラス針の初期先端位置 P_0 と初期末端位置 E_0 を検出しておく。ガラス針の移動量はステージの移動量によってのみ決まるため、移動後のガラス針の推定末端位置 E_c 、また、しなりが生じていないと仮定した場合のガラス針の推定先端位置 P_c を推定することができる。 P_c 、 E_c から求まるガラス針の全長を L_c とする。



ガラス針a



ガラス針b



ガラス針c

図2 ガラス針の珪藻把持画像

ガラス針の検出は、根元から先端に向けて行う。図3は、左側のガラス針が物体を上側から把持する場合を表している。ガラス針をX軸方向に間隔 δx で分割し、

$$x_i = x_0 + \delta x \times i \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

におけるガラス針のY座標 y_i を求める。 (x_0, y_0) は画像上におけるガラス針の根元の座標である。検出範囲 δy を考え、 $x = x_i$ における $y = y_{i-1} - \delta y$ から $y = y_{i-1} + \delta y$ の間で、ガラス針の輪郭の上側のY座標を検出し、 y_i とする。ただし (x_0, y_0) については、ガラス針の根元は大きく変形しないことから推定末端位置 E_c とほぼ同位置にあると考え、 y_{0-1} の代わりに E_c のY座標 y_c を用いて計算を行う。この処理を先端に向かって

繰り返し行い、ガラス針の全長 $L=L_c$ になったら終了する。その結果、ガラス針の上側の輪郭点 $(x_0, y_0)(x_1, y_1)(x_2, y_2) \dots$ が得られ、先端位置Pが検出できる。

ガラス針が物体に接触すると、単純な輪郭抽出では、ガラス針と物体が一体となった輪郭しか求められない。提案手法では、ガラス針の物体と接触していない側の輪郭を求めるので、ガラス針のみの検出が可能となる。ガラス針の検出を行った結果を図4に示す。

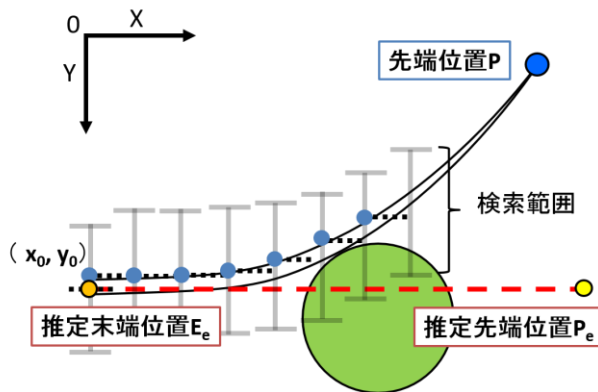


図3 ガラス針の検出法

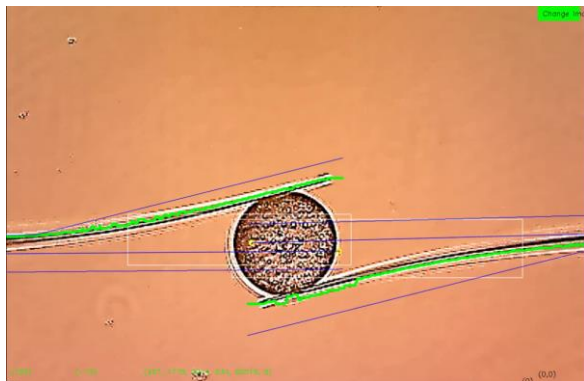


図4 ガラス針の検出結果

5. ガラス針の位置補正法

過大な把持力による物体の破壊や、把持力不足による物体の取り落としを防ぐためには、把持力を一定範囲内に保つ必要がある。これは、ガラス針のしなり量を一定範囲内に保つことと等価である。

図5は、左側のガラス針が物体を上側から把持する場合を表している。前節の方法で求めたガラス針の推定先端位置 P_e と先端位置Pの差が、ガラス針先端のしなり量 δ になる。そこで、しなり量 δ が大きすぎればガラス針を上へ移動し、小さすぎれば下へ移動して、しなり量 δ を一定範囲内に保つようにステージを制御する。

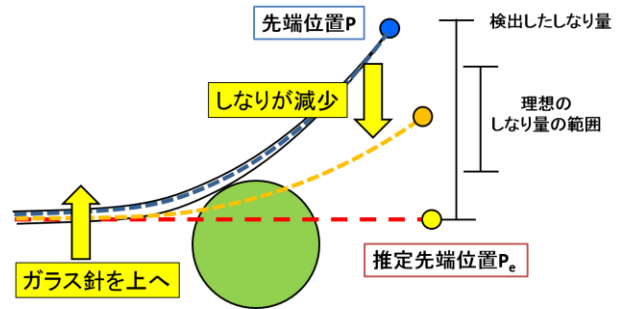


図5 ガラス針の位置補正法

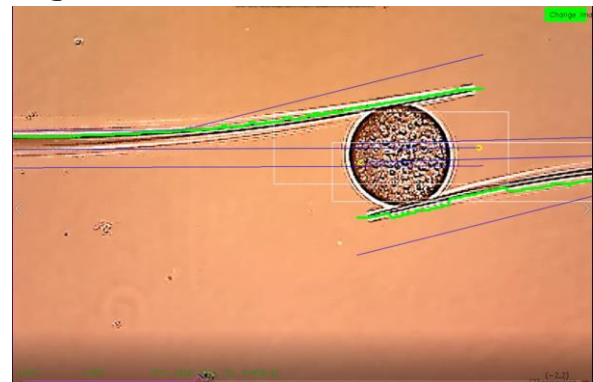
6. マニピュレーション実験

作成したガラス針cを用い、提案したガラス針の検出法と位置補正法により、珪藻を移動・回転させる実験を行った。いずれの実験も、顕微鏡画像のガラス針へのタッチ入力により2本のガラス針をそれぞれ移動し、物体に接触させた状態から行った。

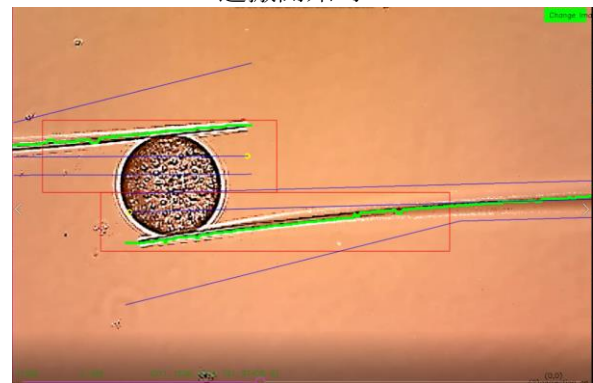
6.1 XY平面運搬操作

顕微鏡画像の物体にタッチして動かすと、2本のガラス針が間隔を保ったまま同時に移動する。その結果、物体を運搬できる。

実験結果を図6に示す。運搬前に行う物体の把持が大きかであっても、ガラス針のしなりと位置補正により、安定して運搬することができた。



運搬開始時



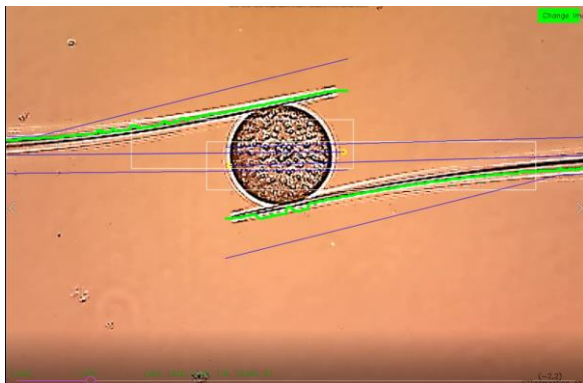
運搬終了時

図6 XY平面運搬操作実験の結果

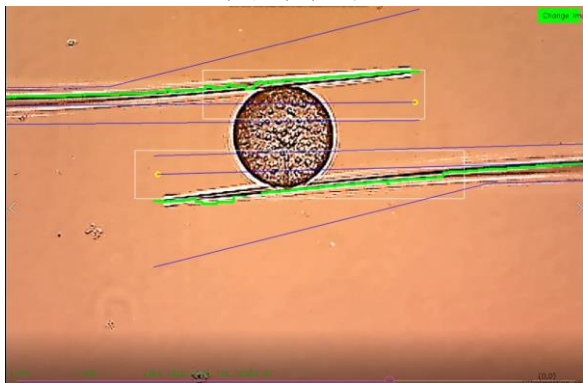
6.2 Z軸回転操作

物体を把持した状態から、2本のガラス針をX軸方向に逆向きに動かせば、転がりにより物体をZ軸回りに回転できる。

実験結果を図7に示す。運搬と同様に、安定した回転が行えた。ただし、この実験では円形の物体を回転したため、ガラス針の位置補正はあまり発生しなかった。



Z軸回転開始時



Z軸回転終了時

図7 Z軸回転操作実験の結果

ステージを電動ステージに交換し、ガラス針の3次元位置を制御して、3次的に物体を移動・回転させることである。

参考文献

- [1] K. Inoue, Y. Matsuzaki, S. Lee: Micromanipulation using micro hand with two rotational fingers, J. Micro-Nano Mechatronics, Vol.7, No.1-3, pp.33-44, 2012.

7. おわりに

2本の柔軟な極細ガラス針を用いたマイクロマニピュレーションシステムを開発した。ガラス針を作成し、ガラス針のしなりによる把持性能の向上を確認した。ガラス針のしなりの検出法と、しなりを一定範囲内に収めるためのガラス針の位置補正法を提案し、これまで困難であった珪藻のXY面内運搬とZ軸回転が可能であることを示した。本研究によって、針が自身に掛かる力の大きさや向きにより柔軟に変形すること、それを検出し制御することが物体のマニピュレーションに有用であることが明らかとなった。

今後の課題は、ガラス針と物体の接触点と接触方向を検出し、より正確な把持力や把持方向を求めること、現在のシステムの手動Z