

# バイラテラル制御による非接触マイクロマニピュレーション —レーザマイクロマニピュレータによるマイクロツール制御—

新井 史人<sup>\*1</sup> 小川 昌伸<sup>\*1</sup> 福田 敏男<sup>\*2</sup>

## Non-contact Micromanipulation by Bilateral Control —Control of Micro Tool Using Laser Micromanipulator—

Fumihito Arai<sup>\*1</sup>, Masanobu Ogawa<sup>\*1</sup> and Toshio Fukuda<sup>\*2</sup>

A laser micromanipulator is suitable for non-contact manipulation of a small object, such as a bacteria and microbe, in the closed space. However, laser trapping has two serious problems to control a living microbe. One is the damage caused by direct irradiation of high power laser to the target, and the other is the weakness of the trapping force, which causes swerving of the target from the desired transportation trajectory by disturbances. For safe and secure transportation of the microbe, we proposed to transport a microbe with micro tools trapped by the laser. Here we developed a measurement system of the laser trapping force using a quadrant photo detector (QPD). We analyzed the measurement area of the QPD and calibrated the trap stiffness. Then we applied the bilateral control to the laser micromanipulation of the micro tool. The operator can feel the magnified force of the laser micromanipulation through the master arm. Finally, we demonstrated the indirect micromanipulation of the Yeast using laser manipulated micro tool.

**Key Words:** Laser Micromanipulation, Laser Trap, Micro Tool, Bilateral Control, Quadrant Photo Detector

### 1. 緒論

近年、バイオテクノロジー産業において顕微操作としてマイクロマニピュレータの利用が盛んになっており、高精度な位置決めや力計測を用いたより精度の高い操作手法が求められている。また、そのマイクロサイズのための特有の問題があるために、多くの物理的・機構的な解決手法が提案され研究が行われてきた。

この内、高出力レーザを顕微鏡の対物レンズで集光することで光圧が発生する現象を利用して、非接触環境下において微小物・微生物等を操作することが可能なレーザマイクロマニピュレータの開発が行われている[1][2]。従来の機械式マイクロマニピュレータ[3]と比較したときの特徴として、下記のような点が挙げられる。

- (1) 非接触操作のため閉環境でも使用可能である。
- (2) 粘性・表面張力により操作を阻害されにくい。
- (3) 作用力が小さいため対象物への力学的損傷が少ない。
- (4) 操作精度が高い。

原稿受付 2001年3月28日

\*<sup>1</sup>名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻

\*<sup>2</sup>名古屋大学先端技術共同研究センター

\*<sup>1</sup>Nagoya University

\*<sup>2</sup>Nagoya University

(5) 光学系が操作系になっているため同一視野での制御が容易である。

(1) は閉空間内で制御できるため雑菌の混入が発生しにくくサンプルの環境が安定する。空気振動・熱対流等の外部振動も抑制できるので、外乱を少なくすることができる。また物理接触をしていないため、付着力やファンデルワールス力等の界面作用力の影響が小さく、マニピュレーションの操作精度を上げることができる。(2) はスケーリング効果による慣性力に比べ粘性力が相対的に大きくなる影響によって速度変動に敏感な外乱が影響するため、マニピュレータ自身の動きなどが粘性力として作用する。(3) は機械式での駆動力は力センサの分解能から数十 [ $\mu\text{N}$ ] 以上であるため、対象物への微細操作では力のばらつきが大きすぎる問題がある。しかしレーザトラップは  $\text{pN}$  オーダーのため、原理的に搬送力以上の力を発生することができないので安全である。(4), (5) においては光の光軸走査方法やステージの制御によって数 [ $\text{nm}$ ] の制御が可能である。これは機械式は作業領域までの距離が長く、周りの外乱によって振動するため、数 [ $\mu\text{m}$ ] までが限界である。さらに、機械式ではツールを作業領域の視野圏内に導入するまでが比較的困難であるため、ツール交換などでは再度微調整をする必要があるが、レーザ系では、焦点が合う領域が作業領域のためその必要がない。これらの特徴からレーザトラップでのマイクロマニピュレーションは、最近バイオテクノロジー分野でよく用いられるが、問

題点もいくつか指摘されている。それは次のような点が挙げられる。

- (1) 高出力レーザのため対象物に熱・非線形光学効果による損傷が起こりうる。
- (2) レーザトラップ力が弱いため、突発的外乱等の影響で捕捉に失敗する。
- (3) CCD等の視覚デバイスのみで操作するため、操作性が落ちてしまう。

(1) として、用いられるレーザは一般的に近赤外領域のものを使用するため、水等の媒質の吸収帯に当たり熱的な損傷が起こりうる。また、高出力レーザによる非線形光学効果として、2光子吸収等が起こり、1,000 [nm] の波長であれば500 [nm] の影響が対象物に出てくる。この波長帯はタンパク質に影響される領域とされるので、DNA・細胞等に損傷を起こしうる。(2) では、 $\mu\text{m}$  単位の対象物へ働くレーザトラップ力は  $\text{pN} \sim \text{nN}$  オーダーになる。しかし、周りの流体が  $100 [\mu\text{m}/\text{s}]$  以上になると流体抵抗が  $\text{nN}$  オーダーになるため、あまり高速で動かせなくなる。また、外部からの空気振動影響が内部に及ぶと、脈流などが生じるため捕捉状態が保てなくなる。(1), (2) の問題を解決するために、“マイクロツール”を提唱し、これらの問題を解決するアプローチを取った。“マイクロツール”とはレーザトラップで操作される微小対象物であり、この制御によって微生物などの対象物に接触させて間接的な搬送操作を行うことを目的としている。機械式に比べマニピュレータが小型のため、自由度が高いことと(1), (2) また(3) は、従来より操作面で問題であり精度の高いマニピュレーション方法が求められていた。そこで、非接触での力計測とバイラテラル制御を利用することで、非接触環境下において従来の操作性能に反力の力呈示を付加することで、操作性の向上を行った。

## 2. レーザトラップ

本章では、レーザトラップの原理を基に、本制御系に適用可能な範囲設定およびモデリング手法について説明する。

Mie 散乱領域（対象物が光の波長よりも十分大きい領域）において、光の運動量が屈折や反射等の光路が変化する際にわざかにその物体に運動量変化として作用する。レーザトラップとは、その運動量変化が作用する程度の高エネルギーを得るために高出力レーザを対物レンズで集光し、光圧を発生する。その光圧計算は光線追跡法によって Fig. 1 のように示される。<sup>[4]</sup> この際の Z・Y 方向にかかる光圧は次の式のように記述される。

$$F_Z = \frac{n}{c} P \left[ 1 + R \cos 2\theta - \frac{T^2 [\cos(2\theta - 2r) + R \cos 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2r} \right] \quad (1)$$

$$F_Y = \frac{n}{c} P \left[ R \sin 2\theta - \frac{T^2 [\sin(2\theta - 2r) + R \sin 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2r} \right] \quad (2)$$

(1) は散乱光力、(2) は勾配光力と呼ばれる。その  $n$  は屈折率、 $P$  はレーザ出力、 $c$  は光速、 $R, T$  は反射率、透過率としている。これらからレーザトラップ力を数値解析されたものを一般的に次の式のように置き換えて記述されている。

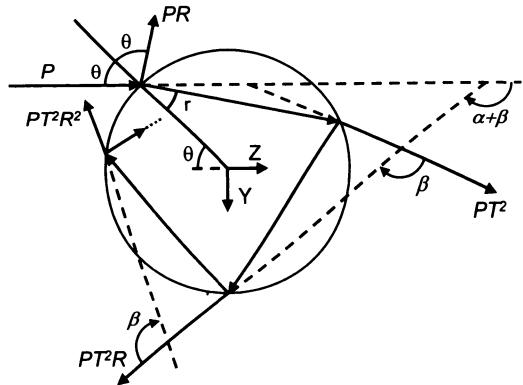


Fig. 1 Geometry of single incident ray for laser trap

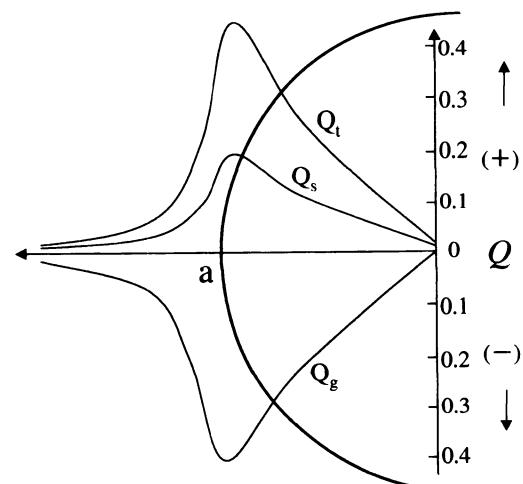


Fig. 2 Horizontal effective index of laser trap

$$F = \frac{n}{c} P Q \quad (3)$$

レーザトラップはレーザの出力に比例するが、それ以外に屈折率等の物性および形状に大きく作用される。その対象物に依存したパラメーターをまとめて効率係数  $Q$  で示している。また、この係数は(1), (2) のように方向に依存して変わるために、ここではその効率を(1)について  $Q_s$ , (2) については  $Q_g$  と定義するものとする。そのため全体のレーザトラップ力の効率係数を  $Q_t$  とすれば、次のように定義することができる。

$$Q_t = \sqrt{Q_s^2 + Q_g^2} \quad (4)$$

これらを基に焦点が中心軸を移動したときの各効率係数  $Q$  の変化を、Fig. 2 に示す。これより、対象物の端ではレーザトラップが強いことが分かる。次にレーザトラップの制御用モデルを立てるが、非線形関数でありここでは対象物の端でないところでトラップを行うことを考えているため、対象物の中心とレーザ焦点の間隔が十分小さいときには線形バネとして見なすことができるとした。

そこで、線形バネ効果が得られる程度に十分変位が小さいとき、以下の式を適用する (Fig. 3)。

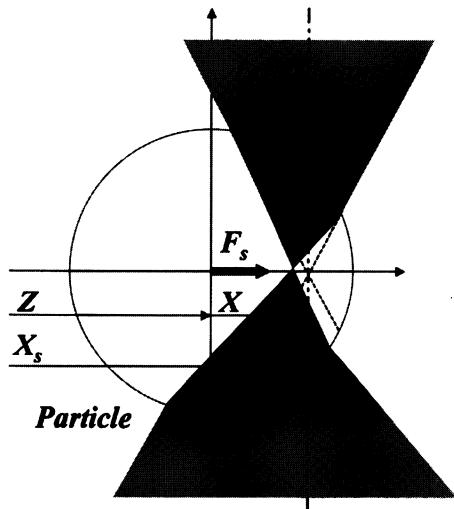


Fig. 3 Model of laser trap

$$X = X_s - Z \quad (5)$$

$$F_s = K(X) \cdot X \quad (6)$$

$$K(X) = \begin{cases} K & (X_{min} < X < X_{max}) \\ 0 & (X < X_{min}, X > X_{max}) \end{cases}$$

このときの  $X_{min}$  および  $X_{max}$  はレーザトラップの有効範囲を示したものである。この有効範囲は、Fig. 2 の  $Q_t$  に示したように、物体の端面付近までは線形的な力を発生させる。それから力が落ち込んで端面を越えたところで  $Q_t$  は 0 に近づくことが分かる。よって端面内でレーザトラップを行っていれば、式 (6) を適用することが可能であると考えられる。また、 $K$  は流体抵抗とのバランスから光バネによる変位を計測された力キャリブレーションに基づいて決定されるバネ関数パラメータである。ただしこれらの式は、光軸方向に垂直な平面においてのみの適用と限定する。光軸方向にも捕捉力は作用するが、捕捉力が弱いことと、高精度位置計測する手法がまだ確立されていないため、本研究では取り上げていない。

### 3. マイクロツール

レーザトラップでの制御において、我々はマイクロツールを提唱した [2]。この制御方法の利点を次に示す。

- (1) レーザを照射するため対象物に損傷を引き起こしにくい。
- (2) 物性・形状が安定しているため、レーザトラップ力計測が安定している。
- (3) 形状を従来のフォトリソグラフィー技術で作成可能である [5]。

(1) は、エネルギー密度が焦点付近で非常に強いためその周辺において損傷が起こりうるが、マイクロツールという媒体を介することで、直接レーザの損傷を防ぐことができる。本システムにおいて、レーザスポット径が  $\phi 1 \sim 2 [\mu\text{m}]$  程度であるため、それ以上の大きさのマイクロツールであれば、操作対象物に対する損傷が和らぐ。また (2) は対象物の位置変化から力を読みとっているため、その物性や形状などが変化する微生物等では力の検出精度が悪くなる。また、微生物では水に屈折率が

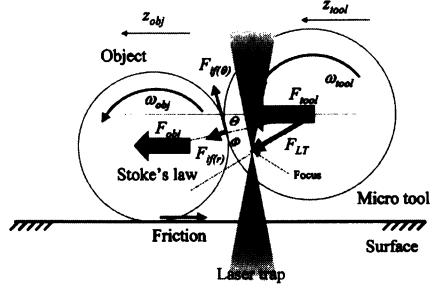


Fig. 4 Modeling of a micro tool

近いため十分なレーザトラップ力が得られない。そのため、ポリスチレンのような水よりも十分屈折率が高い物質を使うことによって、操作能力を上げることが可能になる。(3)においては、膨大な数のマイクロツールを作成する必要があるが、安価に決まった形状を作るには集積密度の高い作成方法でなければならぬ。そのためマイクロマニピュレーションで用いられているようなフォトリソグラフィー等で作ることができることが示されている。

マイクロツールと対象物の運動方程式は、Fig. 4 より二次元でのモデルとして次のように記述される。

$$F_{obj} = -6\pi\eta a_{obj} \dot{z}_{obj} - F_{fric} + F_{if(r)} \cos \Theta + F_{if(\Theta)} \sin \Theta \quad (7)$$

$$I_{obj} \dot{\omega}_{obj} = (F_{fric} + F_{if(\Theta)}) \cdot a_{obj} \quad (8)$$

$$F_{tool} = -6\pi\eta a_{tool} \dot{z}_{tool} + F_{LT} \cos(\Theta + \Phi) - F_{if(r)} \cos \Theta - F_{if(\Theta)} \sin \Theta \quad (9)$$

$$I_{tool} \dot{\omega}_{tool} = F_{if(\Theta)} \cdot a_{tool} \quad (10)$$

ここでは、対象物の大きさが十分小さいため慣性項は消去されている。 $F_{obj}$  は対象物への作用力、 $F_{fric}$  は壁面摩擦、 $F_{LT}$  はレーザトラップ力である。 $F_{if(r)} \cdot F_{if(\Theta)}$  は、対象物から見た界面における付着およびせん断方向の相互作用力を示している。この力は、マイクロツールが対象物に接触している間は、マイクロツールに反作用力として作用するものとする。また壁面に対してマイクロツールと対象物の角度を  $\Theta$ 、それからレーザトラップ力が作用している角度を  $\Phi$  とする。対象物およびマイクロツールの慣性モーメントおよび半径は、それぞれ  $I_{obj}$ 、 $I_{tool}$ 、 $a_{obj}$ 、 $a_{tool}$  とする。相互作用力は、粘弾性要素や静電的なものも含めて一般的に非線形関数として記述される。ここで、マイクロツールで対象物を押すための条件として、また、Fig. 4 より、対象物の押される方向がマイクロツールの中心から下方向の場合は、壁面からの反力とマイクロツールの押出力で安定した搬送ができる。しかし、逆の場合は一点で支持するため、マイクロツールの速度によっては粘性力などで弾き飛ばされる可能性がある。よって、壁面の摩擦が十分に小さい場合はこれらの搬送が可能となることが分かる。

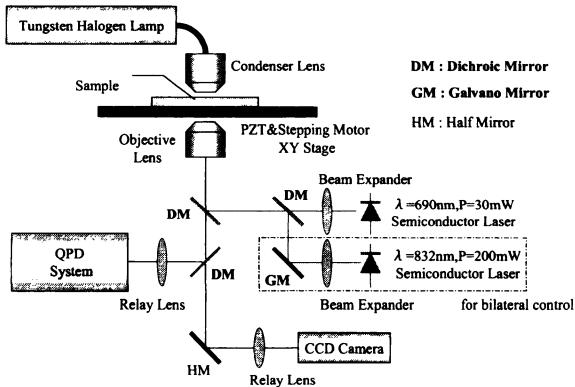


Fig. 5 Optical system for the laser micromanipulator

#### 4. レーザマイクロマニピュレーションシステム

##### 4.1 顕微鏡装置

本顕微鏡システムは、(株)モリテックスの倒立型レーザマイピュレータ(MLM-1000)を基本ベースに、半導体レーザとして出力  $P = 200$  [mW]、波長  $\lambda = 832$  [nm]を使用した。その光学系を Fig. 5 に示す。操作用のレーザを 2 ポート導入することが可能であり、二つのレーザをダイクロイックミラーを利用して同一光路に入れることで、同じ観察系において二つのレーザがコントロールできる特徴がある。また、観察系はハロゲンランプを利用した落射照明タイプであり、レーザを下から照射する形になっている。さらに、観察用として CCD カメラと QPD (Quadrant Photo Detector) を使用した。ただし本研究では、対象物の位置検出に QPD のみ用いた。

##### 4.2 レーザ制御装置

レーザの操作方法は、2 軸のガルバノスキャナを使用したレーザ光軸コントロールと、顕微鏡ステージを使って対象物と光軸の位置を相対的にコントロールする 2 種類を使い分けている。ガルバノスキャナーは QPD との光軸調整のみに用いているため、レーザトラップの制御用には用いていない。また、ステージ制御にはステッピングモータとリニア PZT アクチュエータを粗動・微動用として用いており、初期位置あわせには粗動、力フィードバックでは微動用を使用している。

##### 4.3 QPD 計測装置

第 2 章において、レーザトラップ力はそのレーザ焦点と対象物の中心の位置の差  $X$  で作用することを説明した。ここで、レーザトラップ力をバイラテラル制御系の力検出に組み込むには、 $X$  の高精度計測と光バネ係数  $K(X)$  の決定を行わなければならぬ。

一般的には、顕微鏡下において対象物の動きを検出するには CCD カメラなどを用いるが、光の回折干渉の限界である  $0.2 \sim 1$  [ $\mu\text{m}$ ] 以下の計測分解能が出ないため、本論文ではより高精度な位置検出の可能な QPD (Quadrant Photo Detector) を用いた。特徴としてはナノオーダの分解能が出ることと、顕微鏡視野内で限定された計測のため位置合わせが比較的容易である点が挙げられる [6]。QPD を用いた対象物の位置計測原理を Fig. 6 に示す。レーザトラップのバネ変位  $X$  は  $\Delta$  のため、この値を

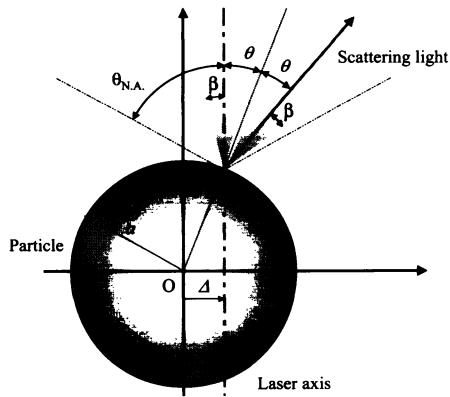


Fig. 6 Coordinate of QPD measurement with beam width

求めるためにレーザトラップの対象物境界で発生する散乱光を QPD で検出する方法を採用した。

対象物の中心とレーザの光軸が一致している場合、対象物の光バネ変位  $\Delta = 0$  になり、散乱光は光軸上をそのまま通って QPD 中心に照射される。この際 4 分割されたフォトダイオードは散乱光が均等に output され、X・Y 方向の出力差は生じないため、QPD が XY とも 0 を検出することになる。しかし、 $\Delta$  の変位が生じた場合は Fig. 6 のように変化するために、散乱光は光軸上からはずれて QPD に入射する。このずれが  $\theta$  となり、QPD に入射されるときには、4 枚のフォトダイオードの光量の差になって出力される。この出力差を XY 方向に検出することが可能なため、対象物が光軸からどの程度ずれているかを計測できる。

ここで変位  $\Delta$  を計算するために、光軸と散乱方向の角度差を  $\theta$ 、対象物の半径  $a$  とすると以下の式 (11) に定義できる。

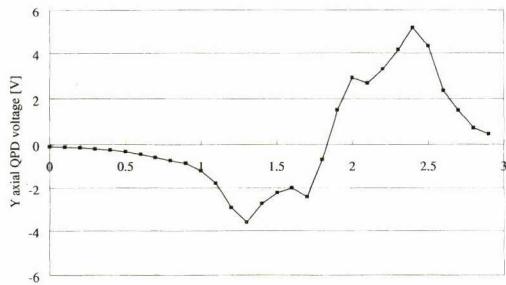
$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{\Delta}{a} \right) \quad (11)$$

しかし、散乱光が QPD で検出できる限界角度が存在する。それは対物レンズの開口数  $N.A.$  によって決まっており、 $2\theta < \theta_{N.A.}$  と記述される。しかし本システムでは高出力レーザトラップであるため、効率を上げるために広いレーザビームを使用している。レーザビームの広がり角度として  $\beta$  項を導入すると、次のように変形できる。ただし水の屈折率  $n_2 = 1.33$ 、開口数  $N.A. = 1.35$  とする。

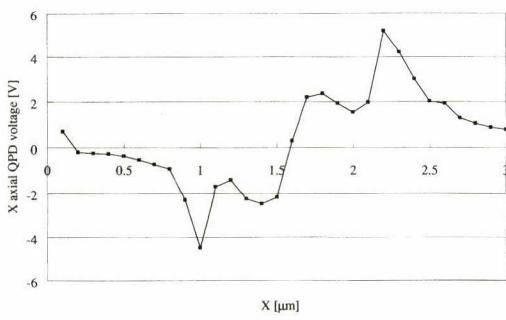
$$2\theta + \beta < \theta_{N.A.} \quad (12)$$

$$\theta_{N.A.} = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{N.A.} \right) \quad (13)$$

この式 (12) で重要なのはレーザビームの広がり角度  $\beta$  が検出エリアを狭める問題となる。その理由は、レーザトラップの散乱光をそのまま QPD で検出しているため、レーザトラップの入射レーザ角度が  $\beta$  となる。レーザトラップは大きなビーム入射角でトラップ力を増す傾向にあるため、 $\beta$  が大きくなる。すると、式 (12) から明らかのように検出角度  $\theta$  が小さくなるため、検出できる光バネ変位が小さくなることを示している。式 (11), (12) より、実際に検出できるエリア計算は次のような式によって示される。



(a) X axis



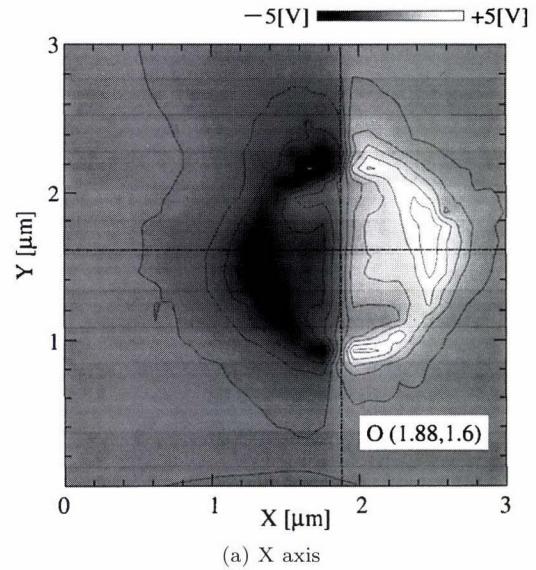
(b) Y axis

Fig. 7 QPD voltage for each axis (X=1.8, Y=1.6)

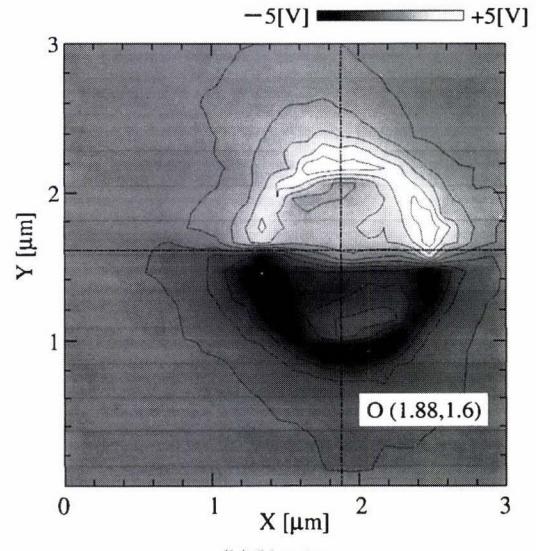
$$\Delta = a \sin \theta \\ < a \sin \left( \frac{1}{2} (\theta_{N.A.} - \beta) \right) \quad (14)$$

ここで物体の半径  $a = 5 \text{ [μm]}$  でレーザビームの径がレンズ径の半分になると仮定した場合、 $\beta = 15 \text{ [deg]}$  となり、その値から計測できる変位レンジは、 $\Delta < 1.1 \text{ [μm]}$  となる。これは光バネ変位の検出限界を示している。Fig. 2 と式 (6) に示したように対象物半径まで線形バネ近似を行っているため、今回の計測レンジ内では線形バネ近似が有効であるといえる。

次に同条件において、QPD の検出範囲を実測する必要がある。本実験の QPD 光学系では、レーザの光軸中心が  $(1.88, 1.60) \text{ [μm]}$  にあり、そこでは QPD の出力は 0 である。さらに光軸を通る XY 軸の直線上の QPD の出力を取ったものを Fig. 7 に示す。両軸ともレーザの中心付近では QPD 出力が 0 であるが、前後では  $\pm 1 \text{ [μm]}$  程度の広がりで変位  $\Delta$  を検出していることが分かる。それ以上の部分では出力が 0 に近づいているのは、対物レンズの集光角度よりきつい角度で散乱光が出ているため、QPD がそれを検出できていないからである。また距離に対して QPD の出力分布が線形に従っていないのは、半導体レーザを用いているためビームプロファイルが乱れていることによる。



(a) X axis



(b) Y axis

Fig. 8 QPD voltage map for each axis

つまり QPD の出力で光バネ変位  $\Delta$  が座標として求めることができることを示している。また、Fig. 8 の QPD 出力結果と式 (14) で示したような QPD の検出限界の比較を行うと、 $1 \text{ [μm]}$  以内に収まっていることが分かる。これは十分検出誤差内であることが分かり、計算値と検出した実験値がよく合っていることが分かる。

次に光バネ定数  $K(X)$  を求めることにする。求め方は、先に  $\Delta = 1 \text{ [μm]}$  の検出限界値で発生する流体抵抗力をレーザトラップ力に置き換え、その光バネ変位量に対してレーザトラップ力を換算し、光バネ定数とすることとした。Fig. 9 は、 $\phi 10 \text{ [μm]}$  の粒子をレーザトラップし、そのときに微粒子を静止流体内で移動させたときの流速と、検出された QPD の信号の関連を示したものである。

これから分かるように、流速が  $30 \text{ [μm/s]}$  以上になると、QPD の出力が低くなっている。これは、Fig. 8 で示したように光バ

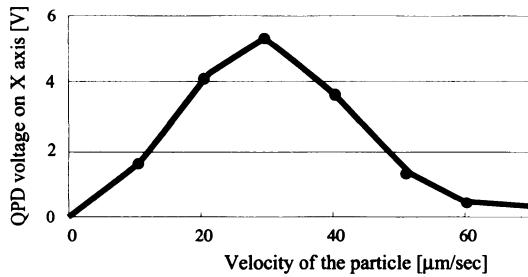


Fig. 9 QPD output versus velocity of the trapped particle

ネ変位が QPD の検出範囲外にあることを示していると考えられる。また、QPD 出力が最大になるときの流体抵抗力はストークス近似則より、約 1 [pN] であることが分かったため、QPD の検出限界領域でのレーザトラップ力は 1 [pN] であることが分かった。このときの光バネ変位量は、Fig. 7 から 1 [μm] であるため、光バネ関数定数を  $K = 1$  [pN/μm] と決定した。

#### 4.4 コントローラ

ここでは、コンピューターに A/D および D/A コンバータを搭載し、それぞれ PZT ステージの位置と QPD の信号検出と、PZT ステージのコントロールを行っている。また、マスター アームには SensAble 社の PHANToM Desktop を用いており、これによってステージの操作およびそのレーザトラップの反力を表示させている。

### 5. 制御システム

本論文で用いる制御システムは、Fig. 10 に示すような構成になっている。

$$\tau_m + F_m = M_m \ddot{X}_m + D_m \dot{X}_m \quad (15)$$

$$\tau_s = M_s \ddot{X}_s + D_s \dot{X}_s \quad (16)$$

$$K(X) \cdot X = 6\pi\eta a \dot{Z} + F_o + F_d \quad (17)$$

式 (15), (16) はマスター・スレーブのダイナミクス、式 (17) は光バネ効果が影響するサンプル内における対象物と運動方程式である。なお、式 (17) の右辺第一項は流体抵抗のストークス近似則から求められた、球体に働く流体抵抗力を示す。また、 $\eta$  は粘性抵抗係数、 $a$  は微粒子の半径、 $\dot{Z}$  は対象物の移動速度、 $F_o$  は対象物の作用力、 $F_d$  は球体に作用する外乱成分を示す。

次に、スレーブにおける位置追従と速度追従を行うため、駆動力  $\tau_s$  を示す。

$$\tau_s = K_p(X_m - X_s) - K_v \dot{X}_s \quad (18)$$

ここでは、 $K_p$  を位置追従ゲイン、 $K_v$  は速度追従ゲインと定義する。また、スレーブの反力  $F_v$  は次の式として定義する。

$$F_v = -K(X) \cdot X = -6\pi\eta a \dot{Z} - F_d - F_o \quad (19)$$

さらに、Fig. 10 のバイラテラルコントロール手法は力逆送モデルであるため、その反力  $F_v$  が直接マスター アームに表示されるので、マスター アームの駆動力  $\tau_m$  は次のように示される。

$$\tau_m = -s_f F_v \quad (20)$$

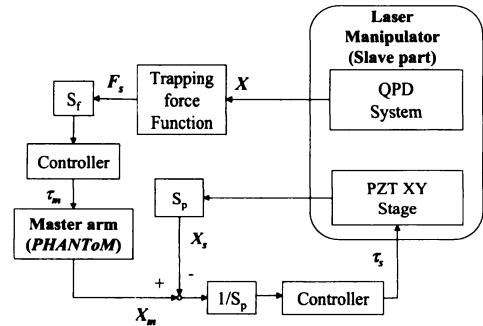


Fig. 10 Bilateral controller for the laser micromanipulator

よって、式 (15), (19), (20) からマスター アームを介してオペレータに表示される力  $F_m$  が次のように示される。

$$F_m = s_f F_v + M_m \ddot{X}_m + D_m \dot{X}_m \quad (21)$$

式 (21) の右辺第 2・3 項は、マスター アームのインピーダンスであるが、本研究では非常に軽いマスター デバイスを用いているため、この項を無視できるほど小さいとした。よって力表示される式は次のようにになる。

$$F_m = s_f F_v = -s_f K(X) \cdot X \quad (22)$$

これから明らかなように、マスター アームに表示される力は、レーザトラップに比例して力が表示されている。

次に本目的であるバイラテラル制御の有効性を示す手法を述べる。式 (17), (22) から分かるように、マスター アームには光バネ力として粘性抵抗力、環境からの外乱力、対象物を操作したときの反力がスケーリングされて表示される。本来は直接対象物の操作している力とマスター アームの操作力を評価すればよいが、我々は対象物の反力や環境から影響する外乱は計測できない。ほかにレーザトラップ力を評価できるのは粘性抵抗力であるが、式 (17) の右辺第一項に示したように、静止流体中でマイクロツールを移動させたときの粘性抵抗力はレーザトラップしたマイクロツールの移動速度  $\dot{Z}$  からレーザトラップ力を推定することが可能である。ここで環境からの外乱および対象物への反力が無かったとすれば、マスター アームには粘性抵抗力のみが表示されることになる。つまり、マスター アームの移動速度はスレーブの移動速度、粘性抵抗力、レーザトラップ力に比例することになり、これらの追従性を評価することでバイラテラル制御が有効に働いていることを示している。この手法でレーザトラップ力が評価できれば、実環境において式 (17) に示す対象物の操作力や環境からの外乱もマスター アームに反力として表示されるため、マイクロツールで対象物を操作するときのバイラテラル制御系として有効であることを示すことができる。

### 6. 実験評価

#### 6.1 流体抵抗環境におけるバイラテラル制御

本実験では、マイクロツールとして  $\phi 10$  [μm] のポリスチレンラテックスビーズを用い、バイラテラル制御システムの有効性検証を行った。前述のように制御性能の評価方法として、粘性

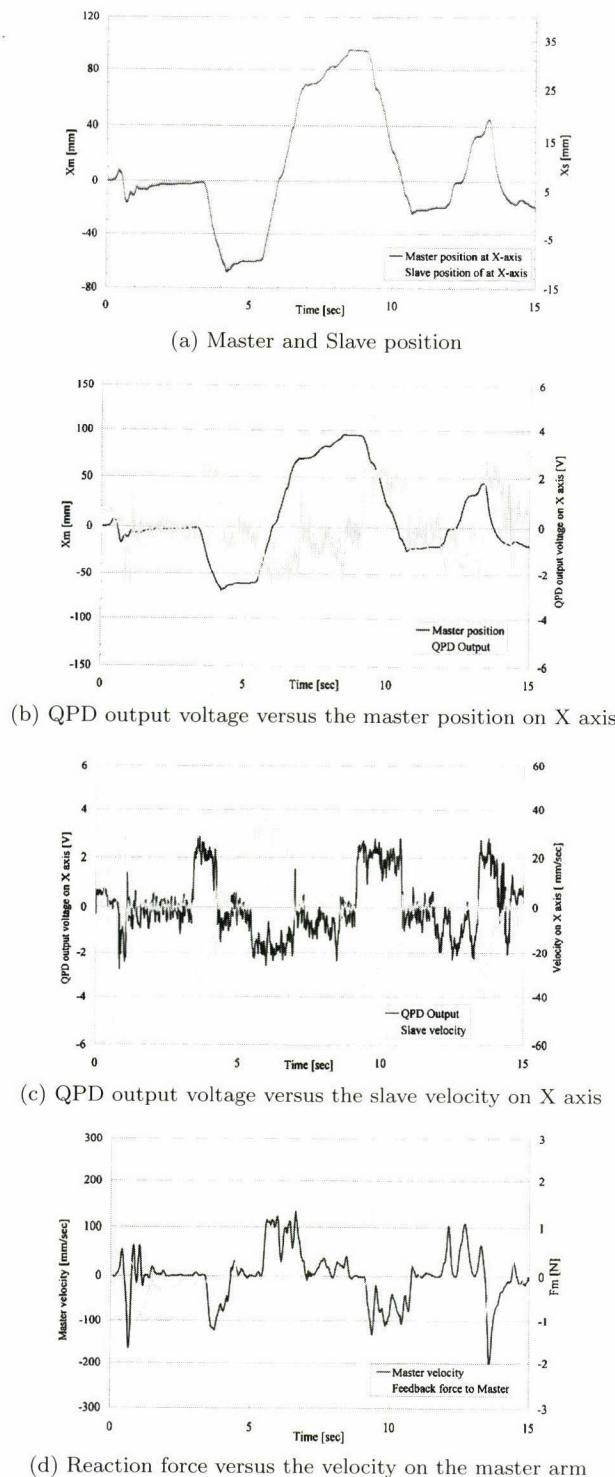


Fig. 11 Bilateral control with a micro tool for the laser micro-manipulator

抵抗力のみ作用する環境を構築し、マイクロツールとマスター アームの追従性からシステムを評価するものとした。ただし、 QPD の出力はレーザの散乱ノイズが多いのでこれらを除去する ために 25 [Hz] のローパスフィルターをかけた。そのときの実験 データを Fig. 11 に示す。最初に Fig. 11 (a) は、マスター・ス レーブの位置追従を示しているが、位置追従は十分であること

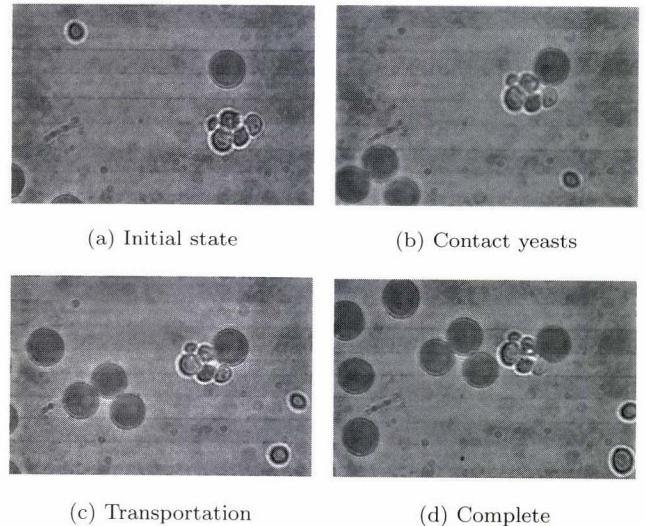


Fig. 12 Pushing Yeasts by the micro tool of polystyrene particle

が分かる。なおここで位置スケールの差は 3,000 倍とい て いる。次に Fig. 11 (b) はそのマスターの位置に対する QPD の信号結果を示したものである。ただし、Fig. 8, Fig. 9 の際に明らかになった計測範囲を超えないようにするため、スレーブの速度に制限をかけてある。Fig. 11 (c) は前述の関係からスレーブの速度と QPD 出力の関連を示したものであり、スレーブの速度と QPD の出力は比例していることが分かる。ただし、QPD の出力がスレーブの速度に対して反転しているのは、スレーブであるマイクロツールに作用する流体抵抗力の反力であるレーザトラップ力を QPD が検出しているためである。よって、スレーブの速度に対する QPD の出力が比例関係にあることは、スレーブ速度に比例している粘性抵抗力と光バネ変位量に比例するレーザトラップ力が比例していること示している。式 (22) にも示したようにレーザトラップ力はマスター アームに呈示する力に比例しているため、結局マイクロツールに作用する力がマスター アームの反力として呈示されることになる。最後に、 Fig. 11 (d) は、Fig. 9 と Fig. 11 (a), (b) よりマスターの速度およびそのときの反力を出力した関係を示したものである。また、力ゲインのスケールは  $0.5 \times 10^{-12}$  とした。これからマスター アームの移動速度に対してマスター アームの呈示力が反転して出力されていることが分かる。前述の通り、ここではマイクロツールの移動速度に比例する粘性抵抗力しか作用しない。また、Fig. 11 (a) に示したようにマイクロツールの動きはマスター アームに追従している。つまりマスター アームの動きがスレーブであるマイクロツールに同期し、その動きに伴う粘性抵抗力がレーザトラップ力として検出され、マスター アームに反力として呈示されていることを示している。これから非接触環境下でもマスター アームの動きがマイクロツールを正確に制御しつつ、かつマイクロツールにかかる負荷がマスター アームに力を呈示されていることが分かった。これによってレーザトラップのバイラテラル制御の有効性が示すことができた。

## 6.2 マイクロツールによるイースト菌搬送

先ほど使用した  $\phi 10$  [μm] のマイクロツールを、微生物を搬送

するためのツールとして実験を行った。ここでのサンプルは1~5 [μm] の大きさのイースト菌を対象としている。これから、マイクロツールで微生物を押しながら搬送することができることが確認できる。この際にレーザトラップの反力がマスターームに返ってくるが、微生物とマイクロツールの付着により重心が変化するため、正確な力呈示が行われない。しかし、二つの全体的なレーザトラップ反力としてマスターームに呈示される。また、画面上で付着していないと確認できている状態では、反力が返るもの、対象物が浮遊している状態のため、モデリングが難しく粘性抵抗以外の分子レオロジー的な要素が解明されていない現在では再現が難しい。

## 7. 結論

レーザマイクロマニピュレータにおいて、QPD を用いて対象物の位置検出をリアルタイムで行うことで、その光バネ関数の導入によってレーザトラップ力を算出できるため、スケーリング変換をした結果バイラテラル制御による非接触マイクロマニピュレーションの実現方法を示した。また、レーザによる微小物損傷を防ぐことと操作性の改善を目的にしたマイクロツールを提案し、本実験においてレーザトラップの操作反力の確認と操作性の向上が示された。しかし、本論文ではレーザのビームが乱れているため高精度の位置検出には至らなかった。今後はビームプロファイルを改善し、高分解能の操作について検討を要する。

新井史人 (Fumihito Arai)



1963年8月1日生。1988年東京理科大学大学院工学研究科博士前期課程卒業。同年富士写真フィルム入社。1989年より名古屋大学工学部助手、1993年工学博士（名古屋大学）、1994年同大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻講師を経て、1998年同専攻助教授。1998年~2000年NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)地域コンソーシアムプロジェクトリーダー。2000年さきがけ研究21従事。現在に至る。マイクロ・ナノロボット工学、知的ロボットシステム、知的インターフェースの研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、IEEEなどの会員。

(日本ロボット学会正会員)

福田敏男 (Toshio Fukuda)



1948年12月12日生。1971年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。1977年東京大学大学院博士課程修了、工学博士。この間、1973~75年アメリカエール大学大学院留学、1977年通産省工業技術院機械技術研究所研究員、主任研究官を経て、1982年より東京理科大学工学部機械工学科講師、1983年同大学助教授、1979~81年西ドイツツッカーハルト大学客員研究員、1986年アメリカエール大学客員助教授、1989年4月名古屋大学工学部機械工学第2学科教授。1992年4月同大学機械情報システム工学科教授。1993年イタリア Scuola Superiore S. Anna 客員教授。名古屋大学マイクロシステム工学専攻教授を経て1997年4月より同大学先端技術共同研究センター教授。自己組織化ロボット、マイクロロボット、ニューロ・ファジイ制御、指やマニピュレータの制御、特殊環境下のロボットの研究等に従事。2000年IEEE Division X Director 就任。

(日本ロボット学会正会員)

謝辞 本論文をまとめるに当たり、システムの開発および有益な御助言を頂いた(株)モリテックスの堀尾浩司様に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] A. Ashkin, M.J. Dziedzic and T. Yamane: "Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams," *Nature (Lond.)*, no.330, pp.769~771, 1989.
- [2] F. Arai, M. Ogawa, T. Fukuda, K. Horio, T. Sone, K. Itoigawa and A. Maeda: "High Speed Random Separation of Microobject in Microchip by Laser Manipulator and Dielectrophoresis," *Proc. of IEEE the Thirteenth Annual Int'l Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2000)*, pp.727~732, 2000.
- [3] 谷川民生、新井健生:“二本指マイクロハンドの設計と微細作業”，日本ロボット学会誌, vol.15, no.2, pp.284~289, 1997.
- [4] M.P. Sheets: *Laser tweezers in cell biology*. pp.1~27, Academic press, 1998.
- [5] 鶴津正夫、江原雅人:“レーザマニピュレーション用高分解能プローブの製作”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98, 1CIV1-9 pp.1~2.
- [6] M.R. Simmon, T.J. Finer, S. Chu and A.J. Spudich: "Quantitative measurements of force and displacement using an optical trap," *J. of Biophys.*, no.70, pp.1813~1822, 1996.
- [7] F. Arai, M. Ogawa and T. Fukuda: "Selective manipulation of a microbe in a microchannel using a teleoperated laser scanning manipulator and dielectrophoresis," *Advanced Robotics*, vol.13, no.3, pp.343~345, 1999.
- [8] F. Arai, M. Ogawa and T. Fukuda: "Bilateral control system for laser micromanipulation by force feedback," *Advanced Robotics*, vol.14, no.5, pp.381~383, 2000.

小川昌伸 (Masanobu Ogawa)



1977年2月24日生。1999年名古屋大学工学部機械航空工学科卒業。2001年同大学大学院工学研究科マイクロシステム工学コース博士前期課程卒業。現在に至る。