マイクロマニピュレータの相対位置姿勢同時計測技術*

小林宏明*** 石丸伊知郎** 井上祐介*** 三原 豊**
大平文和** 橋口 原† 秦 清治** 田辺 義和††

Measurement Technology for Relative Position and Attitude of Micro-manipulator

Hiroaki KOBAYASHI, Ichirou ISHIMARU, Yusuke INOUE, Yutaka MIHARA,
Fumikazu OOHIRA, Gen HASHIGUCHI, Seiji HATA and Yoshikazu TANABE

We have been studying the manipulating technique for micro-particles by the micro-manipulator. In this paper, we proposed a neighboring-points confocal measurement method. This method measures the displacements at proximal two points simultaneously. This distance between proximal two points can be designed arbitrary from micrometer to millimeter order. Using these measured displacements data and the designed distance value, the attitude of the micro-manipulator can be calculated. To illuminate proximal two points, we implemented the birefringence prism that splits a pencil of rays into two beams. Moreover, this method can be applied to the relative position and attitude measurement. In this case, the half-mirror is formed on a part of the micro-manipulator. The displacements of the half-mirror surface and the sample surface are measured independently. We used the silicon nitride (Si_3N_4) membrane as the half-mirror. From the difference between these two displacements, the relative position and attitude can be obtained. We verified the principles of this proposed method and got the good results.

Key words: relative position, relative attitude, confocal displacement measurement, polarized beam, birefringence, MEMS

1. 緒 言

近年, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術は, ウェハ上での一体形成による微細加工技術の長所を活かした様々な高機能微小構造体を提供することが可能となっている。一体形成が可能であることから, 微小部品それぞれの位置姿勢関係を製造時に作り込み, 組み立てが不要である事も大きなメリットとなっている。この高機能微小構造物をウェハから取り出して機能部品として活用することができれば, 更に応用範囲を拡張する事が期待できる。しかしながら, 他部品との位置姿勢関係が不明になってしまう事から, この様な微小構造体の位置姿勢同時計測技術の確立が重要であると考えている。

我々は, 図1に示すようなMEMS技術によって作製したマイクロノズルやマイクロピンセットなどのマイクロマニピュレータを用いて, 微小異物を確実に除去する異物除去技術の確立を目指している^{1)~6)}。近年, 半導体集積回路や平面ディスプレイ等は集積化が進んでおり, 微小異物の致命性が益々高くなっている。具体的には, 平面ディスプレイでは $0.5\mu\text{m}$ 以上, 半導体集積回路においては $0.1\mu\text{m}$ 以上の大きさの異物が致命性を有する欠陥となる。この回路上の異物を確実に除去することで, 歩留まりは劇的に向上することが期待される。しかし, 洗浄で除去しきれない異物は, 物理的, あるいは化学的に付着しており除去は容易ではない。このようなサブミクロンオーダーの微小粒子をマイクロマニピュレータで操作するためには, マイクロマニピュレータと回路基板との相対的な位置と姿勢を高精度に非接触で計測して制御する技術が必要である。

非接触位置計測手法としては, 三角測量法や共焦点方式などのレーザ変位計測器が一般的であるが, これらは姿勢を同時に

Fig.1 Examples of micro-manipulator⁶⁾

計測することはできない。姿勢を同時に計測するためにはレーザ変位計測器を複数個用いることが必要となるが, マイクロマニピュレータは外形寸法が最大でも数mm程度の微小構造物であり, 従来のレーザ変位計測器を限られたスペースに複数個設置して用いることは不可能である。また更に, 微小構造物の回路基板との相対位置と姿勢を同時に計測する手法は無い。

そこで我々は, マイクロマニピュレータのような微小領域での相対位置姿勢計測手法として近接共焦点位置姿勢同時計測手法を提案する^{7),8)}。本手法は, 複屈折プリズム (Birefringence prism) を用いて, 数 μm ~ 数百 μm 程度の近接した2点にレーザを別々に照射し, その2点の焦点情報から独立して位置を計測し, 演算により傾きを算出することにより, 微小領域での位置と姿勢を同時計測する手法である。さらに, マイクロマニピュレータの一部に光学的に平坦性を保ちやすい窒化シリコン膜 (Si_3N_4 : 以降 SiN 膜と略す) によるハーフミラー部を形成することで, SiN 膜表面からの焦点情報も検出し相対的な位置と姿勢の同時計測を行う。

本報では, 提案するマイクロマニピュレータの近接共焦点位置姿勢同時計測手法の原理確認実験及び, これらの精度検証実験の結果について述べる。

2. 提 案 手 法

2.1 近接共焦点位置姿勢同時計測手法

図2は近接共焦点位置姿勢同時計測光学系の構成概略図である。

* 原稿受付 平成16年9月27日

** 正 会 員 香川大学大学院 (高松市林町新町 2217-20)

*** 学生会員 香川大学大学院

† 香川大学大学院

†† (株) 日立製作所 (東京都青梅市新町 6-16-3)

Fig.2 Schematic diagram of neighboring-points confocal measurement method

Fig.3 Relative position and attitude measurement method of micro-manipulator

本光学系では、光源にランダム偏光のレーザを使用している。光源から出射した光は光軸上のハーフミラーを透過した後、ウォラストンプリズム (Wollaston Prism) に入射する。ウォラストンプリズムは入射したランダム偏光の光線を複屈折の原理に基づき、p 偏光と s 偏光を既定の角度に分離することができる。この光線分離角はウォラストンプリズムの設計値により決まった値であり、このウォラストンプリズムを対物レンズの焦点面 a (図中の上側の焦点面) に設置することにより、p 偏光と s 偏光のそれぞれの光束を非常に狭い間隔の平行光軸で照射することができる。この 2 光束間の距離は、ウォラストンプリズムの光線分離角とレンズの焦点距離との組合せにより決定される。このようにして 2 光束を平行に照射し、試料面から反射した 2 光束を対物レンズによって再びウォラストンプリズムに入射させる。ウォラストンプリズムに入射した 2 つの偏光成分は、ウォラストンプリズムにより再び合成され同軸の光軸となり元の光路を戻す。そして、再びハーフミラーへ入射した光線は同様に透過光と反射光に分離される。ここで反射された光線を偏光ビームスプリッター (Polarizing Beam Splitter: PBS) によって再度 p 偏光、s 偏光に分離し、各偏光成分ごとに個別に集光レンズでピンホール上に集光する。このピンホールを試料表面での焦点位置と共役な位置に設置することで、各偏光成分を共焦点光学系と同様に変位計測することができる。本光学系では、ウォラストンプリズムと対物レンズをピエゾステージにより高精度に

Fig.4 Schematic diagram of experimental equipment

移動させて焦点位置を探索する事により、近接した 2 点での位置を同時に計測する。

図 2 中左下のグラフは、本手法による計測時に得られるフォトダイオードの受光強度の出力変化を模式的に表したものである。グラフの縦軸を対物レンズの移動量、横軸をフォトダイオードの出力値とすれば、このように p 偏光、s 偏光の各偏光成分の受光強度の変化を得ることができる。この各偏光成分の受光強度のピーク位置 P_p 、 P_s が試料面の合焦点位置である。各偏光成分について合焦点位置が検出されれば、その位置の差 $\Delta s = P_p - P_s$ を求めることができ、2 光束の照射間隔 d から傾き θ を以下の式(1)で算出する事ができる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta s}{d} \quad (1)$$

この 2 光束の照射間隔 d は、設計値もしくは事前にビームプロファイラなどで計測する事により既知であることから、この 2 点の位置の差 Δs と 2 点間の距離 d から傾きである姿勢 θ を算出することが可能である。

2.2 相対位置姿勢同時計測手法

図 3 に、前節の手法をマイクロマニピュレータと試料面との相対的な位置と姿勢を計測する方式へ拡張する構成を示す。

本手法では、薄膜形成技術によりマイクロマニピュレータの一部にハーフミラー部を形成し、ハーフミラー表面と試料面からの反射光を分離検出することで、マイクロマニピュレータと試料面との相対位置姿勢同時計測を行う。

図のようにピエゾステージにより合焦点位置を探索させると、それに伴って図中右のグラフのような受光強度の強度変化を得ることができる。この時、対物レンズの焦点がハーフミラー表面と試料面のそれぞれに合うことにより、受光強度の強度変化が図中の P_1 、 P_2 のような 2 つのピークをもつ。この 2 つのピークからハーフミラー表面の位置と試料面の位置をそれぞれ計測する事ができ、相対位置を算出することが可能となる。

実際の計測の際には、p 偏光、s 偏光の各偏光成分について計測を行い、ハーフミラーと試料面との相対姿勢を、式(1)を用いてそれぞれ算出する。ハーフミラーと試料面との相対的な位置

Fig.5 Design parameters of optical equipment

Fig.6 Profile of Intensity distribution of two beams

Fig.7 Intensity distribution of beam on focus

と姿勢を精密に計測するために、計測に用いるハーフミラーには光学的な平坦性と高い剛性が要求される。

3. 計測精度検証実験

3.1 実験光学系の光路設計

近接共焦点位置姿勢同時計測の精度検証を行うため、図4に示す装置を用いて実験を行った。本光学系では、合焦点位置を探索する際の対物レンズとウォラストンプリズムの移動に、静電容量センサ付ビューステージ（メーカー：Physik Instrumente 社 型式：P-721）を用いており、ストローク：100μm、分解能：1nm で高精度に対物レンズとウォラストンプリズムを移動させる事が可能である。

第2章の中で述べたように、2光束の照射間隔 d は対物レンズの焦点距離とウォラストンプリズムの光線分離角との組合せで決定される。しかし、市販されているウォラストンプリズムの分離角は5種類程度しかなく、対物レンズとの組合せだけでは任意の間隔に設計できない。そこで我々は、図4に示すように対物レンズとウォラストンプリズムの間にリレーレンズを設置することで、任意の間隔の設計を可能にした。以下に2光束の光路設計の方法について述べる。

図5は設計に用いる各部の値を示している。まず、光軸の設計は次のように行う。ウォラストンプリズムとリレーレンズ間の距離を s_1 、リレーレンズと対物レンズの焦点までの距離を s_1' とおくと、これらの関係はレンズの結像の関係と同じ式(2)で表される。

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_1'} \quad (2)$$

式中の f_1 はリレーレンズの焦点距離である。前述の通り2光束の照射間隔 d は、対物レンズの焦点距離 f_2 と光軸の交わり角 θ によって決定され、この交わり角 θ は s_1 、 s_1' とウォラストンプリズムの光線分離角 α から次の式(3)の関係で変化する。

$$s_1 \tan \alpha = s_1' \tan \theta \quad (3)$$

これを $\tan \theta$ について解くと、式(4)は次のようになる。

$$\tan \theta = \frac{s_1}{s_1'} \tan \alpha \quad (4)$$

この式(4)から求まる $\tan \theta$ から、最終的な2光束の照射間隔 d は次の式(5)から求めることができる。

$$d = 2f_2 \times \tan \theta \quad (5)$$

実際に光路設計を行う上では、2光束の照射間隔だけでなく対物レンズの開口数（N.A.）を考慮しなければならない。今回の実験では、2光束の照射間隔 $d=170\mu\text{m}$ 、対物レンズのN.A.=0.45となるように設計した。図6に示すのは、ビームアナライザ（メーカー：MELLES GRIOT 社 品名：BeamAlyzer™）を用いて計測した2光束の強度分布である。図に示すように、間隔 $d=170\mu\text{m}$ で2光束が集光していることを確認した。

続いて、計測精度に影響があると考えられるピンホール径の最適化について検討を行った。一般に強度 I_0 のビームの強度分布 $I(r)$ は下記の式(6)のガウス分布で表される。

$$I(r) = I_0 \cdot \exp\left\{-\frac{2r^2}{w^2}\right\} \quad (6)$$

ここで、式中の r はビームの中心からの距離、 w は集光半径であり、この集光半径 w はガウス分布の標準偏差 σ を用いると 2σ で定義されている。ビーム強度はこのガウス分布の積分値から求められるため、積分値の変化量が最大となるビーム径、即ち式(6)の微分値が最大となる径が最適なピンホール径となる。これを計算した結果、図7に示すように集光半径 w に対して半径 $w/2$ となるピンホールを用いれば、もっとも急峻な強度変化を得られることがわかった。この集光半径 w は次の式(7)で求められる。

$$w = 0.61 \frac{\lambda}{\text{N.A.}} \quad (7)$$

式中の λ はレーザの波長である。また、共焦点変位計測において合焦点位置を正確に求めるためには、焦点深度 z をより浅くすることが必要となる。次の式(8)は焦点深度 z の式である。

$$z = \frac{\lambda}{2(\text{N.A.})^2} \quad (8)$$

式(8)から、焦点深度 z はN.A.が高くなる、あるいは波長 λ が短くなるにつれ浅くなる事がわかる。このことから、高N.A.のレンズと短波長のレーザを用いて最適な径のピンホールを使用することで最高の計測精度になると考えられる。しかし、市販されているピンホールの最小径は1μmが限度である。そこで、本光学系は穴径1μmのピンホール（メーカー：メスグリオ 型式：04PPM002）を使用し、このピンホール径に対して最適なN.A.と波長を選択することとした。ここで、最適な集光径 $2w$ はピンホール径の倍、すなわち2μmとなる。集光半径 w と焦点深

Fig.8 An example of the position measurement result

Fig.9 An example of the attitude measurement result

Table 1 Experimental results of position and attitude measurement

Measurement item		Accuracy: 3σ
Position	p-polarized beam	0.18μm
	s-polarized beam	0.15μm
Attitude		0.06deg.

度 z は N.A. と波長 λ により決定することから、集光径 $w=2\mu\text{m}$ で焦点深度 z がより浅くなる N.A. と λ を選定する。この時、式(8)において焦点深度 z は N.A. の 2 乗に反比例するため、N.A. を高くすることで焦点深度 z を浅くする事が可能となる。本光学系では、集光レンズとして N.A.=0.42 のレンズを使用し、光源には $\lambda=632.5\text{nm}$ の HeNe レーザを用いた。

3.2 精度検証結果

本光学系の計測精度検証のため、図 4 に示すように試料面であるミラーをステージに取り付け、位置と傾きのそれぞれの姿

Fig.10 Fabrication sequence of SiN membrane

Fig.11 Reflected light intensity from SiN membrane and mirror

位を計測した。

まず、ミラーを直動ステージ（メーカー：Physik Instrumente 社 型式：P-733.2CL 分解能：1nm）に取り付けて変位計測を行った。この実験結果を次の図 8 に示す。図中のグラフは、ステージを $10\mu\text{m}$ ステップで $40\mu\text{m}$ 変位させていった様子を計測した結果である。グラフ下の波形はこの時の検出波形であり、図中に示されるようにステージの変位に応じて p 偏光側、s 偏光側共に検出波形の強度ピークの位置が右方向へ変化している事が確認できる。以上のような計測を 80 回行った結果、位置計測精度は p 偏光側が $3\sigma: 0.18\mu\text{m}$ 、s 偏光側が $3\sigma: 0.15\mu\text{m}$ となることを確認した。

続いて、ミラーを傾斜ステージ（メーカー：中央精機 型式：ATS-610-HM 分解能：0.001deg.）に付け替えて姿勢計測を行った結果を図 9 に示す。位置計測と同様に傾斜ステージを用いて 0.1deg. ステップで 1.0 deg. 変位させた。ステージ変位角が、図 9-a) の 0 deg. の状態と図 9-b) 1.0 deg. 変位させた状態で、p 偏光側、s 偏光側のそれぞれの検出波形の強度ピークの位置の間隔が、ミラーの傾きに依って大きくなっていくことを確認した。このような実験を 200 回行った結果、姿勢計測精度は $3\sigma: 0.06 \text{ deg.}$ になることを確認した。以上の計測結果を表 1 にまとめた。

4. SiN 膜の作成

マイクロマニピュレータの相対計測に使用するハーフミラーは、マイクロマニピュレータの位置と姿勢を正確に測定するために撓みを持たない事が望ましい。そこで我々は、相対計測に用いるハーフミラーを、窒化シリコン膜によってマイクロマニピュレータ基板に生成するプロセスを選定した。SiN 膜は、内部残留応力により引張り方向に応力が働く事が知られており、膜に撓みを生じにくいという特長を持つ。図 10 は SiN 膜の生成プロセスの概略図である。以下にプロセスの説明を示す。

Fig.12 Photograph of fabricated SiN membrane

- 表面を窒化したシリコン基板の片面にアルミニウム (Al) を蒸着する。
- アルミニウムの一部分を混酸溶液によって除去する。
- 残ったアルミニウムを保護膜にして SiN 層を RIE (Reactive Ion Etching: 反応性イオンエッチング) により除去する。
- シリコン層を ICP-RIE (Inductively Coupled Plasma-RIE: 高密度プラズマエッチング) によってシリコン層の膜厚が数十 nm 程度になるまで除去する。
- 残ったシリコンを水酸化カリウム (KOH) により除去する。
- 残りのアルミニウムを硫酸と過酸化水素水の混合液により除去する。

本プロセスでは、RIE の使用により直径が数 mm 程度の薄膜の形成が可能である。このときの膜厚は Si 基板上に生成した SiN 層の厚みによって決定される。SiN 層の形成には LPCVD (Low Presser Chemical Vapor Deposition) を用いており、数 nm の精度で膜厚の均一な薄膜を形成できる。

しかし、図 10 のプロセスで生成した SiN 膜の透過率と反射率の計測を行った結果、透過率 95% に対し反射率は 1% 程度であった。この状態では SiN 膜からの反射光量が微弱すぎるため、相対計測時にマイクロマニピュレータの位置の検出が不可能である。そこで、薄膜表面に金を蒸着し反射率を増加させた。

本手法による相対計測時において、SiN 膜からの反射光量 I_1 と試料表面からの反射光量 I_2 は等しいことが望ましい。しかし図 11 に示すように、ミラーからの反射光は SiN 膜裏面で再びミラー側へ反射されるため、ミラーからの反射光量が減少してしまう。このため、SiN 膜の吸収を無視した場合の理想的な透過率 T と反射率 R は下記の式(10)の関係になる。

$$T^2 = R \quad (10)$$

我々は、試験的に SiN 膜上に金を数パターンの膜厚で真空蒸着し、それぞれの膜厚での透過率と反射率を計測した。その結果、膜厚 5nm の金を蒸着した SiN 膜の透過率と反射率が、透過率 $T=39\%$ 、反射率 $R=16\%$ であり、式(10)の関係を満たす膜となった。図 12 は金蒸着を行った後の SiN 膜の写真である。

5. 相対位置姿勢計測実験

作製した SiN 膜を用いて相対位置計測実験を行った。図 13 に示すように、SiN 膜をミラーの前方に設置し、第 3 章の精度検証実験時と同じようにミラーを直動ステージに取り付け変位させた。図中のグラフは、実際にフォトダイオードで検出された検出波形の一例である。図 13-a)中の検出波形は、複数のピークを持っている。このうち、最初に現れたピークが SiN 膜からの反射光のピーク値であり、2 番目のピークがミラー表面からの反射光のピーク値である。続いて、図 13-a)の状態を基点としてミ

Fig.13 An example of the relative position measurement result

Fig.14 Measurement results at each displacement

Fig.15 An example of the relative attitude measurement result

Table 2 Experimental results of relative position measurement

Amount of displacement [μm]	Relative Displacement (Average) [μm]		Accuracy: 3σ [μm]	
	p	s	p	s
10	9.84	9.92	0.56	0.69
20	19.78	19.90		
30	29.75	29.91		

Table 3 Experimental results of relative attitude measurement

Average [deg.]	Accuracy: 3σ [deg.]
0.50	0.13

ミラーを図中下方向へ $30\mu\text{m}$ 変位させた。その結果が図 13-b)である。図 13-a)と 13-b)の検出波形グラフを比較すると、SiN 膜からの反射光のピーク位置は変化せず、ミラー表面からの反射光のピーク位置のみが変化している。このことから本手法による相対位置計測が可能である事が確認できた。

続いて、計測精度の検証のためミラーを $10\mu\text{m}$ ステップで $30\mu\text{m}$ 変位させ、各変位における相対的な変位量の計測を 20 回行った。この時検出された相対位置を図 14 に示す。グラフの横軸はステージの変位量を、縦軸は検出変位を表しており、それぞれの変位での検出値の平均値、最大値、最小値を示している。さらに、これらの計測結果を表 2 にまとめた。この精度検証の結果、相対位置計測精度は p 偏光側が $3\sigma:0.56\mu\text{m}$, s 偏光側が $3\sigma:0.69\mu\text{m}$ であった。

次に、相対姿勢計測実験の結果を述べる。図 15 に示すようにミラーの角度を 0.5 deg 変位させ、その計測結果から相対姿勢を算出した。図中の検出波形のグラフが示すように、姿勢計測においてもミラー面の変位のみを検出している。このような計測を 20 回行った結果、表 3 に示す相対姿勢の計測結果は、平均値で 0.50 deg 、計測精度は $3\sigma:0.13\text{ deg}$ となった。以上の結果から、本手法による相対位置姿勢計測が可能であることを確認した。

本手法の計測精度を更に高精度にする為には、第 3 章第 1 節において述べたように、サブミクロンオーダーの極微小な穴径を有するピンホールを用いれば良い。この場合、N.A.の高いレンズの使用が可能となり、焦点深度が浅くなることから更なる高精度計測が可能となる。

さらに、本手法における姿勢計測の計測方向は 1 方向であるが、複数の光源を用いたマルチプローブ式の光学系を構築すれば、多方向の姿勢同時計測が実現可能である。

6. 結 言

マイクロマニピュレータの相対位置姿勢同時計測手法として、近接共焦点位置姿勢同時計測手法を提案した。

本手法は、複屈折プリズムによって直行する 2 つの偏光成分の分離を行い、数 μm ～数百 μm 間隔の 2 点の変位計測を行うことで、マイクロマニピュレータのような微小構造物の位置と姿勢を同時計測することが可能である。さらに、マイクロマニピュレータ基板上にハーフミラーを形成することで、本手法を用いてマイクロマニピュレータと試料面との相対的な位置と姿勢を同時に計測することが可能である。相対計測に用いるハーフ

ミラーには窒化シリコン薄膜を用い、金を蒸着することで計測に適した透過率と反射率を実現した。以上のようにして設計した光学系により相対位置姿勢同時計測の原理確認を行った(相対位置計測精度: $0.69\mu\text{m}$, 相対姿勢計測精度: 0.13deg)。

本手法は極微小領域での相対位置姿勢を同時計測できることから、MEMS 技術などにより作成された微小構造物の制御技術に広範囲に適用が可能である。例えば、マイクロマニピュレータは基板という制約空間から 抜け出し、単体の機能部品としての実用性を得ることが可能になると考えている。

謝 辞

本研究は、産学官連携イノベーション創出事業費補助金(独創的革新技術開発研究提案公募制度)[研究期間: H13～H15 題目: IT デバイス高効率生産のためのナノ異物除去技術に関する研究 課題番号: 13103] の助成を受けて行われた。また、本文中の SiN 膜の製作に当たり、香川大学の大学院生三宅政仁君、八木実君、山本淳也君の助力があったことを付記し、感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) H. Kobayashi, I. Ishimaru, F. Oohira, G. Hashiguchi, A. Hayashi, S. Kaio: A Proposal of Variable Phase-Contrast Microscope for Nano Geometry Measurement, Proc. of ASME 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation (2002JUSFA), 3 (2002) 1317.
- 2) Y. Yokomizo, I. Ishimaru, G. Hashiguchi, Y. Mihara: Proposal of Positioning Method for Nano-Particle Manipulator, Proc. of ASME 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation (2002JUSFA), 1 (2002) 363.
- 3) A. Hayashi, F. Oohira, I. Ishimaru, S. Hata, H. Kobayashi, S. Kaio, M. Minami: Experimental confirmation of the variable phase-contrast microscope using piezo-electric actuator, Proc. of 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation (2002JUSFA), 3 (2002) 1321.
- 4) 兵頭亮治, 石丸伊知郎, 大平文和, 林 明宏, 海生祥生: 可変位相差顕微鏡によるナノ立体形状計測の提案, Optics Japan 2002 講演予稿集, (2002) 216.
- 5) Y. Inoue, I. Ishimaru, G. Hashiguchi: Position and Attitude Measurement for Micro Manipulator by Diffracted Light Probe, Proc. of the XVII IMEKO World Congress, (2003) 2008.
- 6) 矢木 実, 吉村英徳, 石丸伊知郎, 大平文和, 橋口 原, 三原 豊: 微小異物付着力計測のためのマイクロビームセットに関する研究, 日本機械学会 IIP2004 講演論文集, 4,7 (2004) 135
- 7) 小林宏明, 石丸伊知郎, 橋口 原, 三宅政人, 山本淳矢: 近接共焦点手法による MEMS の相対位置計測手法, 2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2003) 473.
- 8) Hiroaki Kobayashi, Ichirou Ishimaru, Yutaka Mihara, Fumikazu Oohira, Gen Hashiguchi and Seiji Hata: Measurement of Relative Position and Attitude of Micro-manipulator by Neighboring-points Confocal Measurement Method, Proc. of Optical MEMS 2004, (2004) 138.