顕微作業用 XYθ 小型自走機械の開発(第4報)*

—補正手法の改良と補正実験—

瀧脇大海** 大田明博*** 見崎大悟† 岩田 太†† 臼田 孝*** 青山尚之**

Development of Versatile Micro Robot for Microscopic Operation (4th report)
-Improvement of the Motion Compensation and Experimental Results -

Ohmi FUCHIWAKI, Akihiro OHTA, Daigo MISAKI, Futoshi IWATA, Takashi USUDA and Hisayuki AOYAMA

In this paper, we describe improvement of compensation sequence and results of the motion compensation for the versatile micro robot. In order to provide microscopic operation, the unique locomotion mechanism which is composed of four piezoelectric actuators and two electromagnets is proposed. Here two legs arranged on cross each other are connected by four piezoelectric actuators so that it can move in any directions, i.e. in X and Y directions as well as rotate at the specified point precisely with the manner of an inchworm. Moreover the combination of particular wave forms of piezoelectric actuators can provide “arc trajectory motion with facing center”, that is important for the micro manipulator to keep its tip end within the microscopic view area. In previous report, we have proposed the competitive compensation method supported by CCD camera based tracking system and confirmed the effectiveness from several experiments. However, we have also confirmed that we could not compensate straight motions in forward, back, right and left directions because of the assembling error of the four piezoelectric actuators and two electromagnets. In this report, we propose the unique mechanistic model which allows the assembling error to improve the compensation method. In the compensation experiments, we succeed in reducing the motion errors and confirm the effectiveness of newly developed compensation method. The design procedure, basic performance and biomedical application of this tiny robot are also discussed to open the new field for micro-robotics in precision region.

Key words: versatile micro robot, piezoelectric actuator, electromagnet, microscopic operation, competitive compensation method, mechanistic model, assembling error

1. 緒 言

筆者らの研究グループでは、これまでに様々な微細作業機器を搭載した1立方インチサイズの小型精密自走機構を多数用い、卓上で精密作業するシステムについて報告してきた。これまで顕微鏡下での微細作業システムは、従来の据え置き型の精密位置決め装置を用いて、各種作業機器の位置決めを行っていた²⁾。筆者らはこれらの精密位置決め装置を小型ロボットに置き換えることが出来れば、ガイドに束縛されることなく自在に位置決めができるため、システムの柔軟性が高くなり、さらに搭載する精密機器の交換や複数台での協調作業により、実施できる複合微細作業の種類が飛躍的に増大する可能性があると考えている³⁾。前報までに、図1で示されるようなXYθに独立な移動自由度を有するXYθ小型自走機構を提案し、全方向への並進動作や任意点での回転動作が可能であることを示した⁴⁾⁵⁾。さらに、圧電素子の組み付け誤差や性能のばらつきにより移動性能が均一でなく、動作精度を補正するシステムが必要であることを指摘した。汎用サイズの移動ロボットの自立式移動誤差補正方法は、自立測距式や車輪回転計数式デッドレコニング法など多数報告されているが、本機構のような超小型の精密移動機構についての移動誤差補正法についてはほとんど例がない。一自由度の超小型精密移動機構の場合には外部の位置計測器を用いた閉ループにより、誤差を補正しているものがほとんどである⁶⁾⁷⁾。特に本機構は平面内で三自由度を有するため、機構上に閉ループを構成するためには、数 cm サイズの三軸の超精密位置計測器の開発が必要であり技術的な課題が多い。外部の位置計測器を用いて閉ループを構成する場合も、位置計測系

Fig.1 Structure of versatile micro robot

自体のサイズが大きくなり、本機構の超小型サイズの利点を十分に生かすことが出来ない。以上の理由より、本研究では開ループ制御時の動作精度を出来る限り向上させることをまず始めの目的としている。前報では機構の動作解析を詳細に行い、実験データに基づいて圧電素子に加える正弦波の振幅値を逐次調整する繰り返し補正システムを提案した⁸⁾。実験結果より斜め四方向とその場回転では動作補正が可能であるが、圧電素子の変位の作用方向の誤差を機構モデルで考慮していないために、前後左右の直進動作では原理的に動作補正できないことを確認した。本報では前報で問題になっていた前後左右の直進動作の補正を行うために、圧電素子の変位の作用方向の誤差を考慮した新しい機構モデルを提案する。さらに補正実験を行うことで、その有効性や問題点を明らかにすることを目的としている。

2. 補正システム

2.1 機構の構成と動作原理

本機構は図1で示されるように二つのコの字型電磁石を交差させ、その間に四つの圧電素子を挟みこんだシンプルな構成である。本機構は二つの電磁石を交互に着脱し、それと同期させて圧電アクチュエーターを伸縮させることで、尺取虫の原理で動作する。四つの圧電アクチュエーターの振幅値を適切に選べばXYθの三自由度をホロノミックに超精密微動可能である。四つの脚のうち一本は、高さ調節機構を有し、スムーズな四点接地を可能としている。

* 原稿受付 平成 19 年 2 月 8 日

** 正 会 員 電気通信大学 (調布市調布ヶ丘 1-5-1)

*** 正 会 員 産業技術総合研究所 (つくば市梅園 1-1-1 中央第三)

† 正 会 員 静岡理科大学 (袋井市豊沢 2200-2)

†† 正 会 員 静岡大学 (浜松市城北 3-5-1)

2.2 パラメーターの定義

ここでは、本機構の動作を表現するために必要なパラメーターの定義を行う。まず始めに、本機構の一步の動作と半歩の動作の定義を行う。図 2 のような一周期分の動作を一步と定義する。この時、 $t=T/2$ の時点、つまり半周期において、四つの圧電素子の変位が 0 に戻り、一步の動作の半分の動作をしていることが分かる。そのため、 $t=T/2$ までの動作を半歩と定義する。次に、本機構が半歩動作したときの各種パラメーターの定義をする。図 3 に示すように、半歩での姿勢変化量を $\Delta\theta$ 、移動距離を w 、移動方向を ϕ とし、その時に決まる円弧の中心点を D、D の方向を ϕ 、半径を R と定義する。

2.3 補正式

本論文では前報と同じ単純な原理の補正式を提案する。

$$V_k' = V_{ke} \times \frac{A_k}{A_{ke}} \dots \dots (1)$$

(K = F, B, R, L)

ここで V_{ke} は実験時の圧電素子 PZT-K へ入力する正弦波信号の振幅の電圧値とし、 V_k' を補正後の電圧値とする。圧電素子の伸縮量の理論値 A_k と実験値 A_{ke} との比を、 V_{ke} に掛けることで新たな電圧値 V_k' を算出する。そして、繰返し式(1)を適用することで、電圧値を最適値に収束させる。ただし、脚が固体接触で走行面を移動するため、摩擦の効果による影響が予想されるが、この影響が無視できると仮定している。実際には、実験値は測定器の精度により大きく左右されるため、高精度な位置測定器を使用しなければならないことは言うまでもない。後述するように本実験では実体顕微鏡を用いた 2 次元位置測定システムを使用するが、この精度は高くないため、ここでは提案する補正方法の有効性を確認することを目的とする。また当然、走行面の不均一性、圧電素子の個体差やヒステリシス現象、給電線等の影響があり、この補正式だけでは補正の限界があると言え、補正の限界を決めている主要因を明らかにすることも目的の 1 つとしている。

2.4 機構モデルの改良

次に、XYθ 小型自走機械の機構モデルの改良を行う。まず始めに前報で提案した機構モデルを図 4 に示す。図 4 において電磁石 A は励磁しており、電磁石 B は励磁していないとする。さらに同図左では、励磁していない電磁石 B が、四つの圧電素子の伸縮により、半歩分変位する時の様子が示されている。

- (1) 図 4 において、4 つの圧電素子の中心を通る直線により作られる正方形の一边を $2L$ 、正方形の中心点を C と定義する。さらに、正方形の四つの頂点のうち、励磁していない電磁石脚 B 上にある 2 点を K_1 、 K_2 と定義する。
- (2) 図 4 において、半歩移動後の C、 K_1 、 K_2 の位置を、それぞれ C' 、 K_1' 、 K_2' と定義する。さらに、 K_1 の X 方向の変位は、圧電素子 F の変位 A_F と等しく、Y 方向への変位は圧電素子 R の変位 A_R に等しいと定義する。一方、 K_2 の X 方向の変位は圧電素子 B の変位 A_B の逆変位 $-A_B$ と等しく、Y 方向の変位は圧電素子 L の変位 A_L の逆変位 $-A_L$ と等しいとする。

この機構モデルを用いた場合の 4 つの圧電素子の変位の理論値 A_k は、前報⁸⁾において導出している。

$$\begin{cases} A_F = w \cdot \cos \phi - L \cdot \Delta \theta \\ A_B = -w \cdot \cos \phi - L \cdot \Delta \theta \\ A_R = w \cdot \sin \phi + L \cdot \Delta \theta \\ A_L = -w \cdot \sin \phi + L \cdot \Delta \theta \end{cases} \dots \dots (2)$$

この機構モデルでは、四つの圧電素子の変位の作用方向の誤差は考慮されておらず、それぞれの圧電素子はまっすぐに電磁石上の作用点 K_1 、 K_2 を変位させることができるとしている。そのため前方へ直進するためには、左右の圧電素子を同

Fig.2 Motion Sequence of versatile micro robot

Fig.3 Definition of parameters at a half step

Fig.4 Previous geometric model at a half step

じ振幅値かつ逆位相で伸縮させれば、正確に直進できることになる。この機構モデルを用いた場合の八方向への直進動作の補正実験の結果を図 5 に示す。比較のため同図左に圧電素子の入力電圧を 100V とした場合の軌跡を示す。×印は目標地点を示す。斜め四方向では測定系の分解能までの補正が可能であったが、前後左右の直進動作では、姿勢と移動方向の誤差を補正することが出来なかった⁸⁾。この理由は次のよう

に考えることが出来る。式(2)に前進動作のパラメーター($\phi=90^\circ$, $\Delta\theta=0^\circ$)を代入すると、前後の圧電素子の変位の理論値 A_F , A_B は0になる。式(1)の分子が常に0となるため、何回補正しても前後の圧電素子の変位は0となる。そのため前進動作では左右の圧電素子のみの調整となる。しかし実際には、組み付け誤差や機構の歪により、圧電素子の変位の作用方向に誤差が生じる。そのため左右の圧電素子のみでは、原理的に正確な前進動作をさせることが出来ない。本論文では圧電素子の変位の作用方向の誤差を考慮するために新たな機構モデルを定義する。

- (1) 図6のように前後左右への直進動作において、向かい合う二つの圧電素子の変位を調節して、姿勢変化が0となる移動方向を固有角度と定義し、それぞれ ϕ_F , ϕ_B , ϕ_R , ϕ_L とする。
- (2) 図7のように、四つの固有角度によって作られる斜行座標系に沿うように、対応する圧電素子は作用点 K_1 , K_2 を変位させる。

図8に前方方向の固有角度 ϕ_F の実験結果を示す。この図では、左右の圧電素子に入力する正弦波信号の振幅電圧値 V_R , V_L の調整回数を横軸としている。図2に示す一連の動作を1歩として、100歩動作させたときの姿勢変化量 $\Delta\theta$ を減じるように V_R , V_L を調節することで、 ϕ_F を得ている。姿勢変化量 $\Delta\theta$ が、今回用いた測定システムの角度分解能である $\pm 0.01^\circ$ 度以内に入ったときの移動方向 ϕ を固有角度とした。固有角度の計測結果を表1に示す。この結果より、圧電素子の変位の作用方向に誤差が無いとした場合の理想的な固有角度と比較して、最大で14度程度のずれがあることが分かる。

2.5 四つの圧電素子の伸縮量の理論値

式(2)は直交座標に沿って圧電素子の変位が K_1 , K_2 に作用すると考えた場合の理論値 A_k であるが、今回の機構モデルを用いた場合の圧電素子の変位 A_k' は、 A_k を図7のような斜行座標に変換することで得ることが出来る。

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} A_R' \\ A_F' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_x & \cos \phi_y \\ \sin \phi_x & \sin \phi_y \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} A_R \\ A_F \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} A_L' \\ A_B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_x & \cos \phi_y \\ \sin \phi_x & \sin \phi_y \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} A_L \\ A_B \end{pmatrix} \end{cases} \dots (3)$$

$$\begin{cases} \text{First quadrant: } \phi_x = \phi_R, \phi_y = \phi_F \\ \text{Second quadrant: } \phi_x = \phi_L - \pi, \phi_y = \phi_F \\ \text{Third quadrant: } \phi_x = \phi_L - \pi, \phi_y = \phi_B - \pi \\ \text{Fourth quadrant: } \phi_x = \phi_R, \phi_y = \phi_B - \pi \end{cases}$$

Fig.7 Improved geometric model at a half step

Number of tuning	0	1	2	3	4
V_R [V]	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
V_L [V]	50.0	36.0	43.0	39.5	38.3

Fig.8 Experimental results of unique angle (ϕ_F , 100 steps, 20Hz)

Table.1 Experimental results of 4 unique angles

	Unique Angle (Ideal) degree
ϕ_F	104.1 (90.0)
ϕ_B	275.4 (270.0)
ϕ_L	173.3 (180.0)
ϕ_R	351.3 (360.0)

2.6 四つの圧電素子の伸縮量の実験値

図9に本機構の移動軌跡の幾何解析図を示す。ここで、 C_0 を初期位置、 θ_0 を初期姿勢角度、 n 歩動作後の位置を C_n 、姿勢角度を θ_n 、 Θ を姿勢変化量、 H を理想的な動作をした場合の経路長、 ρ を初期位置での併進移動方向とする。前報⁸⁾において図9を用いた場合、実験時の半歩の姿勢変化量 $\Delta\theta$ は $\Theta/(2n)$ 、移動距離 w は $H/(2n)$ 、移動方向 ϕ は $\rho - \theta_0 - \Theta/2$ となることを説明した。これらを式(2)に代入することで、実験時の圧電素子の変位量 A_{k0} を下記のように求めることが出来る。

$$\begin{cases} A_{Fe} = \frac{H}{2n} \cdot \cos\left(\rho - \theta_0 - \frac{\Theta}{2}\right) - L \cdot \frac{\Theta}{2n} \\ A_{Be} = -\frac{H}{2n} \cdot \cos\left(\rho - \theta_0 - \frac{\Theta}{2}\right) - L \cdot \frac{\Theta}{2n} \\ A_{Re} = \frac{H}{2n} \cdot \cos\left(\rho - \theta_0 - \frac{\Theta}{2}\right) + L \cdot \frac{\Theta}{2n} \\ A_{Le} = -\frac{H}{2n} \cdot \cos\left(\rho - \theta_0 - \frac{\Theta}{2}\right) + L \cdot \frac{\Theta}{2n} \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

図 7 の機構モデルを使用した場合の圧電素子の変位の実験値 A_{ke}' は、理論値と同様にして A_{ke} を斜行座標に変換することで得ることが出来る。

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} A_{Re}' \\ A_{Fe}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi_x & \cos\phi_y \\ \sin\phi_x & \sin\phi_y \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} A_{Re} \\ A_{Fe} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} A_{Le}' \\ A_{Be}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi_x & \cos\phi_y \\ \sin\phi_x & \sin\phi_y \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} A_{Le} \\ A_{Be} \end{pmatrix} \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

3. 補正実験

3.1 実験方法

前述した補正式の有効性を検証するために、図 1 に示すような XYθ 小型自走機械を用いて補正実験を行った。なお積層型圧電素子 (NEC/TOKIN AE0505D08) と電磁石脚 (3%ケイ素鋼) は、アクリル樹脂の三角柱の部材を介してエポキシ樹脂系接着剤で接着されている。圧電素子は 100V の電圧を印加すると $6.1 \pm 1.5 \mu\text{m} (\pm 25\%)$ の変位をするため、出来る限り特性のそろったものを選択して使用し $\pm 10\%$ の範囲に収まるようにしている⁹⁾。しかし特性を完全に一致させることができないため、同一の電圧入力に対して四つの素子の伸縮量が異なり、並進移動と回転移動の干渉が生じることになる。図 10、図 11 に示すように高輝度 LED を本機構に設置し、上部より実体顕微鏡により拡大観察し、CCD カメラを介して画像解析装置 (エムテック ビデオトラッカー MVA2000) により重心位置を計測することで、本機構の幾何学的中心点 C の二次元位置と姿勢角度 θ を計測した。実験の手順は、まず始めに本機構の初期位置 C_0 と初期姿勢角度 θ_0 を取得し、次に本機構を所定の歩数 n だけ動作させ、動作後の位置 C_n と姿勢角度 θ_n を取得する。そして、動作実験時の圧電素子の伸縮量を式 (4) と式 (5) を用いて逆算する。さらに、式 (1) を適用して入力信号の調整を行う。この手順を連続的に行なう。入力信号は PC に搭載された DA ボード (Interface PCI-3329) により入力され、画像解析装置からの測定データを用いて、自動的に正弦波信号の振幅値電圧の補正が行われている。今回の測定系の光学的な最小読みとり値は $2.5 \mu\text{m}$ 程であるが、画像解析装置の計測処理の不確かさにより、誤差が $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 程あることを実験により確認した。そのため、実験的な分解能は $5.0 \mu\text{m}$ 程である。今回は補正実験の対照とする動作として、前後左右への並進動作を選択した。以下の実験では、すべりの影響を考慮しなくて良い 100Hz の周波数で動作させている。走行面は 3%ケイ素鉄の板材を研削仕上げしたものをを用いており、平均の表面粗さは Rz 0.8 程度である。次に実験結果について述べる。

Fig.12 Relation between number of compensation and motion errors ($\phi = 90[\text{degree}]$, 150 steps)

Fig.9 Trajectory analysis

Fig.10 Experimental set up

Fig.11 Measuring points and definition of C_n and θ_n

3.2 併進動作の補正実験

提案した補正手法の有効性を確認するため、150 歩ごとに補正式を適用し六回連続で補正を行った。ただし観察画面のサイズの制約から、三回連続で補正を行った後、補正なしで初期位置周辺に動作させてから、三回目の補正電圧を初期値として、残りの三回の補正を連続で行った。なお移動方向 ϕ の目標値を 0 度、90 度、180 度、270 度、図 2 の半周期での移動距離である半歩幅 w の目標値を $1.0 \mu\text{m}$ 、 $1.5 \mu\text{m}$ 、半歩での姿勢変化量 $\Delta\theta$ の目標値を 0 度としている。また、本機構の移動誤差を表すため、並進移動方向 ϕ の誤差を $\delta\phi$ 、移動前後での姿勢の変化量を $\delta\Theta$ 、経路長 H の誤差を δH と定義した。実際には四方向すべてについて補正実験を行ったが、どの方向も同様な結果となったため半歩幅の設定値 $1.0 \mu\text{m}$ の時の前進方向の結果のみを図 12 に示す。実験結果より、三つの誤差全てが補正を繰り返すたびに減少していくことが確認された。ただし、最初の三回の補正を Work1、次の三回の補正を Work2 としている。表 2 に六回の補正作業のうち最も誤差が小さかった動作の目標点と最終到達点との経路誤差を示す。半歩幅の設定値 $1.0 \mu\text{m}$ において、最も誤差が小さかった $\phi = 180$ 度で約 $0.7 \mu\text{m}$ 、最も誤差の大きかった $\phi = 270$ 度において約 $4.8 \mu\text{m}$ であった。これらを経路長に対する比率にすると 0.2% と 1.6% になる。半歩幅 $1.5 \mu\text{m}$ においては、最も誤差の小さかった $\phi = 90$ 度で約 $0.1 \mu\text{m}$ 、最も誤差の大きかった $\phi = 270$ 度において約 $4.0 \mu\text{m}$ であった。これらを経路長に対する比率にすると 0.02% と 0.9% になる。測定系の実験的な分解能が $5.0 \mu\text{m}$ であることから、測定系の分解能により補正の限界があると考えられる。前回の機構モデルを用いた補正実験の結果が、半歩幅 $1.0 \mu\text{m}$ において最も誤差の大きかった $\phi = 90$ 度において 22.6%、半歩幅 $1.5 \mu\text{m}$ において最も誤差の大きかった $\phi = 90$ 度において 13.3% であったことから、十四分の一程度の誤差の低減に成功した⁸⁾。ただし、図 12 で確認できるように、Work1 の最後の動作と Work2 の最初の

Table.2 Best results of positioning errors among 6 times compensation
(*: Absolute value, **: Ratio of positioning error to path length)

	Positioning error* μm (± 2.5)(Ratio %**)	
	w=1.0 μm	w=1.5 μm
Forward($\phi=90^\circ$)	1.0{0.3}	0.1{0.02}
Back($\phi=180^\circ$)	0.7{0.2}	0.7{0.2}
Left($\phi=270^\circ$)	4.8{1.6}	4.0{0.9}
Right($\phi=0^\circ$)	1.8{0.6}	2.2{0.5}
Average	2.1{0.7}	1.8{0.4}

Table.3 Experimental results of distance errors between last motion of Work1 and initial motion of Work2

	Distance error μm (± 2.5)
	w=1.0 μm
Forward($\phi=90^\circ$)	10.6
Back($\phi=180^\circ$)	6.3
Left($\phi=270^\circ$)	6.1
Right($\phi=0^\circ$)	18.4
Average	10.35

Fig.13 Compensation results of straight motion in 4 directions (1000 steps)

動作は同じ信号電圧を用いているため、全ての誤差が一致することが理想的であるが、完全には一致しなかった。表3に半歩幅の設定値1.0 μm におけるWork1の最後の動作とWork2の最初の動作の最終到達点間の距離誤差を示す。この表より、最も誤差の大きかった $\phi=0^\circ$ で18.4 μm 程の距離誤差が発生していることがわかる。測定系の分解能が5.0 μm であることを考慮すると、この原因は鉄床面の不均一性、配線の張力、機構の歪などの外乱であるといえる。以上の結果より、補正の下限は測定系の分解能により定まるが、補正の上限は外乱により定まると言える。図13に補正前後の機構の中心点Cの前後左右方向への並進動作の移動軌跡を示す。比較のため同図左に圧電素子の入力電圧を100Vとした場合の軌跡を示す。×印は目標地点を示す。この実験では図10のように画像解析装置を用いて、1秒ごとに本機構の挙動を計測し、設定歩幅は1000歩としている。これらの実験結果からも、前後左右の移動軌跡が大幅に改善されることが分かる。紙面の都合上割愛したが、姿勢変化の誤差は、補正前で最大 ± 2 度程あったが、補正後は全ての方向で ± 0.25 度以下に抑えられることが確認された。以上の実験結果より今回提案した補正式は、これまでに問題となっていた前後左右の直進動作において有効であることを確認した。

4. 結 言

本論文ではまず始めに、本機構の動作精度を向上させるためには動作補正システムが必要であることを述べた。次に、前回提案した機構モデルを用いる場合、原理的に前後左右の直進動作の動作補正が行えないことを説明した。そこで圧電素子の変位の作用方向の誤差を含んだ機構モデルを提案し、実際に補正実験を行うことで次のことを確認した。

(1) 新しく定義した機構モデルを用いれば、前後左右方向の直進動作において、移動方向、姿勢変化、経路長の全ての誤差を減少させることができ、前回の補正システムと比較して、前後左右の直進動作において目標点と最終到達点との経路誤差を十四分の一程度に低減出来ること。

(2) 新しく開発した補正システムの補正の下限は測定系の分解能により定まり、上限は外乱の影響により定まること

今後は、補正手法の改良、機構の改良、高精度な位置計測器を用いた閉ループ制御系の開発により、さらに高精度な動作を実現する。また、本機構を顕微受精や精密マニピュレーション実験に応用することで、有効性や問題点を検証していく。

謝 辞

本研究の一部は、平成16年度産業技術研究助成事業の一環として進められた。関係者の研究支援に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 青山尚之, 加藤秀剛: 小型自走機械群による超精密生産機械システム(第2報)-精密点描加工と遠隔制御-, 精密工学会誌, 64, 12, (1998)1796.
- 2) K. Tsuchiya, A. Murakami, G. Fortmann, M. Nakao and Y. Hatamura: Micro assembly and micro bonding in Nano Manufacturing World, Part of the SPIE Conference on Microrobotics and Microassembly, 3834, (1999)132.
- 3) S. Fatikow, U. Rembold and H. Worn: Design and control of flexible microrobots for an automated microassembly desktop-station, Proc. of SPIE, 3202, (1999)66.
- 4) 淵脇大海, 庄司裕一, T. Chomchana, 青山尚之: 顕微作業用XY θ 小型自走機械の開発(第1報)-機構の開発と基本動作-, 精密工学会誌, 68, 3, (2002)403.
- 5) 淵脇大海, 庄司裕一, 青山尚之: 顕微作業用XY θ 小型自走機械の開発(第2報)-円弧動作の解析と動作実験-, 精密工学会誌, 69, 1, (2003)69.
- 6) 樋口俊郎, 渡辺正浩, 工藤譲一: 圧電素子の急速変形を利用した超精密位置決め機構, 精密工学会誌, 54, 11, (1988)2107.
- 7) J. M. Breguet, E. Pernet, R. Clavel: Stick and slip actuators and parallel architectures dedicated to microrobotics, Proc. SPIE, 2906, (1996)13.
- 8) 淵脇大海, 庄司裕一, 青山尚之: 顕微作業用XY θ 小型自走機械の開発(第3報)-補正手法の提案と補正実験-, 精密工学会誌, 70, 1, (2004)86.
- 9) NEC/TOKIN 積層圧電アクチュエータカタログ Vol.02.