

ナノメータ切削装置のための位置決め機構の開発 —誘導電荷による圧電素子の変位制御—

Development of Precision Positioning Device for Nanometer Cutting

代表研究者 豊田工業大学大学院工学研究科 助教授 古谷克司
Associate Professor, Graduate School of Engineering, Toyota Technological Institute
Katsushi FURUTANI

This report deals with an xyz-stage for a nanometer cutting device by using a Stewart platform type parallel mechanism with 6 degrees of freedom. Stacked piezoelectric actuators are used to change link length in a prototype. The movable range of the prototype is 100 μm in the x and y directions and 20 μm in the z direction. The table motion is controlled by the induced charge feedback. The displacement of the prototype can be controlled by the induced charge feedback control as well as by the displacement feedback control. The motion error is 16 nm in the z direction. This stage is applied to a positioning device of an atomic force microscope (AFM). The grooves of a diffraction grating are observed with good linearity.

1. 研究目的

近年, 先端技術に用いられる要素部品では, 要求される加工精度がマイクロメータからナノメータオーダーになりつつある。このような領域における加工現象を解明するために, 原子間力顕微鏡(AFM)などの走査型プローブ顕微鏡を用いたナノメータスケールの加工に関する研究が盛んに行われている。これまでに, 摩擦顕微鏡の構造を持つ評価装置を試作した例があるが, 試料の微動には市販の AFM と同様にチューブ型の圧電素子を用いていた。一般に用いられているトライポッド型やチューブ型圧電素子は 3 自由度しか持たないため, 軸間の干渉を回避することができない。しかし, スチュワート型パラレル機構は 6 自由度を持つため, 干渉を回避でき高い運動精度を持つことが期待できる。

一方, 代表研究者らは圧電素子の両端に貼り付けた導体に生じる誘導電荷をフィードバックすることで, 圧電素子の変位を制御する方法を提案している。この方法では, アクチュエータ近傍に付加する要素は検出用電極だけであるので, 変位センサにより装置の大きさが制約されることがないという利点を持つ。そのため, パラレル機構の持つ高応答性を損なうことなく, 実装可能である。本研究では, ナノメータ加工と測定が同一機上で行える走査型プローブ顕微鏡のための微動テーブルを試作することを目的とする。本報告では, まず, 誘導電荷を用いて圧電素子の変位を測定する方法を紹介する。次に, 試作したテーブルの構造と性能について述べる。最後に, AFM に適用した結果について述べる。

2. 研究経過

2. 1. 変位の測定原理

本測定法を積層型圧電素子に適用する場合の原理を図 1 に示す。破線で囲んだ部分が圧電素子で, 斜線

部は圧電性を持たない絶縁体である。積層型圧電素子は, 圧電体の薄板と内部電極とが交互に重ねられた構造を持つ。圧電素子の両端にその内部電極と平行に検出用電極を設置する。圧電素子に電源より電圧を印加すると, 内部電極に電荷が充電される。最も外側の内部電極に対向して検出用電極が設置されているため, 検出用電極には誘導電荷が発生する。これらの誘導電荷は静電誘導によって生じるものであるため, 内部電荷に比例すると考えられる。内部電荷と変位は比例するので,

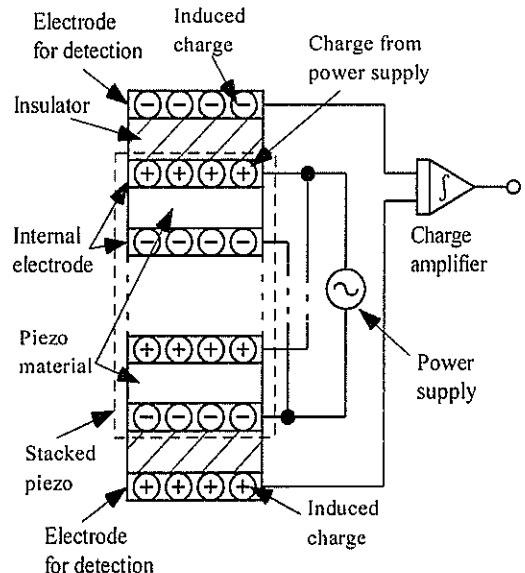


Fig. 1 Principle of displacement measurement by using induced charge

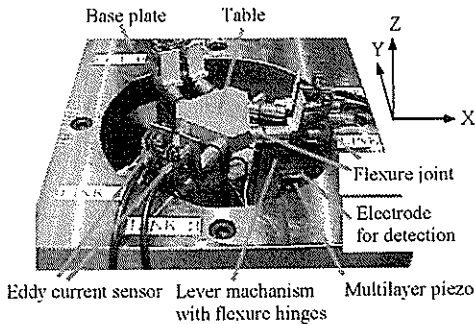


Fig. 2 Appearance of prototype

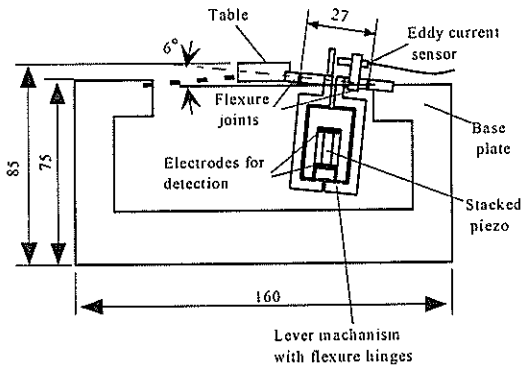


Fig. 3 Sectional view of prototype

誘導電荷と変位も比例する。したがって、誘導電荷を測定することで、圧電素子の変位を検出することができる。

2.2 ステージの構造

試作したステージの外観を図 2 に、断面を図 3 に示す。微動テーブルが 6 本のリンクで支持されている。各リンクは圧電素子により伸縮される。全体の寸法は $160 \times 160 \times 85\text{mm}$ である。微動テーブルの質量は 24g である。走査速度が高く取れるように xy 方向の剛性を高め、高い z 軸方向の分解能が得られるように、リンクの角度を 6° にした。実際に駆動可能な範囲は水平方向半径 $100\mu\text{m}$ 、垂直方向半径 $20\mu\text{m}$ 程度の楕円体となる。インパルス応答を取ると、固有振動数は xy 方向で 100Hz 、 z 方向で 75Hz であった。変位拡大機構の寸法は $34 \times 57\text{mm}$ であり、厚さは 5mm である。材質は SUS304 である。変位の拡大率は 12.5 倍程度であった。リンクを伸縮させる積層型圧電素子のサイズは $5 \times 5 \times 20\text{mm}$ であり、 150V 印加時に $16\mu\text{m}$ 伸びる。SUS304 製の検出用電極をその両端に挟み、変位拡大機構とはマイカ板で絶縁した。ステージ、ベースプレートと変位拡大機構を結合する弾性ヒンジは、ヒンジ部の長

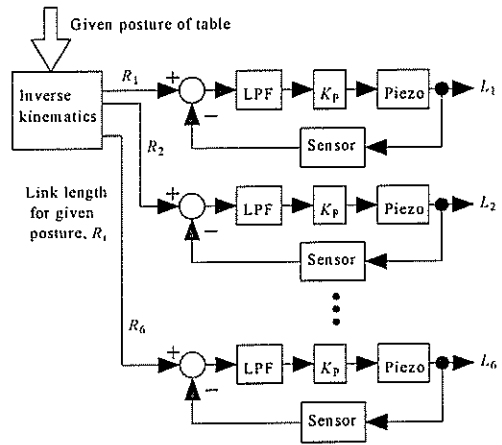


Fig. 4 Block diagram of parallel mechanism

Table 1 Cross-talk ratios and pitching error

Feedback	Cross-talk ratio %	Pitching error rad	
	x/y	z/y	
None	19.6	8.2	1.2×10^{-5}
Displacement	11.7	3.9	1.7×10^{-5}
Induced charge	3.5	4.7	1.7×10^{-5}

さを 1mm 、最も細い部分を $\phi 0.85\text{mm}$ とした。材質は SUS304 である。ステージは誘導電荷をフィードバックすることにより制御される。使用したチャージアンプの周波数範囲は $0.2\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$ である。導線は導電性接着剤で検出用電極に接続した。誘導電荷フィードバック制御と変位フィードバック制御を比較するために、各リンクの伸縮量を渦電流式変位センサ(測定範囲: 1mm 、分解能: $0.4\mu\text{m}$ 、応答周波数: 18kHz)でも測定できるようにした。システムのブロック線図を図 4 に示す。各リンク長を制御することでテーブル変位を制御するセミクロスドロープ方式とした。テーブルの目標位置および姿勢は、逆運動学を解くことで各軸の長さに分解される。制御法は位相遅れを小さくするため比例制御とした。コントローラにはパーソナルコンピュータ(80586, 100MHz)を用いた。サンプリング時間は 0.2ms である。リンク単体の固有振動数が 187Hz であったため、補償器の前にシャ断周波数 100Hz のデジタルフィルタを挿入した。D/A および A/D 変換器の分解能は 12bit である。圧電素子駆動アンプの倍率は 20 倍で、周波数範囲は 7kHz である。

2.3 変位制御

y 軸方向に変位させた場合の例を図 5 に示す。同図 (a)は変位フィードバック制御、同図 (b)は誘導電荷フィードバック制御の場合である。目標値は、振幅 $25\mu\text{m}$ 、周波数 1Hz の正弦波とした。 xy 方向の変位は各軸に取り付けられた渦電流式変位センサと同じ特性を持つもので測定し、 z 軸方向は静電容量式変位センサ(測定

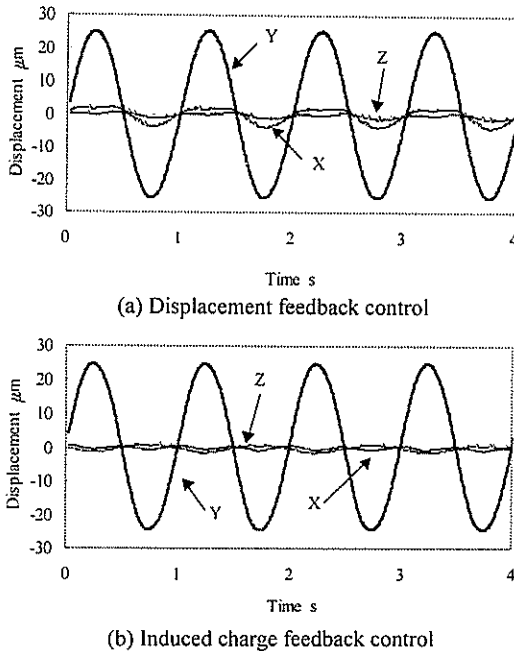


Fig. 5 Example of displacement control

範囲:±10μm, 分解能:5nm, 周波数範囲:40kHz)で測定した。コントローラの比例ゲインは1とした。設計値を用いて逆運動学計算を行ったため、軸間の干渉が観察された。表1に図5におけるxz方向の干渉量と振幅の比およびy方向の指令値を示す。誘導電荷フィードバック制御は変位フィードバック制御と同等の性能を示した。上記と同じ条件で測定したピッチング誤差を表1に示す。AFMなどで使用されているチューブ型圧電素子では計算値で 10^{-4} rad程度の値であるが、試作したステージではいずれの制御法でも 10^{-5} radのオーダーであった。

2.4 原子間力顕微鏡への適用

AFMに適用する場合の構成を図6に示す。プローブには先端がSi₃N₄製のコンタクトモード用カンチレバーを用いた。カンチレバーの長さは200μm、ばね定数は0.16N/mである。カンチレバーの変位は光でこの方式で検出した。受光素子には4分割ダイオードを用い、光源には波長635nmの半導体レーザを用いた。

z軸方向の運動精度を評価するために、フォースカープを気中で測定した。試料にはシリコンの(100)面を使用した。テーブルは振幅10μm、周波数5Hzの三角波でz方向に駆動した。測定例を図7に示す。横軸はz軸方向の変位を示し、縦軸はフォトダイオードの出力電圧を示す。フォトダイオードの出力電圧が正の領域では、テーブルが上昇しプローブと試料が近づき、斥力が働

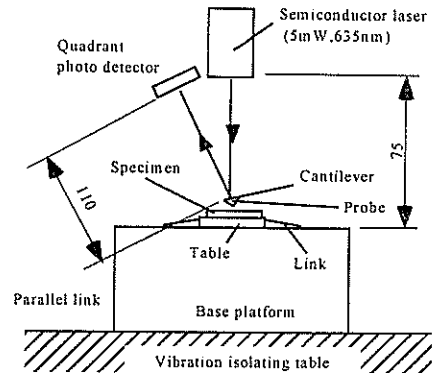


Fig. 6 Schematic view of atomic force

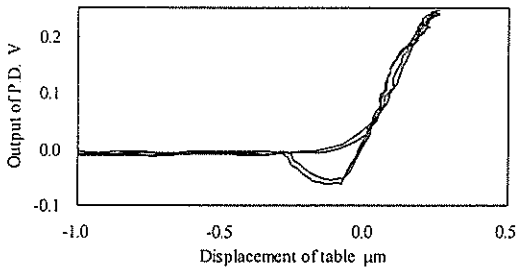
いていることを表している。同図では、テーブルの変位とフォトダイオードの出力の比は $0.74\text{V}/\mu\text{m}$ であった。また、フォトダイオードの出力電圧とカンチレバーにより試料に加えられる荷重の比は $65\mu\text{N}/\text{V}$ であった。0~0.3μmの範囲でフォースカープの測定を40回繰り返した場合はばらつきを測定した。回帰直線を求め、そのまわりの標準偏差を求めた結果、オープンループの場合には78nmであったが、変位フィードバックの場合は17nm、誘導電荷フィードバックの場合は16nmであった。

xy平面内で走査することで回折格子の表面形状を観察した例を図8に示す。回折格子のピッチは3.3μm、ブレース角は $2^{\circ}34'$ である。xy軸は変位の指令値を表し、z軸はフォトダイオードの出力から計算されたカンチレバーの変位である。テーブルの変位は、誘導電荷フィードバック方式で制御した。比例ゲインは1とした。走査の振幅の指令値は10μm、周波数はx方向で10Hz、y方向で0.5Hzとした。直線性のよい回折格子像が観察された。

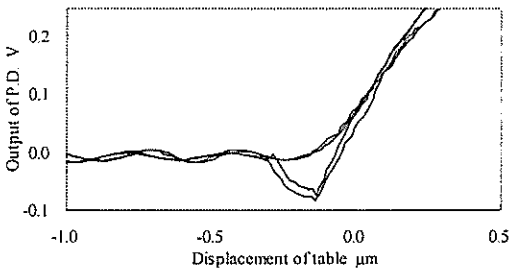
3. 研究成果

ナノメータ切削用位置決め機構として、パラレル機構による6自由度を持つ微動ステージを試作した。本研究の成果をまとめると以下のようになる。

- (1) 6自由度が制御可能な動作範囲は約 $100 \times 100 \times 20 \mu\text{m}$ 、固有振動数はz軸方向で75Hzであった。
- (2) 試作したステージを用いてAFMを構成し、フォースカープを測定するとともに像を観察した。これを用いて運動精度を測定した結果、z軸方向で17nmの繰り返し精度を持つことが明らかになった。
- (3) 誘導電荷フィードバックによりテーブルの運動を制御した結果、変位フィードバックと同等かそれ以上の運動精度が得られた。ピッチング誤差は、試作したステージの方がチューブ型圧電素子より小さかった。



(a) Displacement feedback control



(b) Induced charge feedback control

Fig. 7 Force curve (PD: photo diode)

4. 今後の課題と発展

今後は、以下のことを検討する予定である。

- (1) ナノメータ加工への適用し、加工現象を加工した装置上で観察することにより、加工機構の解明を試みる。
- (2) テーブル運動の高精度化を目指して、校正法を検討する。
- (3) 周囲温度の影響を防ぐために恒温室内に設置する。そのために、インターネットを経由した遠隔操作が可能なシステムを構築する。

5. 発表論文リスト

- [1] 古谷克司, 漆畑満則, 毛利尚武: 誘導電荷のフィードバックによる圧電素子の変位制御, 精密工学会誌, 64, 4, pp. 562-566 (1998).
- [2] K. Furutani, M. Urushibata, N. Mohri: Displacement Control of Piezoelectric Element by Feedback of Induced Charge, Nanotechnology, 9, 2, pp. 93-98 (1998).
- [3] 古谷克司, 山川耕志郎, 毛利尚武: 誘導電荷のフィードバックによる圧電素子の変位制御(第2報)ーパラレルメカニズム制御への適用ー, 精密工学会誌(投稿中).
- [4] K. Furutani, M. Urushibata, N. Mohri: Hysteresis Reduction of Stacked Piezoelectric Actuator Using Induced Charge, Rev. Sci. Instrum. (submitted).
- [5] K. Furutani, M. Urushibata, N. Mohri: Improvement

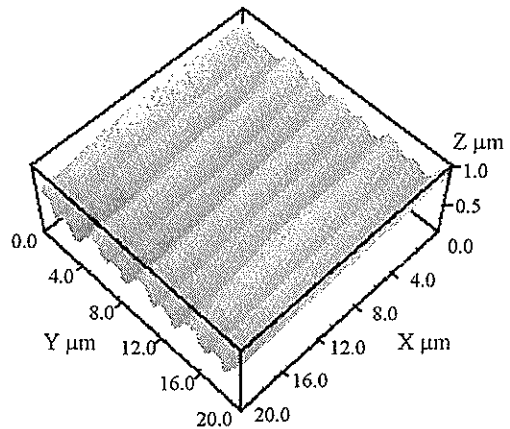


Fig. 8 AFM image of diffraction grating

of Control Method for Piezoelectric Actuator by Combining Induced Charge Feedback with Inverse Transfer Function Compensation, Proc. 1998 IEEE Int. Conf. Robotics & Automation, Leuven, Belgium, 2, pp. 1504-1509 (1998)

- [6] K. Yamakawa, K. Furutani, N. Mohri: XYZ-Stage for Scanning Probe Microscope by Using Parallel Mechanism, Proc. Motion and Vibration Control '99, Las Vegas, NV, USA (in press).
- [7] K. Furutani, M. Urushibata, N. Mohri: Condition Monitoring of Stacked Piezoelectric Actuator Using Induced Charge, Proc. 13th Ann. Meeting Am. Soc. Prec. Eng., St. Louis, MO, USA, 18, pp. 275-278 (1998).
- [8] 古谷克司, 漆畑満則, 毛利尚武: 誘導電荷を利用した積層型圧電アクチュエータの変位・力の推定, 第10回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, 宮城県遠刈田郡蔵王町, pp. 491-496 (1998).
- [9] 古谷克司, 漆畑満則, 毛利尚武: 誘導電荷を利用した積層型圧電素子の変位制御, 平成10年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, 名古屋市千種区, pp. 421-424 (1998).
- [10] 山川耕志郎, 古谷克司, 毛利尚武: SPM型ナノ加工機の開発(第2報)ー誘導電荷フィードバックによるテーブルの制御ー, 1999年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 東京都文京区, p. 94 (1999).
- [11] 山川耕志郎, 古谷克司, 毛利尚武: SPM型ナノ加工機の開発(第1報)ーパラレルメカニズムを用いた微動機構ー, 1998年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 札幌市北区, p. 621 (1998).