

## かぎ状バイモルフ型ピエゾマイクロフィンガ\*

小泉邦雄<sup>\*1</sup>, 佐々木基文<sup>\*1</sup>, 岩城敏博<sup>\*1</sup>  
岡部佐規一<sup>\*2</sup>, 横山恭男<sup>\*3</sup>

## Hooked Bimorph-Type Piezoelectric Microfinger

Kunio KOIZUMI, Motofumi SASAKI, Toshihiro IWAKI,  
Sakiichi OKABE and Yasuo YOKOYAMA

In recent years, miniaturization of mechanical systems has made remarkable progress. Manufacturing systems for minute parts are necessary to advance miniaturization further. Each such system is composed of sections for material feeding, machining and transferring of parts. The handling technique of these workings is the essential point in system construction. This paper proposes that the handling device consists of a pair of bimorph piezo members rigidly connected with other in series and fingertips attached to the pointed end, which is like a hooked finger. The device is able to move two-dimensionally by application of an independent voltage to each of the members. It is noted that there is an optimum value for height of the feeding plane and optimum combination of the attaching angle of the device and connecting angle of the members, which enhance quasi-static feeding performance. Experimental results agree well with the theoretical ones.

**Key Words:** Microfinger, Handling Device, Microfeeder, Micromechanism, Piezoelectric Actuator

## 1. 緒 言

近年、機械システムの一部では、微小化の傾向が急速な広がりを見せてきた。微小システムの開発には、微小・薄はく部品の製造システムが必要になる。製造システムは、薄いはく素材や微小な半製品を加工部に供給する供給部、微小寸法の加工を行う加工部および加工された部品を移送・組付けをする移送部に分けられる。システム両端の供給部と移送部では、素材や部品のハンドリングが重要なポイントとなり、フィンガ・チップの微小な二次元動作が不可欠である。

本研究では、二つのバイモルフ型ピエゾ部材がある挟み角でかぎ状に剛に接続し、先端にフィンガ・チップを取り付けた素子を取扱う。二つのピエゾ部材に独立な駆動電圧を印加して、チップのある範囲内の任意の位置に動かすことができる。この素子を対向して組合せれば、ハンドを構成できる。かぎ状の構成は、グリップのための押付け力を発生しながら送り方向に動かすことが本質的に容易であり、円滑な組立作業に必要な

適度のフレキシビリティを、フィンガ自体が有してもおり、ハンドリング素子として適している。

本素子に似た形状のものとして、取付け角および挟み角が90°のL型素子を正弦駆動によって惰円振動させて紙送りする機構への応用を試みた例<sup>(1)</sup>がある。

本報では、動作の基本的性質<sup>(2)</sup>を踏まえて、フィード動作に注目して、フィードできる距離と発生可能なフィード力について、可動部材の慣性の影響が無視できる準静的な場合を検討した。また、フィンガ・チップがフィード面から離れている自由な状態におけるチップ先端の移動距離、フィード方向の発生力およびグリップに関する押付け力についての実験結果を述べた。

## 2. 記 号

添字*i*=1, 2は、ピエゾ部材1, 2を表す。力は、 $x > 0$ および $y < 0$ 方向を正とし、モーメントは、反時計回りを正とする。3章で定義されないその他の量として、 $l_f$ : 自由移動距離、 $l_w$ : 素材や部品の送り距離、 $l_g$ : グリップ範囲、 $x_i, y_i$ : 図1の点A'', Bを原点とする部材*i*の部分座標、 $a:y$ で測ったフィード位置高さ、 $F_x$ : チップの発生するフィード面に平行な方向のフィード力、 $F_y$ : フィード面に垂直な方向の押付け力、 $F: F_x, F_y$ の

\* 原稿受付 平成4年5月19日。

\*<sup>1</sup> 正員、富山大学工学部(〒930 富山市五福3190)。

\*<sup>2</sup> 正員、金沢大学工学部(〒920 金沢市小立野2-40-20)。

\*<sup>3</sup> 正員、石川工業高等専門学校(〒929-03 石川県河北郡津幡町北中条)。

合力,  $F_v$ :  $F$  のチップ軸方向分力,  $F_n$ :  $F$  のチップ軸直角方向分力,  $M_{si}$ : ピエゾ部材に発生する駆動モーメントを定義して、次の無次元量を用いる。

$$\begin{aligned}
& Li = l_i/l_2, \quad Lt = l_t/l_2, \quad K = (EI)_1/(EI)_2, \quad X = x/l_2, \\
& Y = y/l_2, \quad A = a/l_2, \quad Msi = M_{si}l_2/(EI)_2, \quad Fx = \\
& F_x l_2^2/(EI)_2, \quad Fy = F_y l_2^2/(EI)_2, \quad Fn = F_n l_2^2/(EI)_2, \\
& Fv = F_v l_2^2/(EI)_2, \quad Lf = l_f/l_2, \quad Lw = l_w/l_2, \quad Lg = \\
& l_g/l_2
\end{aligned}$$

### 3. 理 論 解 析

図1および9のようく、取付け角 $\gamma$ で一端を固定した等価曲げ剛性 $(EI)_2$ 、長さ $l_2$ のバイモルフ型ピエゾ部材2の他端に曲げ剛性 $(EI)_1$ 、長さ $l_1$ のピエゾ部材1を挟み角 $\theta$ で剛に結合し、先端に長さ $l_t$ のフィンガ・チップを取付ける。ピエゾ部材の無駆動時のチップの先端自由位置を全体座標 $(x,y)$ の原点とする。

フィンガ・チップがフィード面上の上表面高さ  $y = a$  のレベルにある素材をグリップして、 $x = x$  の位置までフィードしたときの発生可能なフィード力の上限値を知るために、チップを固定して考える。図 1 の動作例は  $a = 0$  の条件ゆえ、フィード面高さ  $a$  がたまたまチップの先端自由位置  $y = 0$  と一致している。チップが力  $F$  を発生するときに、各ピエゾ部材に作用するモーメント

$$\begin{aligned} M_1 &= -F_v \cdot x_1 + M_{s1} \\ M_2 &= -F_v \cdot (l_1 + l_t - x_2 \cos \theta) \\ -F_v \cdot x_2 \sin \theta + M_{s2} \end{aligned} \dots \dots \dots \quad (1)$$

による部材変位  $y_2, y_1 (l_t \leq x_1 \leq l_t + l_1)$  は、次式

$$(EI)_i \cdot d^2 y_i / dx_i^2 = -M_i, \quad (h_i \ll l_i) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

に、次の境界条件を用いて求められる。

$$x_2 = l_2 : dy_2/dx_2 = 0, \quad y_2 = 0$$

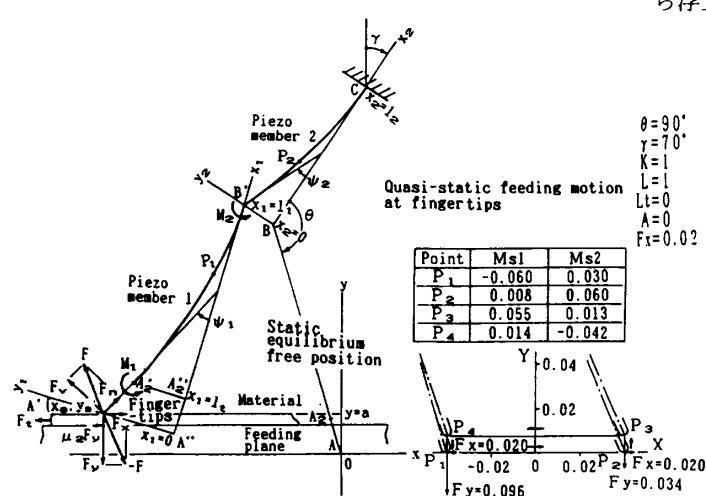


図 1 フィンガのフィード動作

$$x_1 = l_1 + l_t : dy_1/dx_1 = 0, \quad y_1 = 0, \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

チップ部の変位  $y_1(0 \leq x_1 \leq l_t)$  は、 $dy_1(x_1=l_t)/dx_1$  より求められる。

チップ先端の位置は、部材1とチップの接続部の位置( $X_{A2}, Y_{A2}$ )を用いて次式で表される。

$$X_a = X_{A2} + Lt \sin \beta_1, Y_a = Y_{A2} + Lt \cos \beta_1 \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで  $\psi_2 = -dY_2(X_{2c})/dX_2$ ,  $\beta_2 = \theta + \gamma + \psi_2, \psi_1 = -dY_1(X_{1c} + Lt)/dX_1$  として  $\beta_1 = \beta_2 + \psi_1$  である。

素材上面高さを  $A$  に設定し、チップ先端を位置  $X_a = X$  に拘束すると、次の 2 条件が成り立たねばならない。

$F_n$  と  $F_v$  に関する連立超越方程式の式(5)を解き、

より、 $X, Y$  方向に変換すれば、チップ先端で発生する最大フィード力  $F_x$  と押付け力  $F_y$  が求められる。

自由変位は式(4)で  $F_n=0, F_v=0$  として求められる

#### 4. フィルタ性能

図1のように、素材をフィンガ・チップでフィード面に押付けて発生する摩擦力でグリップし、Xの正方向に  $P_1$  から  $P_2$  までフィードした後、チップが素材から離脱して  $P_3$  まで上昇し、 $P_4$  に戻り、下降して再び  $P_1$  に戻り。この動作を繰返して素材をフィードする。逆順の駆動で、負方向フィードも可能である。

このようなフィード動作の性能を表す因子には、大別して送り距離とフィード力に関するものがある。

(1) 自由移動距離( $L_f$ ) 工具がフィード面から浮上がった自由な状態で、フィード面と平行な方向

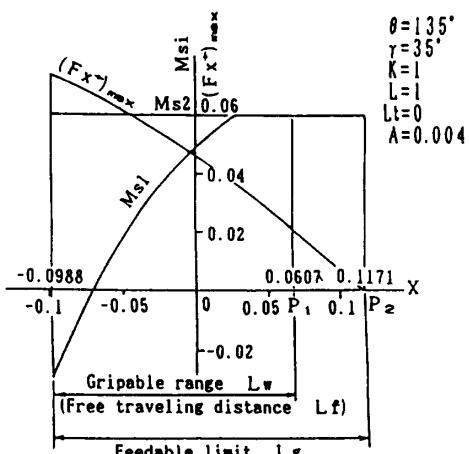


図 2 フィード動作の発生力(理論)

に移動できる距離である。フィードを終ってチップを元の位置に戻す行程に用いるが、静電力や真空吸引力等による把持を考えれば、フィード動作にも用いることができる。

(2) グリップ範囲( $Lw$ ) チップが素材をフィード面に押付けて発生した摩擦力でグリップしてフィード力でフィードができる、かつ範囲の一端で離脱して他端に戻ることができる距離範囲である。したがって自由移動距離の範囲内である。

(3) 送り可能範囲( $Lg$ ) 無駆動時にフィード面高さを上昇させてチップを押上げたとき、ピエゾ部材の弾性復元力の増大によってグリップ範囲外でもチップを素材に押付け、かつフィード力を発生できる範囲である。しかし自由移動距離の範囲外ゆえ、チップは素材から離脱できない。グリップした素材をこの範囲の端まで送ると押付け力が零となるので、その位置で次段の作業工程に受渡したり、そのまま加工を行った後、グリップ範囲へ戻してから離脱して開放するような動作が可能である。

(4) 最大フィード力 ( $(Fx)_{max}$ ) あるフィード面高さにおいて発生可能なフィード力の最大値である。フィード方向のチップ位置で異なる。

図2に、以上の因子の例を示す。フィード力が常に最も大きくなるように駆動モーメントをかけたときのフィード力と押付け力の変化である。自由移動距離の範囲外の送り可能範囲でフィード力を発生できる領域がある。フィード面高さを上昇させるほど、チップが押上げられてピエゾ部材のたわみが大きくなり、弾性復元力が増して、チップをフィード面から離脱させにくくなるので、自由移動距離が狭くなる。このため、この領域は、自由移動距離と比べて相対的に広くなる。

図3は、フィード面高さの違いによる各フィード性能因子の変化を示している。工具と素材との静摩擦係数

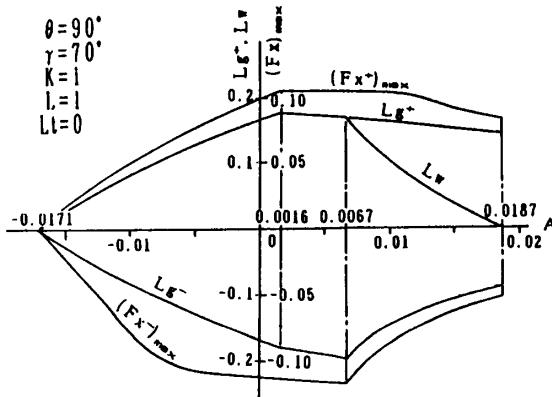


図3 フィード面高さによるフィード性能因子の変化(理論)

数は十分大きく、かつ素材とフィード面との静摩擦係数は小さく、 $\mu_{1s} \rightarrow \infty$ ,  $\mu_{2s} = 0$ とみなせるとする。

フィード面高さの限界は、グリップ範囲が零となつたときである。上限では、フィード面高さを上昇させて面でチップを押上げた状態になる。駆動モーメントによる発生力がピエゾ部材の弾性復元力に打勝てないので、チップを動かせない。下限は、チップが最も下がるようピエゾ部材に最大の駆動モーメントをかけた状態であり、フィード面に接触できる限界ゆえ、グリップおよび送り可能範囲、送り力は、零である。

このフィード面高さの範囲内でフィード性能の各因子に極大値が現れる。 $Lg^+$ と $Lg^-$ の違いは、フィード面のために素子の静的平衡位置が $X$ の正負両側2か所に生ずるものである。最大駆動モーメントをかけても $X=0$ を越えて反対側にチップが移動できないので、フィード面高さを設定するときにチップが $X$ の正負のどちら側に位置するかで、動作する側が決まる。

フィード面高さを調節して得られた性能因子の極大値は、素子の取付け角を変化させると大幅に変わる。

図4に正負両方向のフィード力の取付け角による変化を示す。ピエゾ部材1がフィード面と平行に近くなる取付け角で極大、フィード面に対して垂直に近付く角度で極小になる。正負どちらのフィード方向でも同程度の最大力が得られるおよび素子の姿勢が反転してもほとんど同じ最大力が得られるなどの特長がある。

図5にグリップおよび送り可能範囲を示す。この条件では自由移動距離はグリップ範囲と一致した。図4のフィード力とは逆に、ピエゾ部材1がフィード面に対して垂直に近付く取付け角で、いずれも極大となる。

図6と7は、さらにかぎ状に結合した二つのピエゾ部材の挟み角を変えたときを表した $\theta-\gamma$ 平面上の等

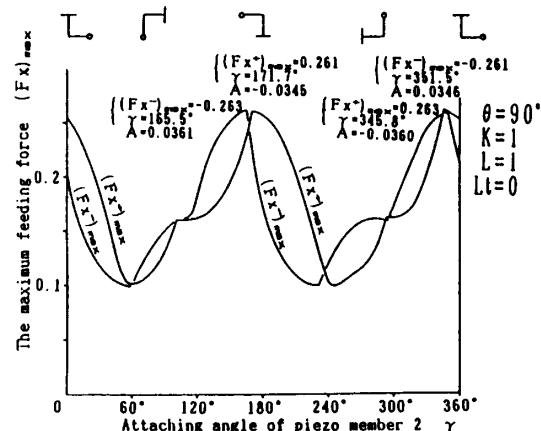


図4 送り力の取付け角による変化(理論)

高線図である。破線は尾根を示している。

図6は、フィード力の最大値を示した図である。正負いずれの方向とも類似の傾向がある。 $\gamma + \theta = \pi$ の近くでは、フィード力が低下している。 $\gamma + \theta = \pm \pi/2$ の付近では、等高線が尾根状になっており、しかも $\theta$ が零あるいは $\pi$ に近付くにつれてフィード力が増大する。 $\gamma + \theta = \pm \pi/2$ では、部材2の取付け角にかかわらず、部材1の姿勢がフィード面に対して平行に近い状態であり、さらに $\theta = 0$ あるいは $\pi$ に近づくと部材2も平行に近くなり、部材の軸方向にフィード力の反力が働くので、部材がたわんで逃す反力が小さく、大きなフィード力を発生することができる。ここでは軸力によるたわみを考慮していないので、誤差が増大していく。

一方、図7はグリップ範囲の等高線図である。 $\gamma + \theta = \pi$ の近くに尾根がある。この状態では、部材1の姿勢が部材2の取付け角によらずにフィード面に対して垂直に近い。しかも $\theta = \pi$ 、すなわち真直片持りの状態に近付いてゆくと、グリップ範囲が広くなる。

図6、7とも、等高線が右下がりに流れる傾向であ

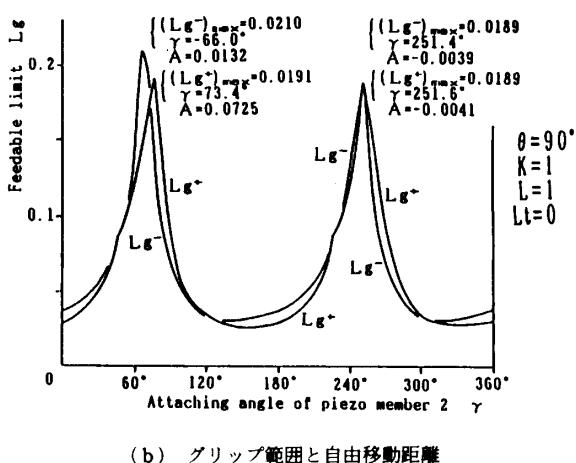
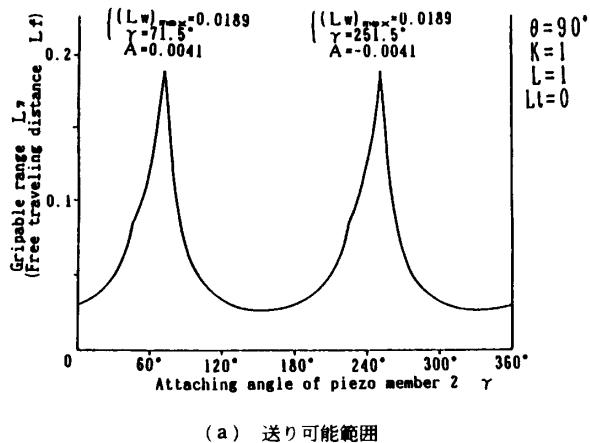


図5 グリップ範囲、自由移動距離および送り可能範囲の取付け角による変化(理論)

り、 $\gamma + \theta$ の値が性能因子に大きく依存している。性能因子の大きくなる $\gamma + \theta$ の値が一定に近くなるので、製作された素子の $\theta$ を測定して、それに応じて $\gamma$ を調節すれば、 $\theta$ に製作誤差があっても、得られる性能には大差がない。この特性は実用上非常に都合が良い。

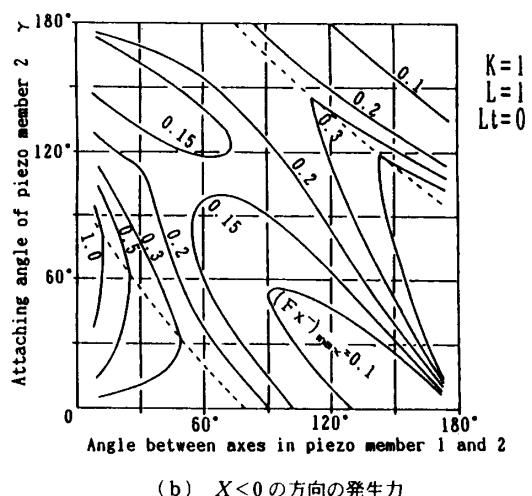
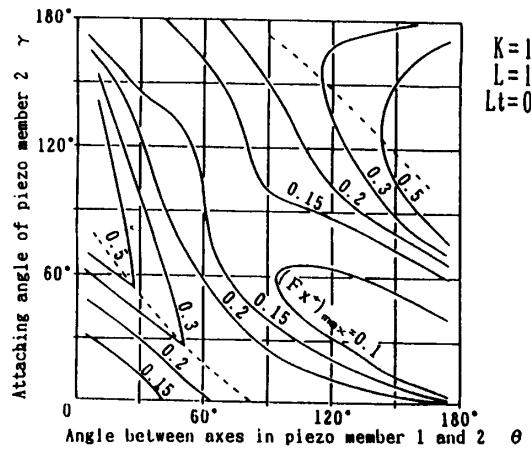


図6 フィード力の等高線図(理論)

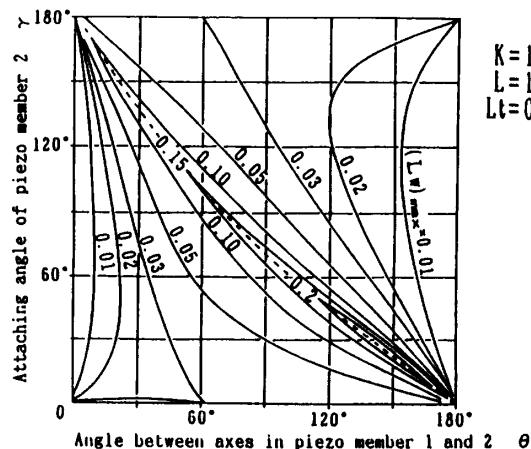


図7 グリップ範囲の等高線図(理論)

図8は、図7の等高線図における尾根の断面とそのときの $\theta$ と $\gamma$ の関係を示したものである。尾根における $\theta$ と $\gamma$ の関係は、 $\theta$ の広い範囲にわたって、一点鎖線で示した $\theta + \gamma = \pi$ に近い。グリップ範囲は、挟み角 $\theta$ を開いてゆくに従って広がり、 $\theta = 150^\circ$ で最も広くなる。それ以上開くと、工具が二次元動作をしにくくなり、かぎ状に構成した効果が損われる。

## 5. 実験

**5・1 実験装置** 図9にフィンガの構造と送り力測定部を含む実験装置の全体構成を示す。素子の諸元は次のとおりである。

$$l_1 = 41.0 \text{ mm}, l_2 = 40.7 \text{ mm}, l_t = 16.1 \text{ mm}$$

$$\theta = 90.1^\circ, (EI)_{1,2} = 0.0298 \text{ N}\cdot\text{m}^2$$

挟み角 $\theta$ に折り曲げたリン青銅板のシム材にピエゾセラミックス板を貼って二つのバイモルフ部材を構成する。折れ曲り部に補強材を接着して剛性を高め、挟み角 $\theta$ を保ってかぎ状に剛接する。先端には、フィンガ・チップとして $\phi 5$ の中空ステンレスパイプを取付けてある。他端はホルダに挟まれ、ホルダは取付け板

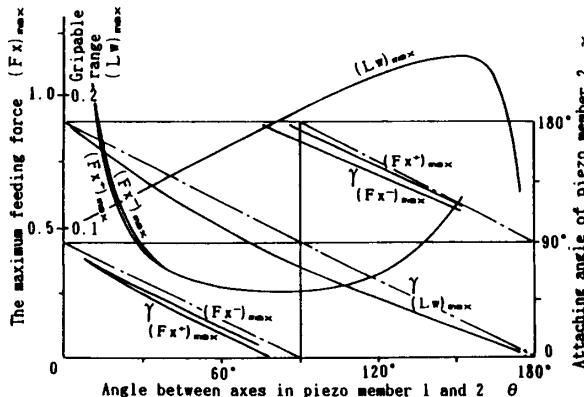


図8  $\theta$ - $\gamma$ 面上のグリップ範囲の等高線の尾根(理論)

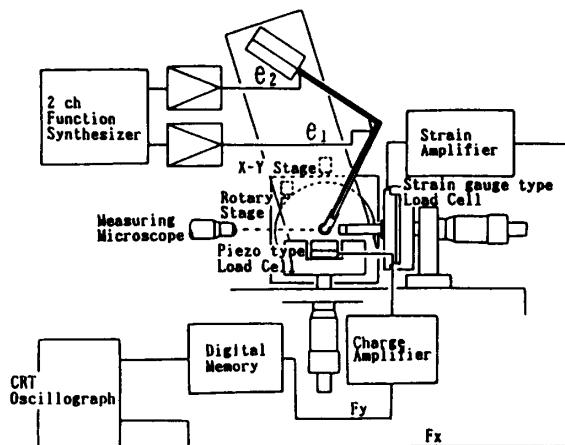


図9 ピエゾ・マイクロフィンガの構造および実験装置の構成

に固定されている。この取付け板は、コラムに据付けたX-Y- $\theta$ ステージに取付けられている。

素子の取付け角をロータリステージで設定した後、チップの原点からのX方向のずれをX-Yステージで補正する。この補正量を小さく抑えるために、取付け板は、工具の中心がロータリステージの回転中心に一致するように、ロータリステージに取付けてある。フィード面は、垂直に設置したマイクロメータヘッドのスピンドル先端に取付けられた。フィード面高さはマイクロメータで調節される。

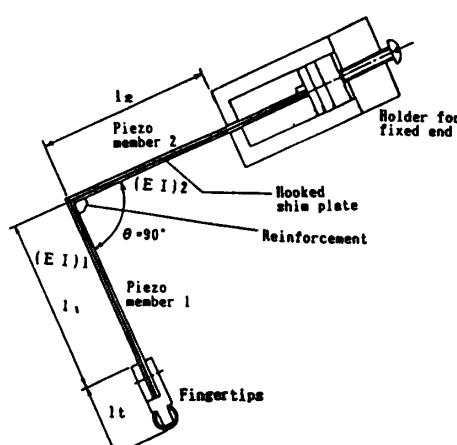
チップの発生する押付け力は、フィード面の下の内部に埋込まれたピエゾ型力検出器で検出される。

最大フィード力は、セラミックダイヤフラムに半導体ひずみゲージがモールドされた圧力センサを用いた力検出器で測定した。先端に接触板を付けた中空パイプを感圧接触子として、ディスク状のダイヤフラムの中央に接着した構造の検出器をマイクロメータヘッドのスピンドルに取付け、感圧接触子の先端を測定するX方向位置に設定する。フィード面高さで決まるY方向位置は、この力検出器の付いたマイクロメータヘッドを取付けたねじ式昇降装置で設定する。 $X$ の反対方向のフィード力を測定する場合は、このねじ式昇降装置を素子の反対側に据付け換えて、反対側から感圧接触子先端を測定位置に設定する。

## 5・2 実験方法と結果

**5・2・1 工具先端自由変位** フィード動作の戻り行程やピックアンドプレース動作の移動行程におけるようにチップがフィード面から離れて自由に動く場合である。

二つのピエゾ部材に、独立に任意波形発生器によって生成した電圧をアンプで増幅して印加する。電圧-ひずみ特性の履歴の影響を抑えるために、正の電圧を印



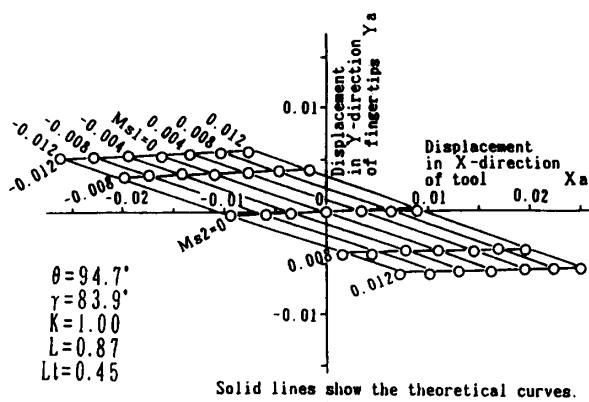


図 10 フィンガ・チップの自由移動(実験)

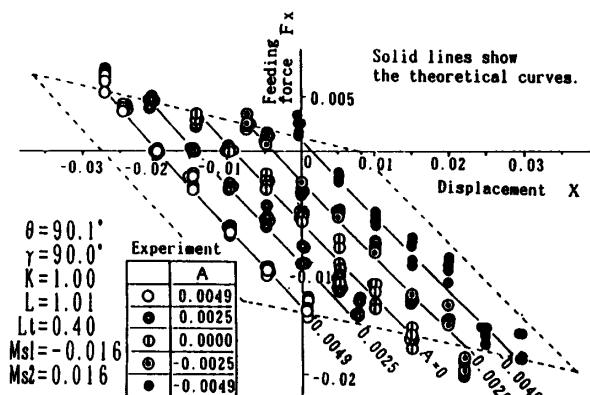


図 11 フィンガ・チップの位置とフィード力(実験)

加する場合は、実験する正の最大電圧を印加してから電圧を零に戻したときのチップの位置を座標原点にとる。その後、正の電圧を印加して変位を読み取り顕微鏡で測定する。負の電圧を印加する場合は、逆に負の最大電圧をかけてから零に戻し、座標原点を取直す。

印加電圧と駆動モーメントとの較正值は、印加電圧に対する先端たわみを測定し、対応するモーメントを片持りの理論値より求めて得られた。図 10 のように、実験値は理論解析結果とよく一致した。

**5・2・2 押付け力とフィード力の最大値** マイクロメータヘッドでフィード面高さと感圧接触子先端のX方向位置を設定する。フィード力は静的測定で求めたが、押付け力については、ピエゾ部材に印加した所定の直流電圧を瞬時に遮断して、Y方向の力検出器に発生するステップ応答電圧を測定して得た。フィード面から受ける摩擦力の影響を除くために、チップ先端を所定位置に設定するとき、Xの正方向からと負方向からの両方の場合について測定し、その平均値をとった。図 11 と 12 にそれぞれの測定結果を示す。

図 13 は、±0.016の範囲内の駆動モーメントで得られる正負の最大フィード力のフィンガ・チップの位置

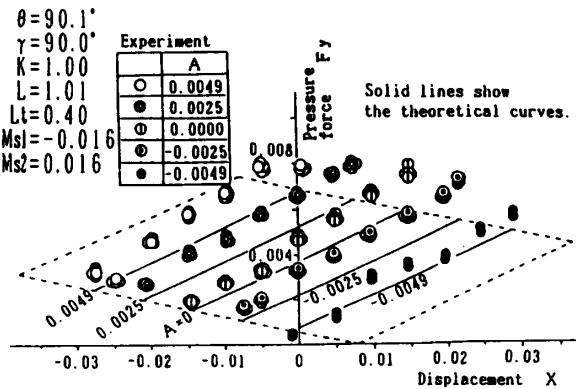


図 12 フィンガ・チップの位置とフィード力(実験)

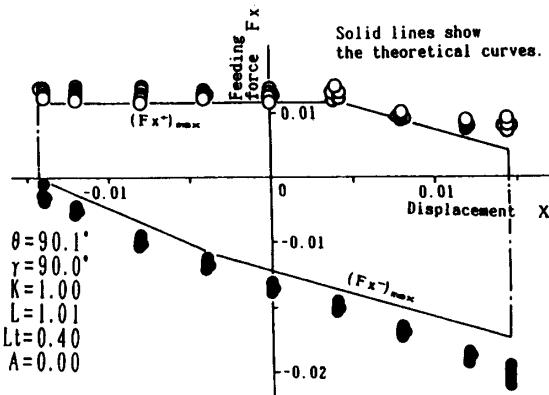


図 13 最大フィード力(実験)

による変化を示したものである。

## 6. 結 言

バイモルフ型ピエゾ部材をかぎ状に剛に結合したフィンガのフィード性能について、次の結果を得た。

(1) フィード性能に関連する因子が極大となるフィード面の高さが存在する。

(2) 素材をグリップしてフィードできる距離を長くするには、ある部材挟み角の素子について、チップを取り付ける側の部材がフィード面に対して垂直に近くなる付近に素子の取付け角を設定する。

(3) 大きな送り力を得るには、素子の部材挟み角にかかわらず、チップを取り付ける側の部材がフィード面に対して平行に近くなる付近に、素子の取付け角を設定する。

(4) 自由移動距離、送り力および押付け力についての実験結果は、理論解析結果と良く一致した。

## 文 献

- (1) 丹羽・林, 1989 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1989-3), 269.
- (2) 小泉・岡部・横山, 精密工学会誌, 57-12(1992), 2242.