

# 論文 3自由度ねじり振動系を使用した 2次元光スキャナ\*

2-Dimensional Optical Scanner Applying Torsional Resonator with 3 Degrees of Freedom

大塚 義 則          西川 英 昭          甲 村   司  
Yoshinori OHTSUKA   Hideaki NISHIKAWA   Tsukasa KOUMURA  
秋田 成 行          服 部   正  
Shigeyuki AKITA    Tadashi HATTORI

A two-dimensional optical scanner suitable for integration in a plane structure has been developed. To make it vibration robust, a torsional vibration system with two degrees of freedom is adopted for the resonator, and the vibration system axis is matched to the center of gravity. Piezoelectric bimorph cells are used as the actuator to excite the torsional vibration. Algorithms of Luh, Walker and Paul, which are usually used for motion analysis of manipulators in robot engineering, were applied for deriving the equations. This optical scanner is capable of optical scanning in two orthogonal directions independently or simultaneously at a scanning angle of  $\pm 30$  degrees or more. One-dimensional scanning is enabled by driving the bimorph cells with the resonance frequency of either of the two torsional vibrations. Two-dimensional scanning is achieved if the bimorph cells are operated by adding the resonance frequency signals of the two torsional vibrations.

**Key Words** : Scanner, Piezoelectric Bimorph, Actuator, Micromachine, Vibration Analysis

## 1. はじめに

近年、バーコードリーダやコンパクトディスクに代表される光情報機器は幅広い普及を見せている。その理由として半導体レーザや非球面レンズの開発等により、光情報機器の主要構成要素が大幅に小型化されてきたことが挙げられる。この小型化の流れに伴い、その構成要素の一つである光スキャナについても大幅な小型化が要望されている。一方バーコードリーダの多方向読み取りやレーザレダ等の光計測分野での多点計測に対応するため、光スキャナの多次元化も要望されている。これらのニーズに対してポリゴンミラーやガルバノミラー等の従来構造で小型化、多次元化を図ることは、加工や組み立ての点が困難である。

光スキャナの小型化、多次元化を目指した研究がいくつかある。材料をシリコンとし小型化を目指した例としてはねじりバネを利用し静電気力により励振する1次元の振動子<sup>1),2)</sup>や直交する2軸のねじりバネを利用し静電気力で励振する光スキャナ<sup>3),4)</sup>等がある。また水晶の振動子を電磁力で1次元に励振する光スキャ

ナ<sup>5)</sup>もある。多次元化を目指した例としては、3個の圧電バイモルフの共振を利用し先端のミラーを2次元に励振するもの<sup>6)</sup>や1個の積層型圧電素子で2自由度バネ構造の曲げ振動とねじり振動を励振するもの<sup>7-9)</sup>等がある。これらのスキャナは、振動形態としてはねじり振動と曲げ振動に、駆動方式としては圧電駆動、静電駆動、電磁駆動に大別できる。

本稿では、構造的には3自由度ねじり振動系を利用することで、また駆動方式としては一對の圧電バイモルフによりトルクを発生し、さらにトルクのベクトル分解という考え方を利用することで、①2次元走査が可能で、②走査角が大きく、しかも③外乱振動に強いという特徴を有する2次元光スキャナの構成、動作原理、運動解析、および特性について述べる。

## 2. 新規2次元スキャナの考案

光学素子も将来的にはICと同じように集積化されていくものと考えられる。従って2次元光スキャナはこの集積化に適した構造、すなわち平面的な構造である必要があると考えられる。この観点から新しい2次元スキャナを考案した<sup>10)</sup>。

\*電気学会論文誌E, Vol. 116-E, No. 8, 1996より転載

2・1 バネ構造

平面構造で大きな走査角を得るためには薄板バネ構造の共振を利用することが有効である。2次元の走査を可能にする方式として、曲げ振動とねじり振動の共振を利用した方式が考えられる。しかし曲げ振動を利用する方式は、外乱振動が作用した場合に走査軌跡が乱れる恐れがある。この方式はミラー部の重心位置とそれが運動するときの回転中心が一致していないため、外乱振動が固定端に作用した場合にミラー部を動かそうとするモーメントが発生しミラー部が振動してしまうためである。そこでミラー部の重心位置と回転中心を一致させれば、回転軸周りのモーメントは発生しなくなり外乱振動に強い構造となる。このような考

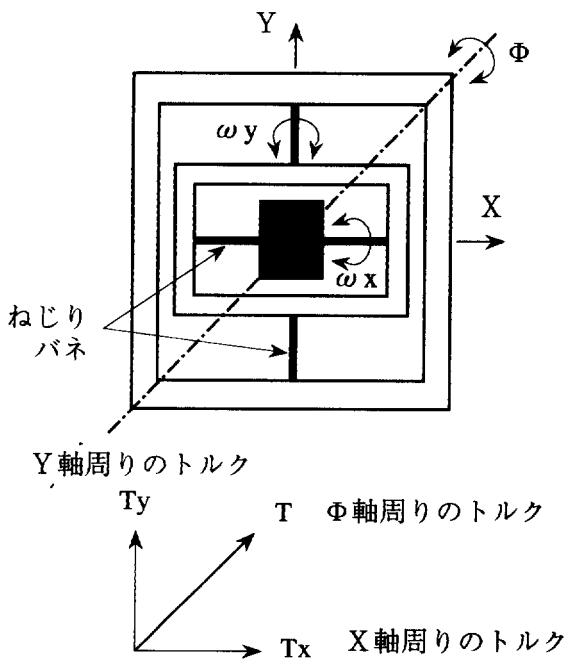


Fig. 1 Resonator shape and method to excite twisting vibration

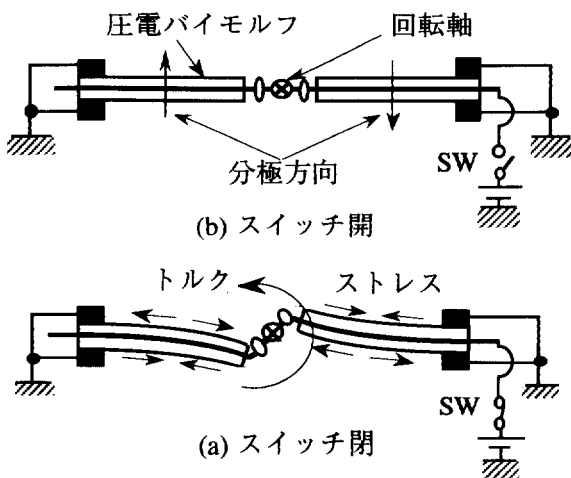


Fig. 2 Method to generate torque

察に基づく、2次元に走査可能な光スキャナのパネ構造として図1に示すような2自由度のねじり振動系が適していると考えられる。

2・2 加振方法

ねじり振動系の加振方法は、共振させたい振動系の回転軸にその系の共振周波数を持つ加振力を加えれば良い。2次元光スキャナの場合は二つの回転軸を持つため、二つのねじり加振力を与える必要がある。構成を簡単にするため、一つの振動系で二つの加振力を与える構成とした。このために振動系を斜めに加振する方法を考えた。ポイントは二つある。

第一のポイントは、加振力をベクトルの分解することである。図1に示すようにΦ軸周りのトルクTは、X軸周りのトルクTxとY軸周りのトルクTyにベクトル分解され、それぞれの軸についての加振力として作用する。第二のポイントは、共振周波数の違い

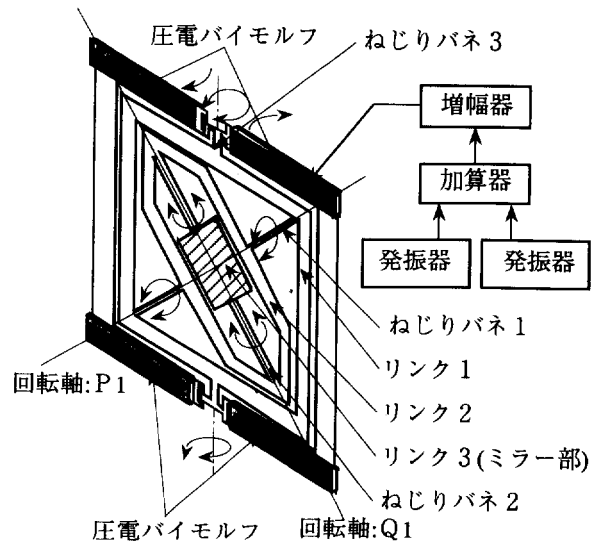


Fig. 3 Configuration of the 2-dimensional optical scanner

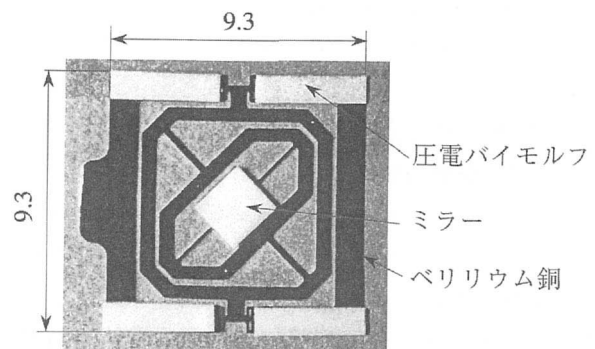


Fig. 4 Top view of the 2-dimensional optical scanner

による動作の分離である。X軸周りの共振周波数 $\omega_x$ とY軸周りの共振周波数 $\omega_y$ を異なるようにバネ系を設計する。この場合 $\Phi$ 軸を $\omega_x$ で加振すればX軸周りのみ共振し、 $\Phi$ 軸を $\omega_y$ で加振すればY軸周りのみ共振する。このような場合には1次元の走査が可能である。さらに二つの共振周波数を加算して加振すれば、X軸とY軸ともに共振し2次元の走査が可能となる。

### 2・3 駆動用アクチュエータ

平面構造に適した駆動用アクチュエータとして圧電バイモルフを採用した。圧電バイモルフ自身はトルクを発生させることができない。そこで図2に示すように左右一対の圧電バイモルフを組み合わせ、トルクを発生させる方法を考えた。左右の圧電バイモルフの分極方向を逆向きに形成した。左右のバイモルフに同じ電圧を加えるとそれぞれが逆向きに變形し、図2に示す回転軸の周りにトルクを発生する。

### 2・4 考案した2次元スキャナ

以上の考察を基に図3に示す構成の2次元光スキャナを考案した。実際にはねじりバネ1とねじりバネ2を斜めに配置した。圧電バイモルフは2対使用してトルクを大きくした。またこのトルクをバネ系に伝えるために、図中に示すねじりバネ3を追加した。従って結果的にはこの2次元光スキャナは3自由度のねじり振動系を構成する。

### 2・5 製作方法

製作方法は以下の通りである。まずベリリウム銅をエッチングしてバネ構造を形成したものに、圧電素子を接着して圧電バイモルフを形成した。次にアルミニウムを蒸着したシリコンを接着してミラー部を形成した。ベリリウム銅のバネ材に圧電素子とミラーを接着しただけの単純な構造をしており、ボルト締め等の締結要素を必要としないため、小型化が非常に容易な構造であるといえる。実際に上記方法で製作した2次元光スキャナの外観を図4に示す。

## 3. モデル化と運動解析

### 3・1 運動方程式の導出

考案した2次元光スキャナはミラー部を回転させるための二つのねじりバネ1,2の他に、加振軸についてもねじりバネ3が付加されている。従って2次元光スキャナの振動系は、リンクの部分の弾性変形を無視すれば3個のリンクと3個のバネから構成される3自由度連成振動系と考えることができる。この系の共振周

波数と走査軌跡を決める振動モードは、3個の慣性テンソルと3個のバネ定数の合計6個のパラメータにより決まると考えられる。必要な仕様の2次元光スキャナを得るためには、この系の運動方程式の導出が必要不可欠である。1自由度振動系であれば運動方程式の導出は比較的容易であるが、今回考えているような3自由度ねじり振動系では直感的に運動方程式を得ることは極めて困難である。そこで以下に示すモデル化を行った。これはロボット工学においてマニピュレータの解析で良く利用されるLuh, Walker, Paulのアルゴリズム<sup>11),12)</sup>を参考にしたものである。

(i) リンクへのフレームの配置と座標変換行列の計算  
運動方程式を求めるため図5に示すように、各リンク、バネに符号を割り当てる。各リンクの重心についての慣性テンソルを ${}^cI_i$ 、バネ定数を $k_i$  ( $i=1,2,3$ )とする。次に各リンクの姿勢を記述する必要があるため、各リンクに局所座標系を考えフレームと呼ばれるものを定義する。フレームとは局所座標系の座標軸の方向を表わす3個の単位ベクトルの組である。リンクに対するフレームの配置は図5に示すようにデナビット・ハーテンバーグの表記法に基づいて行う。リンク $i-1$ の回転軸と $Z_{i-1}$ 、リンク $i$ の回転軸と $Z_i$ を一致させ、 $Z_{i-1}$ と $Z_i$ のなす角を $\alpha_{i-1}$ とする。次に $Z_{i-1}$ と $Z_i$ を含む平面に対して垂直となるように $X_{i-1}$ をとる。 $\alpha_{i-1}$ の符号は $X_{i-1}$ の向きに対して右ねじ方向を正とする。 $Y_{i-1}$ は右手座標系に従ってとる。 $X_i$ はフレーム $i$ の回転角が0の時 $X_{i-1}$ と一致するようにとり、フレーム $i$ の回転角は $Z_i$ を回転軸として $X_{i-1}$ と $X_i$ のなす角を右ネジ方向を正として定義し $\theta_i$ とする。以上の操作を $i=1,2,3$ について行うことにより、すべてのリンクにフレームが配置され、リンクの姿勢が記述できるようになる。次にフレーム間の変換行列を作成する。フレーム $i$ から $i-1$ の変換行列すなわちフレーム $i-1$ から見たフレーム $i$ はオイラー角の回転行列で与えられ、これを ${}^{i-1}R$ で表わすと(1)式のようになる。

$${}^{i-1}R = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ \cos \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cos \theta_i & -\sin \alpha_{i-1} \\ \sin \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \sin \alpha_{i-1} \cos \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

フレーム $i$ から見たフレーム $i-1$ を表わす変換行列 ${}^{i-1}R$ は(1)式の逆行列で与えられる。

(ii) 動力学アルゴリズム

(a) 外向き繰り返し計算 ( $i=0 \rightarrow 2$ )

ここで左上の添え字は観察するとき基準とする座標

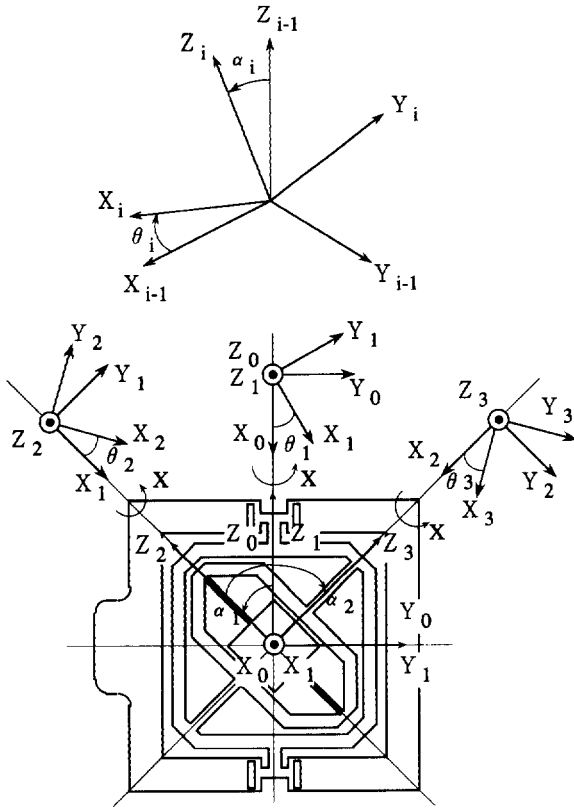


Fig. 5 Relationships among three coordinate systems

系, 右下の添え字は観察される座標系を表わすものとする。リンク  $i+1$  の基準座標系に対する角速度, 角加速度を表すベクトルを,  ${}^{i+1}\omega_{i+1}$ ,  ${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1}$  で表わすとそれらはそれぞれ (2) 式, (3) 式となる。

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (2)$$

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i + {}^{i+1}R^i \omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (3)$$

次に, リンク  $i+1$  に加わるモーメントをリンク  $i+1$  の座標系で表したものを  ${}^{i+1}N_{i+1}$  とし, ダランベールの原理を適用すると各リンクについてのオイラーの運動方程式 (4) 式が求められる。

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{i+1}I_{i+1} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}I_{i+1} {}^{i+1}\omega_{i+1} \quad (4)$$

以上の計算を  $i=0, 1, 2$  について行うことで各リンクそれぞれについての運動方程式が導き出せる。

(b) 内向き繰り返し計算 ( $i=3 \rightarrow 1$ )

次にリンクどうしの相互作用を考えて全体の運動方程式を導く。リンク  $i$  に加わるモーメントを  ${}^i n_i$  とすると (5) 式が導き出せる。

$${}^i n_i = {}^i N_i + {}^{i+1}R^{i+1} n_{i+1} \quad (5)$$

各リンクの回転軸周りのモーメント  $\tau_i$  は, (6) 式のように  ${}^i n_i$  の回転軸方向の成分をとることで求められる。

$$\tau_i = {}^i n_i^T Z_i \quad (6)$$

以上の計算を  $i=3, 2, 1$  と繰り返すことで回転軸に対してモーメントが作用した場合の運動方程式が導かれる。 $\tau_i$  はロボットの場合にはアクチュエータのトルクになるが, 今回考えているような系では各リンク間はバネで結合されているので (7) 式ようになる。

$$\tau_i = -k_i \theta_i \quad (7)$$

### 3・2 導出された運動方程式

以上の操作を行うと非常に複雑な式が得られるが, 2次以上の項を省略して線形化すると (8) 式の運動方程式が得られる。ただし減衰の項は考慮していない。

$$J\ddot{\Theta} + K\Theta = 0 \quad (8)$$

$$J = \begin{bmatrix} I_{1z} + \frac{I_{2y} + I_{2z}}{2} + I_3 & \frac{I_{2z} + I_3}{\sqrt{2}} & \frac{I_3}{\sqrt{2}} \\ \frac{I_{2z} + I_3}{\sqrt{2}} & I_{2z} + I_3 & 0 \\ \frac{I_3}{\sqrt{2}} & 0 & I_3 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \quad \Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad \ddot{\Theta} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix}$$

ここで  $J$  は各リンクの慣性モーメントを成分とする慣性行列,  $K$  は各スプリングのバネ定数を成分とする剛性行列である。また  $I_{1z}$ ,  $I_{2y}$ ,  $I_{2z}$ ,  $I_3$  はそれぞれ,  $Z_1$  軸周りのフレーム 1 の慣性モーメント,  $Y_2$  軸周りのフレーム 2 の慣性モーメント,  $Z_2$  軸周りのフレーム 2 の慣性モーメント,  $Z_3$  軸周りのフレーム 3 の慣性モーメントである。慣性行列の中の 1 行 2 列, 3 列成分が存在しており, 3 自由度連成振動系となっていることが導出された方程式からも分かる。

この系の共振周波数と振幅比は以下の手順で求めることができる<sup>13)</sup>。まず (8) 式の基本解を (9) 式のようにおくと, (8) 式は (10) 式のように置き換えられる。

$$\theta_i = A_i \sin(\omega t + \phi) \quad (9)$$

$$\omega^2 J\Theta - K\Theta = 0 \quad (10)$$

(10) 式の解は (11) 式で表わされる特性行列式  $\Delta$  が 0 となる時のみ与えられる。

$$\Delta = |\omega^2 J - K| = 0 \quad (11)$$

(11) 式より  $\omega^2$  について 3 次の代数方程式が得られ, これらより 3 個の共振周波数を与える解が得られる。これらの値を  $\omega_1^2$ ,  $\omega_2^2$ ,  $\omega_3^2$  とおいて (10) 式に代入す

ると、(12)式が得られる。

$$\omega_1^2 JA^1 - KA^1 = 0 \quad (12)$$

各々の共振周波数  $\omega_1$  について(12)式を解くと  $A_1^1$ ,  $A_2^1$ ,  $A_3^1$  が求められ、振幅比を求めることができる。

振動モードから走査軌跡を計算するには、まず各振動モードについての各リンクの振幅比からリンク3のミラー面の法線ベクトルである  ${}^0X_3$  の方向の直線の方程式を求める。次にこの方程式と走査軌跡を観察するスクリーンの平面の方程式との交点が描く軌跡を求めれば良い。まず  ${}^0X_3$  を基準座標 (フレーム0) について表すと(13)式ようになる。

$${}^0X_3 = {}^0_1R_1^2 R_2^3 R_3^3 X_3 \quad (13)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 \left( \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sqrt{2}} \right) - \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_3}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta_3 \left( \cos \theta_2 \sin \theta_1 + \frac{\cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sqrt{2}} \right) + \frac{\cos \theta_1 \sin \theta_3}{\sqrt{2}} \\ \frac{\cos \theta_3 \sin \theta_2}{\sqrt{2}} - \frac{\sin \theta_3}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

ここで

$${}^0X_3 = (l, m, n) \quad (14)$$

とおくと、原点を通り方向が  ${}^0X_3$  の直線の方程式は(15)式で得られる。

$$x/l = y/m = z/n \quad (15)$$

いま、ミラーの中心位置を  $(0, 0, 0)$  に置き、点  $(1, 0, 0)$  から点  $(0, 0, 0)$  に向かって光を照射し、走査軌跡を観察するスクリーンを  $x=1$  の位置に  $yz$  平面に平行に置いたと考えると、直線と平面の交点は(16)式となる。

$$y = m/l, \quad z = n/l \quad (16)$$

共振状態では各リンクの振幅比は一定なので  $y, z$  は  $\theta_1$  の関数として表わすことができる。従って走査軌跡の水平面との傾き  $\beta$  は(17)式で表わせる。

$$\beta = \tan^{-1} \left[ \frac{\partial z / \partial \theta_1}{\partial y / \partial \theta_1} \right] \quad (17)$$

### 3・3 解析結果

外形寸法が9.3 mm角の2次元スキャナを設計し、図6に示す形状パラメータを代入して計算をした結果、得られた振動モードと走査軌跡を図7に示す。縦軸は  $\theta_1$  方向の振幅  $A_i$  を1とした場合の各リンクの振幅比である。振幅比の符号は振動の位相を表し、正の場合は同相、負の場合は逆相すなわち逆回転することを示している。モード1ではリンク2が大きく振動し、モード2ではリンク3が大きく振動する。モード3ではやはりリンク3が大きく振動するが、その方向はリンク1とは逆になる。従って駆動周波数を変える

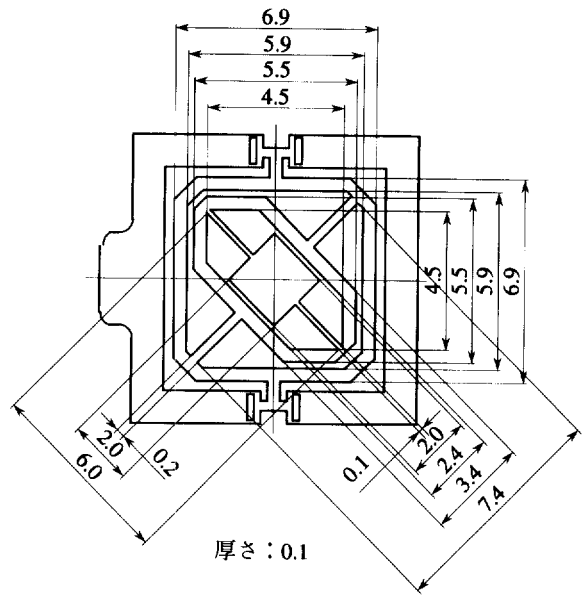


Fig. 6 Parameters in this calculation

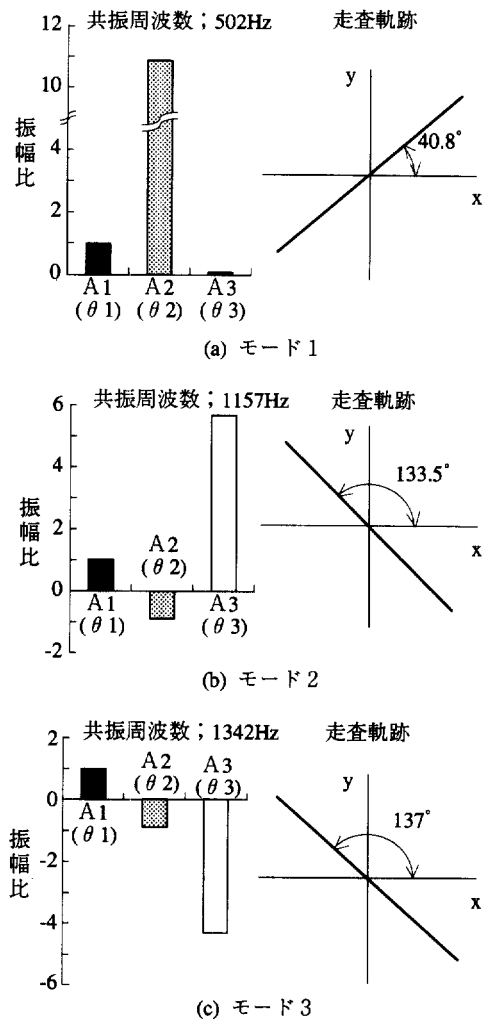


Fig. 7 Calculation result of the vibration mode

ことにより、リンク2またはリンク3を選択的に大きく振動させることが可能である。これにより二つの方向すなわち2次元の光走査ができる。モード1とモード2の走査方向の交差角は約93度であり、これらのモードを利用することによりほぼ長方形の領域を走査できることが分かる。

#### 4. 2次元スキャナの特性

##### 4.1 共振周波数

製作した2次元光スキャナの周波数特性を図8に示す。共振時の走査角度が±30度になるように、圧電バイモルフに加える電圧を40 V<sub>p-p</sub>から100 V<sub>p-p</sub>の範囲で調整した。この2次元光スキャナは先の振動解析の結果が示すように三つの共振周波数で共振した。共振のモードを低い周波数から順にモード1、モード2、モード3とする。共振周波数はモード1で510 Hz、モード2で918 Hz、モード3で1107 Hzである。これらの値は先に述べた振動解析の結果と比較的良く一致

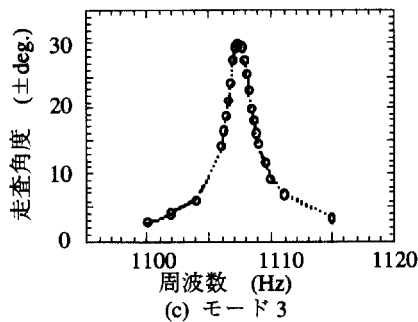
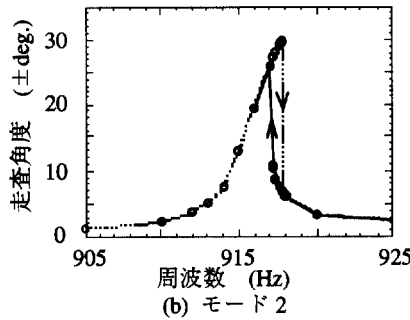
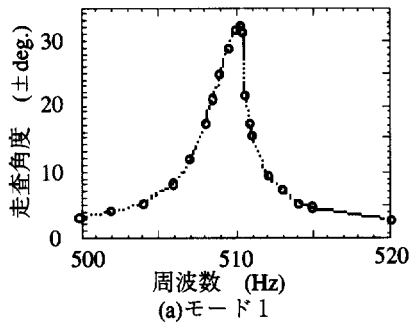


Fig. 8 Frequency characteristics

している。なおモード2では走査角度が急激に飛び移るジャンプ現象が見られた。これはばね-質量振動系において、力と変位が非線形になる場合の強制振動時に見られる現象と思われる<sup>14)</sup>。しかしモード2のみジャンプ現象が現われた原因は不明である。

##### 4.2 走査角度

図9に各モードの共振周波数で駆動した時の駆動電圧と走査角度との関係を示す。図中縦軸は走査角度の半値角を表わす。電圧の増加と共に走査角は増大する。モード1では90 V<sub>p-p</sub>で±30度、モード2, 3では20 V<sub>p-p</sub>の印加でそれぞれ±30度, ±24度の走査角度が得られた。モード1ではモード2, 3に比べ高い電圧が必要になっているが、これは振動する部分の面積が大きいことに起因する空気抵抗による減衰が大きいためと考えられる。

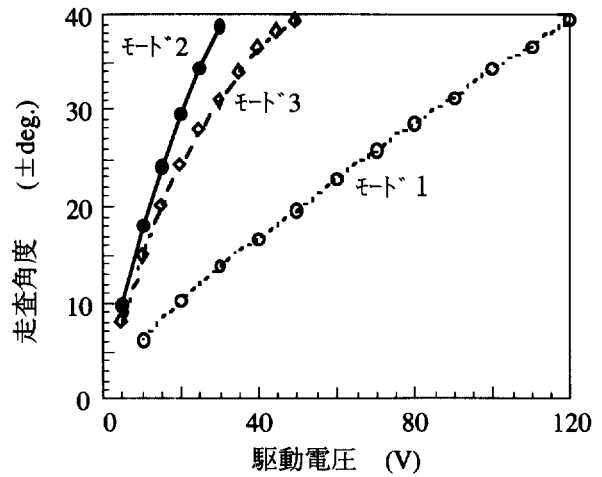


Fig. 9 Driving voltage characteristics

##### 4.3 走査軌跡

2次元光スキャナを各モードで共振させ、中央のミラーにレーザー光を照射して走査軌跡を観察した。その結果を図10に示す。各モードの共振のQ値はそれぞれ、モード1で170、モード2で400、モード3で530である。各モードでの共振のQ値が大きいため、共振状態の分離は良好である。そのため駆動周波数を切り替えて単一のモードで走査することができ、1次元の走査が可能である。

共振周波数と走査角度について、先に述べた運動解析の結果と実験結果の比較を表1に示す。複雑な3自由度連成振動系を構成しているにもかかわらず、両者は比較的良く一致している。

さらにモード1とモード2の駆動信号を加算して印

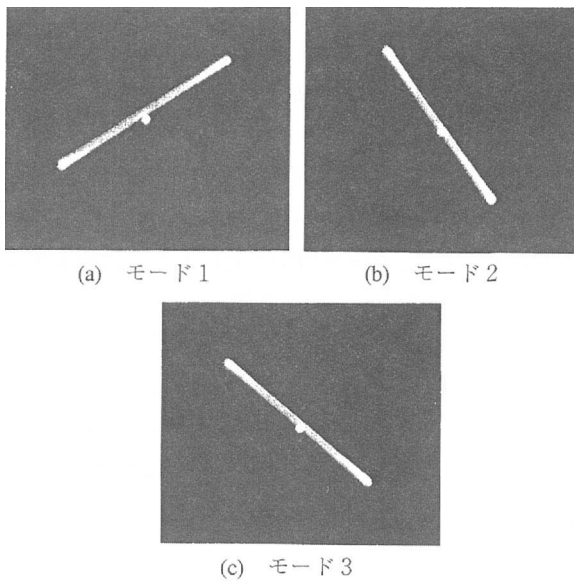


Fig. 10 1-dimensional scanning images

加すると、図 11 に示すように 2 次元の走査軌跡が得られた。これらのことは 2 次元バーコードの読み取り等への応用が可能であることを示している。さらに走査角度を検出するセンサを組み合わせることで画像情報

Tab. 1 Comparison with analysis and experiment

		解析結果	実験結果
共振周波数 (Hz)	モード1	502	510
	モード2	1157	918
	モード3	1342	1107
走査軌跡 (度)	モード1	40.8	33.0
	モード2	133.5	125.9
	モード3	137.0	140.3

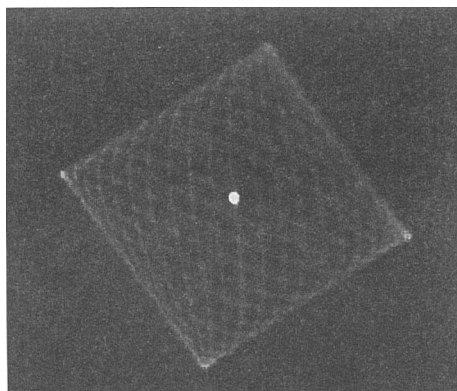


Fig. 11 2-dimensional Scanning image

の読み取りにも適用できる可能性がある。

次に外乱振動の影響を調べた結果を図 12 に示す。比較の対象として、図 13 に示すねじり振動系と曲げ振動系を組み合わせた 2 次元光スキャナを使用した。この 2 次元光スキャナは左右の圧電バイモルフを逆位相の駆動を行うことでねじり振動の共振を励起し、同位相の駆動を行うことで曲げ振動の共振を励起する。この駆動により 1 次元の光走査ができる。さらにねじり振動の共振周波数と曲げ振動の共振周波数を加算して印加することで、二つの振動を同時に励起し 2 次元の光走査ができる。図 12 は二つの 2 次元光スキャナを光学定盤の上に乗せて上下方向の振動を加え、走査軌跡の変化を時系列的に観察したものである。図中上が今回考案した二つのねじり振動系による 2 次元光スキャナで、下がねじり振動系と曲げ振動系を組み合わせた 2 次元光スキャナである。

図 13 に示すねじり振動と曲げ振動を組み合わせた 2 次元光スキャナのミラーの重心は、ねじり振動の回転軸 P2 上にあるが、曲げ振動の回転軸 Q2 上にない。外乱により並進力が固定端に作用すると、ねじり振動の回転軸 P2 上にはミラーを曲げようとするモーメントは発生しないのに対し、曲げ振動の回転軸 Q2 上にはモーメントが発生する。一方、図 3 に示す二つのねじり振動による 2 次元光スキャナは、固定端に並進力が作用してもミラーの重心は二つの回転軸 P1, Q1 上にあるためミラーを曲げようとするモーメントは発生しない。このような理由により曲げ振動系は外乱振動に弱く走査軌跡が大きく乱れるのに対し、本 2 次元光スキャナは外乱振動に強いことがわかる。

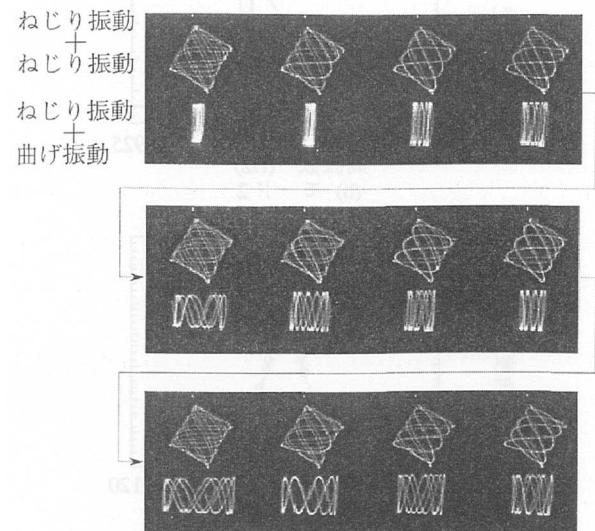


Fig. 12 Comparison of vibration robustness

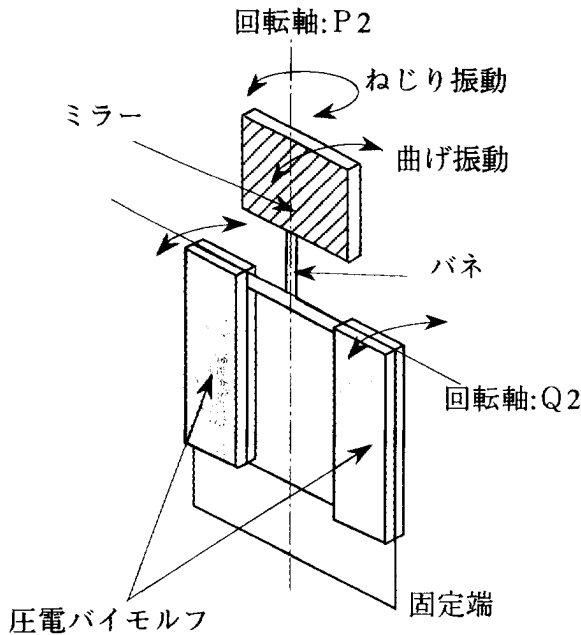


Fig. 13 2-dimensional optical scanner with a combined twisting and bending vibration

### 5. まとめ

- (1) 平面構造で外乱振動に強く、1系統の回路で駆動できる新規構造の2次元光スキャナを考案した。
  - (2) 本2次元光スキャナに採用した3自由度ねじり振動系の挙動を表わす運動方程式を導出した。
  - (3) 考案した2次元光スキャナを試作し、2次元光走査が可能なること、大きな走査角が得られること、および外乱振動に強いことを確認した。また導出した運動方程式の妥当性を示した。
- 最後に本2次元光スキャナの運動方程式の導出にあたり多大なご助言を頂いた小菅一弘東北大学工学部教授に深く感謝致します。

### ＜参考文献＞

- 1) 後藤友彰, 松下浩二, 広野克己, 中川亘: “マイクロマシニングによるシリコンねじり振動子の試作”, 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p. 829
- 2) 白田孝, 梅田章, 山田啓文: “2自由度静電駆動

型ねじり振動子”, 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p. 913

- 3) N. Asada, H. Matsuki and M. Esashi: “Two-dimensional silicon micro optical scanner”, Proc. of the International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots (1995), p. 626
- 4) 特許公報, 昭60-57052
- 5) 杉山尚樹, 山崎大輔, 植田敏嗣: “水晶のマイクロマシニングによるガルバノメータ”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 29 (1993), No. 6, p. 647
- 6) Patent: PCT/DK89/00190
- 7) H. Goto and K. Imanaka: “Super compact dual axis scanning unit applying a torsional spring resonator driven by a piezo-electric actuator”, Proc. SPIE, vol. 1554 (1991), p. 272
- 8) H. Goto and K. Imanaka: “Compact optical scanner capable of dual-axis scanning”, Proc. CLEO, Baltimore, CWM3 (1991), p. 314
- 9) H. Kamoda, H. Goto and K. Imanaka: “Two dimensional optical position sensor using a dual axis miniature optical scanner”, Proc. SPIE, vol. 1751, p. 280
- 10) Y. Ohtsuka, H. Nishikawa, T. Koumura and T. Hattori: “2-dimensional optical scanner applying torsional resonator with 2 degrees of freedom”, Proc. of MEMS'95, Amsterdam, the Netherlands, p. 306
- 11) J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. Paul: “On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators”, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 102 (1980), p. 120
- 12) John J. Craig 著, 三浦宏文・下山勲訳: ロボティクス——機構・力学・制御——, 共立出版 (1991), p. 163-167
- 13) 斎藤秀雄著: 工業基礎振動学, 養賢堂 (1987), p. 244-248
- 14) 斎藤秀雄著: 工業基礎振動学, 養賢堂 (1987), pp. 133-138





〈 筆 者 〉



大塚 義則 (おおつか よしのり)

基礎研究所 研究1部  
半導体センサのデバイス・プロセス、自動車用 LSI の研究開発に従事。



秋田 成行 (あきた しげゆき)

基礎研究所 研究1部  
半導体センサ、自動車用 LSI、ASIC 機能回路の研究開発に従事。



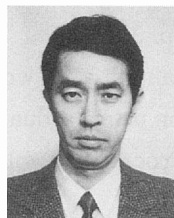
西川 英昭 (にしかわ ひであき)

基礎研究所 研究1部  
半導体プロセス装置、マイクロオプトデバイスの研究開発に従事。



服部 正 (はっとり ただし)

フラットパネルプロジェクト部  
マイクロマシニング、半導体センサ、ディスプレイの研究開発に従事。  
工学博士。



甲村 司 (こうむら つかさ)

基礎研究所 研究1部  
ホログラフィ、マイクロオプトデバイスの研究開発に従事。