小型走査型 2 次元イメージセンサの開発*

後 藤 博 史** 米 田 匡 宏*** 今 仲 行 ...***

Development of a Scanning Type Miniature Two-Dimensional Image Sensor

Hiroshi GOTO, Masahiro YONEDA and Koichi IMANAKA

A new simple method to detect the scanning position of a laser beam from a miniature two-dimensional optical scanner is proposed in order to develop a scanning type miniature two-dimensional image sensor which is as small as possible. In the method, the scanning position is directly detected from the wave of the driving voltage of the piezo-actuator by using the following relation: the phase delay between the driving voltage and the reflection angle of the mirror is 90° , since the two-dimensional vibrator, on which the mirror is mounted, is driven at the resonance frequencies. Additional mechanical components to detect are not hence required; and then the size of the miniature two-dimensional image sensor is $25\text{mm} \times 26\text{mm} \times 15\text{mm}$, kept as small as that of the main component, namely the two-dimensional optical scanner. The accuracy of detection experimentally obtained was $0.1\text{--}0.2\text{mm}$, and the resolution of detection was 0.2mm .

Key words; optical scanner, piezoelectric actuator, two dimension, resonance, image sensor, mirror, detection of scanning position, micromachine

1. は じ め に

光を検出媒体としたセンサは、非接触測定が可能である特徴を有し、光ディスク読取り装置に代表される情報機器やレーザ測長器などの計測機器をはじめ多くの分野で用いられている。また近年では、バーコードや 2 次元コードなどの符号読取りや、物体形状認識をはじめとした多次元の情報検知に対応した、光を多方向に走査する走査機構を組み込んだレーザ走査式光センサや、CCD カメラを用いた画像処理装置が開発され実用化されている。このうち走査型光センサは、外部照明が不要であることと 3 次元物体計測への展開が比較的容易であることから、自走マイクロマシンの視覚センサとして有望である。しかしそのためには、光源、光学素子、走査機構など、センサを構成する要素の小型化が不可欠である。このうち光源や光学素子については、半導体レーザや微小光学素子技術を応用して小型化が図られている。一方走査機構についても、マイクロマシニング技術を用いた小型走査機構がいくつか開発されており^{1)~3)}、筆者らもその 1 つとして 2 自由度ばね振動子の共振振動を利用した小型 2 次元光走査機構を開発し、実用化のための検討を進めてきた^{4) 5)}。

以上のような研究の進展から、われわれは極力小型化した走査型光センサの実現を目的として、新たな機構部品を必要とせず光走査位置を正確に検知するために、小型 2 次元光走査機構⁴⁾の共振振動時の位相特性に着目した駆動電圧信号から走査位置を決定する方法を試みることにした。

本報では、走査型イメージセンサの構成と 2 次元平面上での物体像の検出原理、提案した光ビームの走査位置検知方法

の検知精度、および試作した小型走査型イメージセンサによる 2 次元像検出性能の実験結果について述べる。

2. 走査型小型 2 次元イメージセンサ

2.1 物体の検出原理

光ビーム走査による物体像検出の基本原理を図 1 に示す。ここではセンサからある距離はなれた位置に設定される X-Y 平面上の画像を検出するものとする。センサの光走査機構から光ビームを X-Y 平面全体に 2 次元走査し、平面からの反射光の光強度をセンサの受光素子で検出する。走査する光ビームの X-Y 平面上での 2 次元走査位置情報 (x, y) と、その各走査位置での反射光量とを対応させ、検出平面内での反射光強度分布を求める。そして、あらかじめ設定した強度値で反射強度分布を 2 値化処理することによって物体像を求める。

Fig.1 The principle to detect a two-dimensional image by scanning a light beam

* 原稿受付 平成 8 年 7 月 8 日

** 正 会 員 オムロン(株) (つくば市和台 45)

*** オムロン(株)

2.2 イメージセンサの構成

図2に小型2次元イメージセンサの構成を示す。このイメージセンサは、非球面レンズを実装した半導体レーザ光源(a)、ビームベンダ(b)で折り曲げた光源からの光を2次元走査する2次元光走査機構(c)^{4) 5)}、検出物体からの反射光を受光する受光素子(d)、および受光素子で検出した信号を増幅するプリアンプ回路(e)とからなる。

検知平面上の光の走査位置を検出するには、走査機構内に設けたエンコーダなどを用いて走査ミラーの回転角度を検知して走査位置を求める方法や、走査された光の一部を光位置検出素子へ導きその素子の出力信号から位置を求める方法などがある。しかしながら、光走査位置検知のための素子や機構の付加は、極限までイメージセンサの小型化を図るには好ましくない。そこで、ここではイメージセンサの光走査機構に用いた図3に示す小型2次元光走査機構^{4) 5)}の特徴—2自由度振動子を共振周波数で駆動して光を走査する—を利用して、走査機構以外の素子や機構を用いることなく2次元光走査位置を求める方法を試みた。

3. 走査位置検知方法と検知精度

3.1 駆動電圧信号からの走査位置の検知方法

前述のように小型2次元光走査機構は、板ばねの共振振動を利用して光を走査しているので、共振振動しているミラーの振動角度 $\theta(t)$ は、圧電素子への正弦波の加振電圧 $V(t)$ に対して常に 90° の位相遅れが生じている。したがって、この関係により駆動電圧値からミラーの振動位置、すなわち光ビームの走査位置を知ることができる。

Fig. 2 The structure of the miniature scanning type of two-dimensional image sensor

Fig. 3 Miniature two-dimensional optical scanner

時間 t において圧電素子に印加される正弦波状駆動電圧 $V(t)$ は、正弦波状駆動電圧の振幅を V_a 、角振動数を ω 、オフセット値を V_{off} とすると次のように表される。

$$V(t) = V_a \sin \omega t + V_{\text{off}} \quad (1)$$

また、小型2次元走査機構の2自由度振動子の固有角振動数 ω_n で加振されるミラーの振動角度 $\theta(t)$ は

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \theta_0 \sin(\omega_n t - \frac{\pi}{2}) \\ &= -\theta_0 \cos \omega_n t \end{aligned} \quad (2)$$

である。ここで、 θ_0 はミラーの振動振幅である。式(1)で $\omega = \omega_n$ とおき、式(2)を代入してミラーの振動角度 $\theta(t)$ を求めると次式となる。

$$\theta(t) = \pm \theta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{V(t) - V_{\text{off}}}{V_a} \right)^2} \quad (3)$$

ここで、板ばねのねじり振動の正弦波状駆動電圧を $V_T(t)$ 、駆動周波数(=ねじり振動の固有角振動数)を ω_T とし、曲げ振動の正弦波状駆動電圧を $V_B(t)$ 、駆動周波数(=曲げ振動の固有角振動数)を ω_B とする。さらに、 $V_a = V_{\text{off}}$ 、つまり最小値を0 Vとする正弦波状駆動電圧を仮定する。そうすると、ミラーのねじり振動の振動角度 $\theta_T(t)$ 、および曲げ振動の振動角度 $\theta_B(t)$ は、式(3)より次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \theta_T(t) &= \pm \theta_{T0} \sqrt{1 - \left(\frac{V_T(t)}{V_a} - 1 \right)^2} \\ \theta_B(t) &= \pm \theta_{B0} \sqrt{1 - \left(\frac{V_B(t)}{V_a} - 1 \right)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで θ_{T0} 、 θ_{B0} はそれぞれねじりと曲げによるミラーの振動振幅である。なお、ミラーで反射し走査される光の走査角度は式(4)で与えられる角度の2倍である。したがってこの2次元イメージセンサから距離 L の位置にある2次元像面における時刻 t における走査位置 $x(t)$ 、 $y(t)$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$x(t) = L \tan 2\theta_T(t) \quad y(t) = L \tan 2\theta_B(t) \quad (5)$$

3.2 走査位置検知精度

この検知方法では走査機構が理想的な共振振動を行なっていること、つまりねじり振動および曲げ振動の駆動周波数がそれぞれの固有振動数に正確に一致していることを仮定している。したがって、共振振動がこの理想状態から外れた場合には検知位置に誤差を生じる。いまねじり振動の駆動角振動数が固有角振動数 ω_T からわずかにずれて ω_T' になり、そのため駆動電圧波形と共振振動波形との位相差が 90° から ϕ radだけずれたとする。そうすると振動角度 $\theta_T(t)$ は式(2)から次式のようにになる。

$$\begin{aligned} \theta_T(t) &= -\theta_{T0} \cos(\omega_T' t - \phi) \\ &= \theta_{T0} (\cos \omega_T' t \cos \phi + \sin \omega_T' t \sin \phi) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)に、式(1)から $\omega = \omega_T'$ として求められる $\sin \omega_T' t$ と、 $\cos \omega_T' t$ を代入すると次式となる。

$$\theta_T(t) = \pm \theta_{T0} \left\{ \sqrt{1 - \left(\frac{V_T(t)}{V_a} - 1 \right)^2} \cos \phi + \left(\frac{V_T(t)}{V_a} - 1 \right) \sin \phi \right\} \quad (7)$$

ねじり振動に関する走査位置検知誤差 $\Delta \theta_T(t)$ は、式(7)から式(4)を引いて次式となる。

$$\Delta \theta_T(t) = \theta_{T0} \left\{ \sqrt{1 - \left(\frac{V_T(t)}{V_a} - 1 \right)^2} (\cos \phi - 1) + \left(\frac{V_T(t)}{V_a} - 1 \right) \sin \phi \right\} \quad (8)$$

ここで3.1節で述べたように、駆動電圧 $V_T(t)$ は

$$V_T(t) = V_a \sin \omega_T t + V_a \quad (9)$$

であるから、式(9)を式(8)に代入し整理すると次式となる。

$$\theta_T(t) = \theta_{T0} \left\{ |\cos \omega_T t| (\cos \phi - 1) + \sin \omega_T t \sin \phi \right\} \quad (10)$$

ここで位相ずれ角 ϕ を微小として2次以上の微小項を省略すると、式(10)は次式となる。

$$\Delta \Delta \theta_T(t) \doteq \theta_{T0} \sin \omega_T t \cdot \phi \quad (11)$$

式(11)がねじり振動に関する走査位置検知誤差を表す式である。

曲げ振動に関する走査位置検知誤差も同様にして求められ、式(11)の下つき添字TをBに置き換えた次の式

$$\Delta \theta_B(t) \doteq \theta_{B0} \sin \omega_B t \cdot \phi \quad (12)$$

となる。

式(11)、式(12)からわかるように、走査位置検知誤差 $\Delta \theta_T(t)$ 、 $\Delta \theta_B(t)$ は位相ずれ量 ϕ と比例関係にあり、 $\sin \omega_T t = \pm 1$ 、または $\sin \omega_B t = \pm 1$ のとき、つまり式(9)から明らかなように、駆動電圧が極大値 $2V_a$ 、または極小値0 になったときに最も大きくなる。言い換えると、振動変位は駆動電圧より位相が 90° 遅れるから、振動変位が0 になったとき、つまり振動角度 $\theta_T(t)$ 、 $\theta_B(t)$ がそれぞれ0 になったとき、すなわち走査速度が最も速い走査エリアの中心部において、走査検知誤差 $\Delta \theta_T(t)$ 、 $\Delta \theta_B(t)$ が最も大きくなり、

$$\begin{aligned} |\Delta \theta_T(t)|_{\max} &= \theta_{T0} \cdot \phi \\ |\Delta \theta_B(t)|_{\max} &= \theta_{B0} \cdot \phi \end{aligned} \quad (13)$$

となる。

この式(13)から明らかなように、例えば走査位置検知誤差の最大値を走査振幅（ミラーの振動振幅）の1%以下にするには

$$\phi < 0.01 \text{ rad}$$

となるように、ねじれ振動および曲げ振動とも駆動周波数を設定する必要があることがわかる。

3.3 駆動周波数に必要な設定精度

走査位置検出精度1%を得るために必要となる0.01rad以下の位相ずれとなる駆動周波数設定精度について検討する。固有角振動数 ω_n の振動子を振動数 ω で加振するときの加振波形と振動波形との間の位相差 ϕ は、減衰比 ξ を用いて式(14)で示される。

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\xi(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (14)$$

試作した2次元光走査機構のB軸およびT軸回りに関するQ値はそれぞれおよそ600と900であったので、いま振動子のQ値($Q=1/(2\xi)$)を1000と仮定すると、位相差 ϕ が $\pi/2 \pm 0.01 \text{ rad}$ 以内となる加振振動数の固有角振動数に対する変動許容比 (ω/ω_n) を式(14)を用いて計算すると、0.0005%とな

る。したがって、走査位置の検出精度1%を維持するには加振周波数を振動子の固有振動数の0.0005%以内、たとえば振動子の共振周波数が200Hzの場合には $200 \text{ Hz} \pm 0.001 \text{ Hz}$ に設定する必要がある。

4. 試作した小型走査型2次元イメージセンサと物体の検出実験

4.1 小型走査型2次元イメージセンサの仕様

試作した小型走査型2次元イメージセンサの外観を図4に示す。イメージセンサの外形は $25 \text{ mm (W)} \times 26 \text{ mm (D)} \times 15 \text{ mm (H)}$ (図2参照)である。このイメージセンサの検出性能を、検出距離200mm、検出範囲 20° 、検出対象物を拡散反射面と仮定して、このイメージセンサを構成する2次元光走査機構、半導体レーザー光源、受光素子の各仕様を表1のように決定した。小型2次元光走査機構の走査角度は 20° 以上とし、また像面全体を走査できるようにするために、曲げ振動とねじり振動の共振周波数が整数比にならない455Hzと127Hzとなるように設計した。光源には外形5.6mmの可視光半導体レーザーにコンパクトディスクのピックアップ用対物レンズをアライメント実装したものを用い、出力1mWとし100~200mm先でビームが収束するようにした。受光素子には外形10mm×10mmのシリコンフォトダイオードを用い、センサ光源の波長670nm以外の外乱光による光ノイズを防ぐために波長フィルタをフォトダイオードの前方に設けた。

イメージセンサで検知した信号を処理するシステムの構成を図5に示す。受光素子で検知した反射光は、電流電圧変換回路、自動信号振幅調整回路、および2値化回路を経てバイナリー信号（物体信号）としてコンピュータへ入力した。また走査位置を求めるために、走査機構駆動回路からの電圧信号を12ビットのA/Dコンバータでデジタル化し、12ビット信号としてコンピュータへ入力した。したがって、走査位置の電氣的分解能は全走査幅の $1/2^{11} = 1/2048$ である。なお本実験では、駆動回路に最小周波数設定精度0.001Hzの周波数発振器

Fig. 4 The prototype of a miniature two-dimensional image sensor

Table 1 The specifications of sensor elements

Optical scanner	
Scanning frequency	Torsional: 455Hz Bending: 127Hz
Scanning angle	$20 \times 20^\circ$
Light Source	
Wave length	670nm
Output power	1mW
Photo detector	
Detecting area	10×10mm
Sensitivity	0.56A/W

を用いた。各走査位置とその位置における物体信号とをコンピュータのメモリに順次蓄積し、蓄積した信号を2次元平面像としてディスプレイ上に表示した。

4.2 2自由度振動子の共振周波数の安定性の実験

3.3節で検討したように、走査位置検知精度を全走査幅の1%以下とするには、振動子の共振周波数と振動子の加振周波数との差を0.0005%以内にすることが必要であるので、試作した走査機構振動子の共振周波数安定性について実験した。振動子の共振周波数は、周囲の環境温度変化によって最も大きく影響を受けるので、温度に対する共振周波数の変化を測定した。その結果を図6に示す。共振周波数は温度の上昇とともに低下し、室温付近におけるその変化率は振動子のねじり方向で $-2.3 \times 10^{-3} \%/^{\circ}\text{C}$ 、曲げ方向で $-1.2 \times 10^{-3} \%/^{\circ}\text{C}$ であった。したがって、走査位置検知精度を維持するには、常に一定の周波数で駆動するとして、周囲の温度変化を $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内に設定する必要があることがわかった。

4.3 走査位置の検知精度と物体検知分解能の実験

試作したイメージセンサを用いて、まず物体位置の検知精度（走査位置検知精度）を評価した。白紙上に幅1mmの黒線を1本描き、その黒線の位置の検知精度を求めた。黒線を走査範囲の中心と、走査範囲の両端から5mm内側に設置し、光走査機構で光を1方向のみに走査し、各々の位置に設けた線の中心位置検知精度を測定した。図7に試作したイメージセンサを用いて走査位置中心に設けた線の検知を行なったときの信号波形を示す。図7の上の信号は走査機構駆動電圧波形を、下の信号は受光素子で検知し2値化処理した受光信号を示す。受光信号パルスの中心が検出した線の中心位置を示すので、このパルスの中心位置に対応する駆動電圧値を駆動電

Fig. 5 The block diagram of sensing and processing systems

Fig. 6 The shift of the resonance frequency

圧波形から求め、式(4)から位置を計算で求めた。図8(a)～(c)、図9(a)～(c)に各位置における線の位置検知精度を繰返し測定した結果を示す。

図8は走査機構のねじり振動方向における検知精度を、図9は曲げ振動方向における検知精度を示す。これらの結果から求めた検知誤差の平均値と標準偏差を表2に示す。各位置とも誤差の平均は0.01mmで、標準偏差は、0.1～0.2mmとなった。走査範囲の中心に比べて両端の位置における精度が良くなっているが、これは前述したように走査範囲の中心において最も位置精度の誤差が生じやすいためである。これらのことから、本センサの位置検知精度は0.2mm以下であることがわかった。なお位置検知精度は、正弦波駆動電圧波形のひずみや走査機構の走査直線性などにより影響を受けるが、本実験では駆動信号に発振器を用いたことと、走査機構の直線性は0.1%以下⁴⁾と良好であったことから、これらによる精度劣化は見られなかった。

Fig. 7 Signals measured to evaluate detection accuracy

Fig. 8 Detection accuracy measured on (a) the center, (b) the left side and (c) the right side of scanning area, for twisting mode

Fig. 9 Detection accuracy measured on (a) the center, (b) the left side and (c) the right side of scanning area, for bending mode

Table 2 The mean value and standard deviation of measured detection accuracy

		Center	Left	Right
Twisting	M.V.	0	-0.01	-0.01
	S.D.	0.13	0.10	0.10
Bending	M.V.	-0.01	0.01	0.01
	S.D.	0.20	0.11	0.09

Fig. 10 Detected signal to evaluate resolution

Fig. 11 The resolution of two-dimensional image sensor

次に検出分解能の評価を行なった。白紙上に等間隔で黒線と白線を交互に全部で16本描き、その線を検出したとき、前後の検出信号が重なることなく判別できる限界の線幅を検出分解能とした。線幅は0.2mm, 0.3mm, 0.5mm, 1mmの4種類、検出距離は50mmから250mmまで50mm間隔で設定し、実験を行なった。0.2mmの線を50mmの位置で検出した検出信号を図10に、検出距離と分解能の関係を図11に示す。この図のように試作したイメージセンサでは、検出距離50mm～100mmの位置で分解能が最小値0.2mmとなり、検出距離が長くなるにつれて分解能が劣化し、200mmの位置では0.5mmとなった。これは、レーザビームが100mmの位置で集光するビーム性能としたためと考えられる。このことから、例えば検出距離200mmの位置では光学的検出分解能は0.5mm、すなわち20°の全走査範囲（像面における検出範囲170mm×170mm）に対して1/340であり、約11万画素に相当する像の検出がこのセン

4.4 2次元像の検出実験

図12(a)～(d)に試作したセンサを用いて白紙上の50mm×50mmの範囲に描かれた2次元像を検出した結果を示す。図形の種類によらず、また文字の判別も可能な良好な2次元像の検出が確認できた。なお、検出距離はいずれも150mmで、これらの像が判別できるレベル（約70%のデータ蓄積）までに要する時間は約0.2秒であった。

5. まとめ

本研究では、極力小さな光走査型イメージセンサの開発を目的として、前報^{4) 5)}で報告した2次元光走査機構により走

Fig. 12 Detecting performance for (a) circle, (b) triangle, (c) rectangle and (d) character pattern

査される光の位置を、新たな機構要素を付加することなく検出する方法を提案し、その方法を用いた小型走査型2次元イメージセンサを試作し、性能試験を行なった。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 小型2次元光走査機構の共振特性を利用した走査位置検出方法を提案し、必要な温度の設定精度、駆動周波数の設定精度を明らかにした。
- (2) 2次元光走査機構を搭載した外形25mm×26mm×15mmのイメージセンサを試作し、0.1～0.2mmの位置検知精度と0.2mmの検出分解能を得た。
- (3) 試作したイメージセンサで2次元像を検出し、良好な像の検出が可能であることを確かめた。

本研究開発は、通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として、NEDOから委託を受けた（財）マイクロマシンセンターの再委託業務として、オムロン（株）が実施したものである。

また、本論文をまとめるに際し、多大なご助言をいただいた東京工業大学工学部機械知能システム学科の林巖教授に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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, 29, 6, (1993) 647.
- 2) N.Asada, H.Matsuki, K.Minami and M.Esashi: Silicon Micro-machined Two-Dimensional Galvano Optical Scanner, Trans Magn., 30, 6 (1994).
- 3) Y.Ohtsuka, H.Nishikawa, T.Koumura and T.Hattori: Two-Dimensional Optical Scanner Applying Torsional Resonator with 2 Degrees of Freedom, Proc. MEMS'95 (Amsterdam), (1995) 306.
- 4) 後藤博史, 加守田裕樹, 今仲行一: 小型2次元光走査機構の開発—第1報, 走査原理と基本特性—, 日本機械学会論文集 (C編), 62, 596 (1996) 394.
- 5) 後藤博史, 池田正哲, 坂田稔, 矢田恒二: 小型2次元光走査機構の開発—第2報, 低電圧駆動, 大走査角化を目的とする2自由度板ばね振動子の高性能化—, 日本機械学会論文集 (C編), 62, 600 (1996) 262.