背景光の影響を除去した高速三次元位置検出センサ

正員 永村 栄治 (熊本大) 非会員 網屋 修博 (熊本大)
 非会員 高田 賢治 (熊本大) 正員 相田 貞藏 (熊本大)
 非会員 鉾 立 竜也 (熊本大) 正員 内村 圭一 (熊本大)

Fast Three-Dimensional Position Detective Sensor with Disturbance Removal of Background Light

Eiji Nagamura, Member, Kenji Takada, Non-member, Tatsuya Hokotate, Non-member, Michihiro Amiya, Non-member, Teizo Aida, Member, Keiichi Uchimura, Member (Kumamoto University)

A new sensor for measuring the three-dimensional coordinates and the three-dimensional shape of an object was fabricated. A laser-spotlight was used as the light source. This laser-light is irradiated on a polygon mirror. As the mirror rotates, this light scans the object surface from the lower side to the upper side. The light reflected from the object scans the surface of the sensor developed in this study.

On the sensor surface, 21×21 phototransistor-elements are arranged two-dimensionally. Out of these phototransistor, only the elements receiving light operate and their output signals are sent to the digital parallel processing circuit.

The role of this circuit is to detect the position (x_s, y_s) of the center element among the phototransistors, activated by the light reflected from the object. These detected values are then passed to a personal computer. By processing the values, x_s and y_s , with the computer program, the three-dimensional coordinates (X, Y, Z) of the center position of the laser-light spot on the object surface are calculated in a real-time fashion.

The time required for the measurement of the (X, Y, Z) is as small as $3.3 \mu\text{s}$. In addition, even when the surface of the object is illuminated by the background light of the magnitude of $1,000 \text{ lx}$, there is no influence on the measured values (X, Y, Z) .

Furthermore, the data of many positions on the object surface are obtained and stored in the memory units of the computer by repeating the above-mentioned operations, the system can offer a display of the three-dimensional shape of the object on the CRT, but, the number of phototransistor elements are few 21×21 elements. This causes that the maximum error ΔY (or ΔZ) in the measured value Y (or Z) becomes as large as 3.4 mm for the distance of about 320 mm between the object and the sensor.

キーワード：三次元計測，センサ

1. ま え が き

視覚センサを用いた三次元形状測定法としては，視点の異なる2台のカメラを用いる両眼立体視（ステレ

オビジョン）法⁽¹⁾，スポット光やスリット光を投影し，光の投影されている位置から三次元位置を決定する光投影法⁽²⁾⁽³⁾などがあるが，現在，光投影法が測定精度，測定時間，信頼性などの点で実用性の高い方法

従来、光投影法の受光部としては、CCDなどの走査形カメラが用いられている。しかし、走査形カメラの場合、画面走査が必要なため、多数の測定点を得るためには多大な測定時間を要する。著者らは、非走査形で応答速度の速いPSDカメラ（応当速度10 μ s）を用いた三次元形状測定法を提案した⁽⁴⁾。しかし、PSDは光の重心位置を求めるため、背景光下では誤差を生じる。その誤差を補正する方法も提案した⁽⁵⁾が、背景光がない場合と比べて測定時間が長くなり、誤差も多少大きくなる欠点をもっていた。

2. センサの構成

まず、スポット光抽出部ではスポット光走査を利用して、受光されたスポット光を背景光から抽出し、 X および Y 方向にスポット光が受光されている画素は1 (ON)、受光していない画素は0 (OFF) として、連続的なデジタル信号として、並列に出力される。

各部の動作は並列的に行われ、スポット光抽出部では $3\mu\text{s}$ 、位置検出部は $0.3\mu\text{s}$ であり、全体としては $3.3\mu\text{s}$ と高速である。従来の代表的な位置検出セン

サであるPSDと比較して、検出速度は同等以上でPSD⁽⁵⁾と異なって背景光による影響はほとんど

そこで、図3の高周波抽出部により、スポット光のみの成分を次のようにして抽出した。背景光(蛍光灯, 約120 Hz)はスポット光による出力成分に比べて低周波成分となるから、高域フィルタにより、背景光成分を含んだPT出力からスポット光のみの成分が抽出できる。なお、PTには、1対1に対応して簡単な高域フィルタが取付けられているので、瞬時にスポット光のみの信号が抽出できるようになっている。

最後に、波形整形部では XY 変換部の x_s, y_s 方向の出力を増幅した後、あるしきい値以上の出力は 1(ON)、それ以下は 0(OFF) のデジタル信号とし

図 2 スポット光抽出部の構成
Fig. 2. Structure of spotlight extraction part.

図 3 スポット光抽出部の回路
Fig. 3. Circuits of spotlight extraction part.

図 4 センサ受光部のフォトトランジスタ PT の出力電圧波形

Fig. 4. Voltage waveform detected by phototransistor PT arranged in light-receiving-part of sensor.

て出力させる。

以上でスポット光抽出部の概要は説明したが、同抽出部では、各 PT からの光応答出力はそれぞれ独立に信号処理されるので、スポット光が抽出される時間は、大体において PT の応答時間 t_{pt} と波形整形部のオペアンプの応答時間 t_{op} の和となる。つまりスポット光抽出部の応答時間 t_{se} は、

$$t_{se} = t_{pt} + t_{op} = 2 + 1 = 3 \mu s \dots\dots\dots (1)$$

と高速である。

〈2・3〉 位置検出部 位置検出部では、前節のスポット光抽出部で抽出されたスポット光の受光面上での中心座標を求める。図 5 に代表例として x_s 方向の位置検出部の構成を示す。この位置検出部は、データラッチ部、中心位置検出部、数値化部から構成されている。

(1) データラッチ部 その動作は、まず、パソコンからのデータラッチ信号により、スポット光抽出部からの出力信号をラッチする。

図 5 センサ位置検出部の構成
Fig. 5. Structure of position detective part in sensor.

入力	0000000011111110000000
第1段階	0000000000111000000000
第2段階	0000000000010000000000
第3段階	0000000000001000000000
入力	0000000001111000000000
第1段階	0000000001111000000000
第2段階	0000000000110000000000
第3段階	0000000000010000000000

図 6 中心位置検出の説明図

Fig. 6. Concept of principle for detection of center position.

(2) 中心位置検出部 ここでは、次に述べる三段階の論理回路により x_s 方向における ON 信号の中心位置を図 6 に示すように検出される。

(i) 第一段階 第一段階の論理回路の論理式を次式に示す。なお、論理回路は付図 1 参照。

$$B1_i = A1_i (A1_{i-2} \oplus A1_{i+2} + A1_{i-3} + A1_{i+3}) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $A1_i$: 第一段階 i 番目の入力、

$B1_i$: 第一段階 i 番目の出力

この段階では、入力された ON 信号の両端 2 個ずつが OFF 信号となる。なお、本センサでは、第一段階において ON 信号が 4 個以下になるようにするので、そのためには第一段階の論理回路を何組付加するかが問題となる。いま、 x_s 方向 (y_s 方向) において、スポット光を受光したことによって ON となる最大画素数を n 、また、第一段階の論理回路の数を a とすると、

$$a = \lceil \frac{n-4}{4} \rceil \dots\dots\dots (3)$$

ここで、記号 $\lceil M \rceil$: M 以上の最小整数、

例えば、 $\lceil 0.2 \rceil$ は 1、 $\lceil 2.0 \rceil$ は 2 となる

ただし、回路上では入力 ON 信号が 4 個以下のときは、(3) 式の値は 0 となるので、これを避けるために入力信号がそのまま出力されるようになっている。今回試作したセンサは、 $n=5$ であったので、 $a=1$ となり、第 1 段階の論理回路は一つでよい。

(ii) 第二段階 第二段階の論理回路の論理式を次式に示す。

$$B2_i = A2_i (A2_{i-1} A2_{i+1} + A2_{i-2} \oplus A2_{i+2}) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $A2_i$: 第二段階 i 番目の入力、

$B2_i$: 第二段階 i 番目の出力

この第二段階で、第一段階より入力される ON 信号の両端 1 個ずつが OFF 信号となる。ただし、入力 ON 信号が、2 個以下のときは入力がそのまま出力される。第二段階により、出力 ON 信号は 1 個または 2 個となる。

(iii) 第三段階 第三段階の論理回路の論理式を次式に示す。

$$B3_i = A3_i (A3_{i+1} \oplus A3_i + A3_{i-1}) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $A3_i$: 第三段階 i 番目の入力、

$B3_i$: 第三段階 i 番目の出力

この第三段階で最終的に中心位置が決定される。入力 ON 信号が 1 個のときはその位置が中心位置となり出力される。入力信号が 2 個の場合は、どちらか一

方の信号を出力する必要があるので、ON 信号が $(i-1)$ 番目と i 番目のときは、 i 番目の ON 信号が出力されるように設定した。以上により中心位置が決定され、中心位置となるビットは 1、他のビットは 0 として出力される。なお、各段階の演算時間は 72 ns である。

(3) 数値化部 中心位置決定後、データのビット数を減らすため、中心位置の数値化を行っている。今回試作したセンサは 21×21 の画素数であるので、出力は $1 \sim 21$ の二進数で出力され、出力ビット数は x_s, y_s 方向それぞれ 5 ビットである。従って、本センサの最終的な出力ビット数は 10 ビットである。

以上により、スポット光の中心位置が検出され、その座標が求められた。ここで、位置検出部の応答時間 t_{pd} を求める。データラッチ時間を t_{d1} 、中心位置検出時間を t_{cd} 、数値化の時間 t_{nv} とすると、 t_{pd} は、

$$t_{pd} = t_{d1} + t_{cd} + t_{nv} \\ = 0.028 + 0.216 + 0.05 \approx 0.3 \mu s \dots\dots\dots (6)$$

である。しかし、この応答時間は中心位置検出部における第一段階の論理回路が増すごとに、72 ns 増加する。

従って、今回の位置検出センサの応答時間は、スポット光抽出部は (1) 式より $3 \mu s$ 、位置検出部は (6) 式より $0.3 \mu s$ であるので、合計約 $3.3 \mu s$ である。

3. 実験結果

ここでは、位置検出センサによる実験結果と幾何光学的結果の比較を行った。図 7 にセンサの受光面と対象物との配置を示す。位置検出センサの位置検出結果を得るために、センサの受光面と平行な平面对象物に走査スポット光を投射し、その散乱光をレンズにより受光面に結像し、受光面上での位置を位置検出センサによって求めた。ここで、センサの出力は x_s, y_s 方向ともに $1 \sim 21$ の整数で出力されるが、今回、受光面上の原点をセンサの中心としてセンサの出力 (x_s, y_s)

図 7 センサと対象物体間の配置
Fig. 7. Arrangement of sensor and object.

図 8 位置検出センサの実験結果
(図 7 の配置)

Fig. 8. Experimental results of sensor at arrangement shown in Fig. 7.

が、 $\{-10 \leq (x_s, y_s) \leq 10, x_s, y_s \text{ は整数}\}$ となるように座標を変換している。その結果は I/O ボードを通してパソコンに取込まれる。今回の実験では、100 回のスポット光走査を行い、その期間に得られた位置検出センサのすべての出力 (x_s, y_s) をパソコンに取込み、これらを X-Y プロッタ上に出力させた。

図 8 (a), (b) は走査スポット光を対象物に垂直に走査した場合、また (c), (d) 図はスポット光を対象物の $\bar{Y}$ 軸より $\bar{X}$ 軸方向に $\phi = -45, 45^\circ$ の角度で走査した場合の結果を示す。⊙印はその位置検出結果である。また、実線は図 7 より幾何光学的に求められたセンサ上の値で、⊙印と実線は大体一致することが確かめられる。

4. 三次元物体形状への応用

〈4・1〉 測定原理 今回の三次元形状測定法では、対象物がベルトコンベア上にあると仮定して形状測定を行っている。その対象物表面の三次元座標取得法を次に述べる。

図 9 に今回試作した三次元形状測定装置の配置図を示す。スポット光 (半導体レーザ) は、対象物上の $\bar{Y}$ - $\bar{Z}$ 平面上を走査させ、またセンサは $\bar{Y}$ 軸より $\alpha = 30^\circ$ となるように設定した。レンズの中心とセンサ

図 9 三次元形状測定のための配置図
Fig. 9. Arrangement for measuring three-dimensional shape.

の受光面との距離を l_1 、対象物上の原点 O とレンズの中心との距離を l_2 、センサ受光面上のスポット光の位置を (x_s, y_s) とすると、対象物上のスポット光の三次元座標 Y と Z は次式となる。

$$Y = \frac{-l_2 x_s}{x_s \cos \alpha + l_1 \sin \alpha} \quad \text{..... (7)}$$

$$Z = \frac{l_2 y_s \sin \alpha}{x_s \cos \alpha + l_1 \sin \alpha} \quad \text{..... (8)}$$

また、スポット光の X 座標については、ベルトコンベアが 1 走査につき 1 ステップ $\bar{X}$ 軸と逆向きに移動するとすると、対象物上の X 座標は次式となる。

$$X = N \times dX + X_0 \quad \text{..... (9)}$$

ここで、 N : ステップ数、 dX : ステップ距離、 X_0 : X の初期値

つまり、位置検出センサからの (x_s, y_s) とベルトコンベアのステップ数 (スポット光の走査数) N により、対象物上のスポット光の三次元座標 (X, Y, Z) を求めることができる。

〈4・2〉 測定システム 図 10 に測定システムの構成を示す。このシステムは、光走査部、受光部位置検出部、演算処理制御部から構成されている。

まず、光走査部では、半導体レーザからのスポット光が、回転十面鏡によって対象物を下から上に高速垂直走査を行う。

次に、受光部位置検出部において、対象物上のスポット点からの散乱光をレンズを介して受光面に結像させる。そして、受光面上の結像点の位置を今回提案した位置検出センサで検出し、演算処理制御部に受光面

図 10 三次元形状測定システムの構成図
Fig. 10. Block diagram of three-dimensional shape measuring system.

上での位置信号(x_s, y_s)を送る。演算処理制御部では、光走査のタイミングを検出し、それに合せて位置検出センサからの位置信号(x_s, y_s)をI/Oボードを通して取込む。そして、(7)~(9)式によって三次元座標を計算し、メモリーに格納する。

しかし、今回は演算時間を短縮するために次の手法をとる。それは、変数(x_s, y_s)の組合せにより、あらかじめ三次元座標を計算しておき、これを参照表としてメモリーに格納しておく。そして実際の測定では(x_s, y_s)が入力されると、これらの入力値に対応する三次元座標を参照表から読出し、読出された座標を測定値としてメモリーに格納するようにした。

また、回転鏡による1回転あたりの走査時間は800 μ sであるが、その中でセンサ受光面上に光が走査している時間 T_{spot} は150 μ sである。そこで、測定時間の効率化のため、1回の走査で、受光している150 μ sの間に位置検出センサからの出力をすべて(13点)取込み、その後、残りの時間(800-150=650 μ s)でそのデータにおける三次元座標を計算した。なお、センサ上の1点の座標(x_s, y_s)をパソコンに取込む時間 T_c は12 μ sであるから、スポット光1回の走査で測定できる測定点の数 n_s は

$$n_s = T_{spot}/T_c = 150 \mu s / 12 \mu s \approx 13$$

より13点となる。

また、1点あたりの平均測定時間は約60 μ s(800 μ s/13)である。

〈4・3〉 測定結果 対象物はスポット光を1回走査するごとに、(9)式で $\bar{X}$ 軸と逆方向に $dX=4$ mmずつ移動させた。対象物は、図11(a), (b)の右上に示すもので、対象物の中の破線部分の測定結果を

(a)

(b)

図 11 測定結果の三次元グラフィックス
Fig. 11. Three-dimensional graphics of measured results.

(a), (b)図に三次元グラフィックスで示す。それぞれの測定結果において、縦線は1回の走査で測定した点を結んだものであり、また図形を見やすくするため、高さ5 mmごとに横方向に等高線を引いた。

〈4・4〉 検 討 対象物表面の照度を200 lx(蛍光灯)とし、測定誤差($\Delta Y, \Delta Z$)を以下のように求めた。ここで、図9を再び参照する。

まず、 ΔY については、 $\bar{X}$ - $\bar{Z}$ 平面と平行な平面板を $\bar{Y}$ 軸方向に-30 mmから30 mmまで2 mm間隔に移動し、その位置 Y_c 、その位置の本システムによる測定値 Y_M を求め、

図 12 位置検出センサの測定誤差
(配置は図 7)

Fig. 12. Measured errors of sensor arranged at position shown in Fig. 7.

$$\Delta Y = |Y_G - Y_M|$$

より ΔY を計算した。その結果を図 12(a) に示す。次に、 ΔZ については、 $\bar{X}-\bar{Z}$ 平面と平行な平面板を $\bar{X}$ 軸上に置き、 -18 mm から 18 mm の高さまで 2 mm 間隔で測定した。その位置 Z_G 、その位置の本システムによる測定値 Z_M を求め、

$$\Delta Z = |Z_G - Z_M|$$

より ΔZ を計算した。その結果を (b) 図に示す。

図 12 より測定誤差は、最大でも

$$\Delta Y = 3.4 \text{ mm}, \Delta Z = 1.6 \text{ mm}$$

である。

なお、図 9 で $l_1 = 110.3 \text{ mm}$ 、 $l_2 = 207.7 \text{ mm}$ に設定した場合、本センサの各画素上に配置された光ファイバの外径は 1 mm で、 $l_2/l_1 = 2/1 = 2$ の比率になるので本測定システムの分解能は、 $1 \text{ mm} \times l_2/l_1 = 2 \text{ mm}$ となる。

従って、本システムの測定誤差 $\Delta Y, \Delta Z$ は、分解能 (1 画素) 程度となり、今回提案したセンサは、三次元形状測定には適するものと思われる。

以上は、 17 W 蛍光灯と対象物間を 0.5 m として、対象物表面の照度を 200 lx とした場合である。次に、背景光の影響を知るために、対象物表面の照度 200 lx と $1,000 \text{ lx}$ の場合の PT 出力電圧波形 (上段) と、高域フィルタ後の出力電圧波形 (下段) をそれぞれ図 13(a), (b) に示す。照度を $1,000 \text{ lx}$ に増大すると、PT 出力電圧波形 (右, 上) には、背景光 (蛍光灯) による $\sin$ 波形が重畳されるが、高域フィルタ後の出力電圧波形 (右, 下) には、背景光の影響は除去さ

図 13 背景光の影響 (高域フィルタの出力信号)

Fig. 13. Influence of background light on output signals of high pass filter.

れ、照度 200 lx の場合 (左, 下) と同等となる。

これらの結果より、本センサでは背景光の影響はないと考えられる。

5. む す び

本研究では、光投影法において、走査スポット光の位置を高速に検出できる新しいセンサを提案、試作した。このセンサにより、受光面上に入射した走査スポット光の位置 (X, Y, Z) を背景光に影響されずに $3.3 \mu\text{s}$ と高速に検出できた。しかも、 $\langle 4 \cdot 4 \rangle$ 節で述べたように測定誤差は、分解能 (1 画素) 程度であった。また、その出力信号は 10 ビットのデジタル信号であるので、位置 (X, Y, Z) の処理は非常に簡単である。

次に、三次元形状測定については、今回試作した位置検出センサならびに、半導体レーザ、回転鏡、パソコンを用いて三次元測定システムを試作した。本測定システムにおいて、対象物上のスポット光の 1 点あたりの測定時間は、約 $60 \mu\text{s}$ である。また、対象物とセンサ間の距離を約 320 mm にしたとき、測定誤差は、最大でも $\Delta Y = 3.4 \text{ mm}$ 、 $\Delta Z = 1.6 \text{ mm}$ である。これらの値は、分解能程度で比較的良好な結果が得られた。従って、将来センサの画素数を増し、集積化すれば高速、高分解能の三次元形状測定システムが得られるものと思われる。

(平成元年 4 月 24 日受付, 同 2 年 1 月 5 日再受付)

文 献

- (1) 安江・白井: 「物体認識のための両眼立体視」, 電総研彙報, 37, 1101 (昭 48)
- (2) 柿木・安藤・稲垣: 「三次元姿勢計測による実装部品検査技術」, 電学論 C, 61, 49 (昭 61-4)
- (3) O. Ozeki, T. Nakano & S. Yamamoto: 「Real-time range measurement device for three-dimensional object recognition」, IEE Trans. PAMI, PAMI-8, 550 (1986)

- (4) 中島・永村・相田：「PSD カメラによる回転板上の物体の3次元形状および断面測定」，信学論 C, **J70-C**, 1485 (昭62-11)
- (5) 相田・芥川・中島・山下・永村：「背景光の影響を補正した PSD カメラによる三次元座標検出法」，電学論 C, **107**, 632 (昭62-7)

付 録

付図 1 位置検出部の論理回路例
app. Fig. 1. Example of logic circuits in position detecting part.

永 村 栄 治 (正員)

昭和 62 年 3 月熊本大学工学部電気工学科卒業。平成元年 3 月同大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。在学中，三次元形状計測の研究に従事。電子情報通信学会会員。

高 田 賢 治 (非会員)

昭和 63 年 3 月熊本大学工学部電子工学科卒業。現在，同大学院工学研究科修士課程在学中。三次元形状計測の研究に従事。電子情報通信学会会員。

鉾 立 竜 也 (非会員)

平成元年 3 月熊本大学工学部電気工学科卒業。現在，同大学院工学研究科修士課程在学中。三次元形状計測の研究に従事。

網 屋 修 博 (非会員)

平成元年 3 月熊本大学工学部情報工学科卒業。同年 4 月(株)沖電気入社。在学中，三次元形状計測の研究に従事。

相 田 貞 藏 (正員)

昭和 24 年 3 月東北大学工学部電気工学科卒業。工学博士。40 年熊本大学工学部電子工学科教授。61 年同大学電気情報工学科教授。63 年 4 月より同大学工学部附属工学研究機器センター長併任。電気接点，雑音，三次元形状，色，光沢計測の研究に従事。電子情報通信学会会員。

内 村 圭 一 (正員)

昭和 50 年 3 月熊本大学工学部電子工学科卒業。昭和 52 年 3 月同大学院工学研究科修士課程修了。工学博士。同年熊本電波高専助手，講師を経て，昭和 55 年熊本大学工学部電子工学科助手。昭和 62 年同大学工学部電気情報工学科助教授。環境電磁工学，画像認識に関する研究に従事。電子情報通信学会，情報処理学会会員。