

# 物体の三次元計測に関する研究

## Study of three-dimensional measurement of objects

山田 諄\* , 山王 祐登\*\*  
Jun YAMADA , Masato SANŌ

**Abstract** In three-dimensional measurement, equipments with CCD camera have generally been used. But it takes considerable time to measure a three-dimensional object. Then we made up the three-dimensional measurement device based on laser trigonometry. This device is composed of a laser diode, a polygonal mirror, a two-dimensional PSD and lenses. The measurement error is below  $\pm 200 \mu\text{m}$ .

### 1. はじめに

近年、製品の歩留まり向上の為、製造過程に於いて長さや幅などの計測が行われてきた。最近では、さらに製品の形状計測が重要になってきており、CCDカメラを使ったものなどがある。しかし、複雑な画像処理を伴うため測定時間が長時間になり、測定装置自体が高価になる等の欠点がある。

我々は三角測量法を用いて、これらの欠点を解消したインプロセス計測が可能なシステムを製作し、その性能を評価した。三角測量法については古くから知られており、カメラのオートフォーカスなどに利用されている。これは距離計測に於ける最も基本的な原理で極めて安定な距離検出が可能であり、最近の光デバイスの発達により半導体レーザと様々な受光素子を用いた測定装置が実現されている。今回は、受光素子として二次元の半導体位置検出素子(PSD)を使用し、三角測量法の原理で三次元計測を行った。これにより、複雑な後処理の全く必要ない測定速度の速い計測システムができた。

### 2. 三角測量法の原理

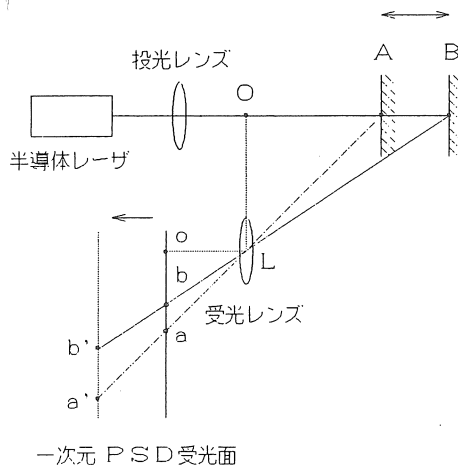


図1 一次元計測原理図 I

まず、三角測量法を利用した一次元計測の原理図を図1に示す。投光側は半導体レーザと投光レンズ、受光側は投光レンズの光軸に平行な光軸を持つ受光レンズと、このレンズに平行に置かれた一次元PSDで構成されている。レーザ光を投光レンズで絞って測定物に照射すると、物体表面上の一点に当たって散乱し、その一部の光が受光レンズを通り二次元PSD受光面上の一点に集光する。図1では、物体の測定点AがPSD受光面上の点aに結像する。こ

\*愛知工業大学 電子工学科 \*\*同大学院生

ここで、受光レンズの中心Lから投光レンズの光軸に垂線を下ろした点を点Oとすると、受光レンズの中心から点Oまでの長さOLと受光レンズからPSDまでの長さoLは装置の設計時に分かっているので、PSD受光面上の光スポットの移動量oaを検出すれば△OALと△oalとの相似関係

$$\frac{OA}{oa} = \frac{OL}{oL} \dots\dots (1)$$

により点Oから測定点Aまでの絶対距離OAが求まる。次に、測定点が点Bに移動するとPSD上の光スポットも点bに移動し、同様に三角形の相似の関係を用いるとOBの距離が得られる。このOBからOAを引き算すれば物体の移動量ABを求めることができる。このように、三角測量法では物体までの距離や変位を簡単な計算で求めることが可能である。

さらに、立体角を大きくするために受光レンズを図2のように傾けた。これは、立体角が大きいと受光できる散乱光量が多くなり測定結果に誤差を生じにくくなるためである。このレンズの位置と傾きは次のように決める。まず、光軸上の一点Oが受光レンズによってPSD受光面上の点oに結像するように、式(2)のレンズの公式を満たす位置に受光レンズとPSDの中心位置を決める。

$$\frac{1}{OL} + \frac{1}{oL} = \frac{1}{f} \dots\dots (2)$$

この式で、fは受光レンズの焦点距離、OL、oLはそれぞれ半導体レーザー光軸、及び、PSD受光面と受光レンズの光軸との交点O、oから受光レンズの中心Lまでの長さである。次に、PSD受光面をレーザー光の光軸と受光レンズ面との交点Tと点oを通る直線oTに沿うように傾ける。受光側をこのように配置することによりシャインブルグの条件が満たされ、レーザー光の光軸(直線OT)上の全ての点が受光レンズによりPSD面(直線oT)上で結像される。ここでレーザー光軸上での物体変位Dは、PSD受光面上の光スポット変位dに対応し、式(3)で表される。

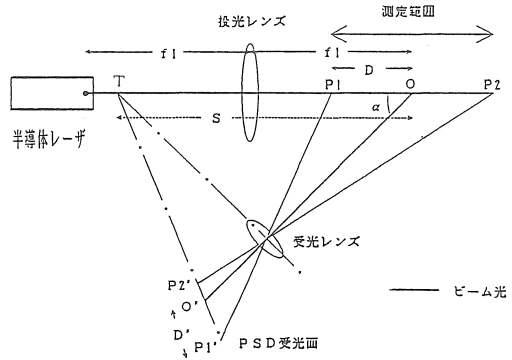


図2 一次元計測原理図II

$$d = \frac{\{f^2 \cdot \cos^2 \alpha + (S \cdot \cos \alpha - f)^2 \cdot \sin^2 \alpha\}^{1/2}}{(S \cdot \cos \alpha - f) - D \cdot \cos \alpha} \cdot \frac{f \cdot D}{S \cdot \cos \alpha - f} \dots\dots (3)$$

αは半導体レーザーの光軸と受光レンズの光軸とが成す角∠TOo、Sは直線OTの長さ、Dは測定物の移動量、dはDに対するPSD面上での光スポット移動量である。このようにシャインブルグの条件を満足すると、測定物から見た立体角が大きくなり散乱光を有効に受光できる上、レーザー光軸上の全測定点が受光面上に結像されるので精度の良い測定ができる。

最後に、三角測量法を用いた三次元計測の原理について述べる。まず、先ほど述べた一次元計測を応用して二次元計測を行う。レーザー光を走査させることと、二軸方向を測定することができる二次元PSDを用いることの他は、一次元の場合と同じ測定原理である。図3に原理図を示す。レーザー光をポリゴンミラーと投光レンズを使って上から下へ走査させていくと、それに伴い測定物に上から下へレーザー光が照射され、表面で次々に散乱する。それらの散乱光は受光レンズにより二次元PSD上に時間を異にして次々に集光されていく。各々の入射光について変位をそれぞれ求めることにより測定物表面の二次元形状が得られる。そして、測定物を図中の矢印方向に一定間隔移動させ、同様の測定を繰り返す行うことによって得られた物体形状を一つにまとめると物体の三次元形状を表すことができる。

ここで、これからの説明のため、図3に示すように各軸方向を次のように定める。レーザー光の光軸方向をZ軸方向、レーザー光の走査方向をX軸方向、両

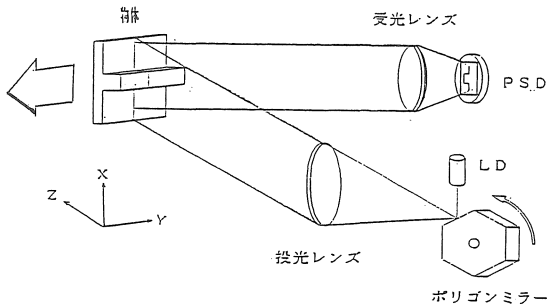


図3 三次元計測原理図

軸に対して直角な方向をY軸方向とする。

### 3. 二次元半導体位置検出素子

(P S D : Position Sensitive Device)

P S Dはシリコンフォトダイオードを利用した光スポットの位置検出用センサであり、一次元位置検出用と二次元位置検出用の二種類ある。二次元P S Dは、一次元P S Dに固定されている一対の電極に対して、もう一対の電極を垂直に取り付けて二軸方向の位置検出を可能にしたものである。今回使用した二次元P S Dは改良表面分割型で、表面分割型の受光面と電極に改良を加えたP S Dである。これは低暗電流、高速応答、バイアス印加が容易であるなどの特徴に加え、周辺部での歪が大幅に改善されており、位置検出誤差が両面分割型と同様に小さい。

### 4. 三次元計測システム

三角測量法の原理に基づいて三次元測定装置及び計測システムの製作を行った。測定システムのブロック図を図4に示す。計測システムは測定装置、直流安定化電源、移動ステージ、デジタルオシロスコープ、パーソナルコンピュータ、プロッターで構成されている。移動ステージ、デジタルオシロスコープ、パーソナルコンピュータ、及び、プロッターはそれぞれG P - I Bでパーソナルコンピュータで制御されている。尚、L D光を連続動作させているため外乱光の影響を受けやすいので、測定は暗箱の中で行った。

製作した測定装置を図5に示す。測定装置は投光器、投光レンズ、受光レンズ、受光器から成り、装置の大きさは240mm×200mm、高さ150mmであり、従来からある三次元計測装置に比べて

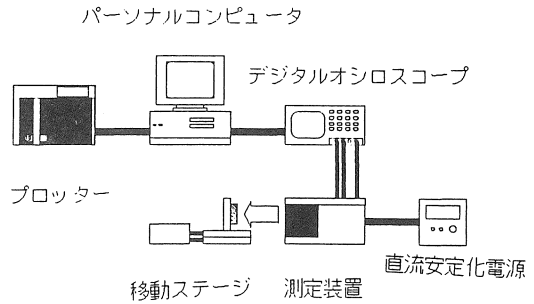


図4 計測システムのブロック図

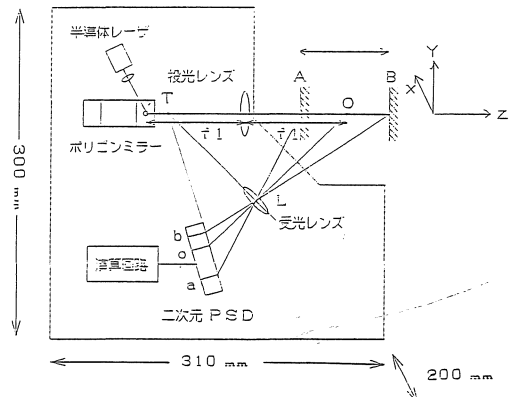


図5 測定装置

小型である。投光器は半導体レーザ、単レンズ、ポリゴンミラーで構成されている。今回使用した半導体レーザは出力3mW、発振波長781nmの低ノイズレーザで、一般にC Dなどに使用されているものである。ポリゴンミラーとは多面体の回転ミラーであり、振動鏡と並んでレーザ光を高速で走査する用途に用いられている。今回はミラー面が六面で、回転速度が1000rpmのポリゴンミラーを用いた。また、受光器は有効受光面積12mm×12mm、位置検出誤差±250μmの改良表面分割型二次元P S Dと演算回路で構成されている。

この測定装置の動作原理を説明する。半導体レーザ(L D)から発せられる光は広がりを持っているので、焦点距離5mm、直径5mmの微小単レンズを使って3mm×1mmの小さいビーム径を持つ平行光にする。このL Dと単レンズはアルミ製の円筒に組み付けられ、ポリゴンミラーの上部に取り付けてある。平行にしたL D光を回転しているポリゴンミラーに上方から照射すると、ミラーによりX軸方向に120°の角度で扇形にミラー前方へ走査される。その後、それらの光は焦点距離81.5mm、

直径50mmの投光用単レンズを通る。LD光のポリゴンミラー上での反射点が投光レンズの焦点位置に置いてあるので、Z軸に平行でX軸上50mmの範囲を走査する光に変換される。

試料の物体はY軸方向、Z軸方向に移動可能なステージに垂直に取り付けられた試料台の上に取り付けてある。試料表面で散乱した光の内、焦点距離30mm、直径30mmの受光用単レンズを通った光はPSD受光面上に集光される。PSDに光が入射するとその光に応じた電流が出力される。この出力電流を演算回路に通すことにより、入射光スポット位置に比例した電圧に変換される。さらに、後段に接続されているデジタルオシロスコープで波形の平均処理を4回行って二次元波形を得る。この二次元波形の測定を移動ステージをY軸方向に一定間隔ずつ動かしながらい、得られた複数の波形にコンピュータで陰線処理を施すことにより測定物表面の三次元形状が描かれる。

## 5. 演算回路

PSD上の光スポットの位置に比例した出力を得るためには簡単な演算を行う必要がある。この演算は簡単なアナログ回路で実現できる。二次元PSDの後段に接続されているこの演算回路図を図6に示す。三段のオペアンプと割算回路で構成された簡単な回路である。この回路の動作を説明すると、まず、PSDの受光面に入射した光スポット位置に応じてPSDの四ヶ所の電極から電流が出力される。これらの電流をプリアンプOP1~OP4で電圧にそれぞれ変換し、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $Y_1$ 、 $Y_2$ の出力を得る。次に、PSD上の隣合った電極出力どうしである $X_2$ と $Y_1$ をOP5で、 $X_1$ と $Y_2$ をOP6それぞれ足し

合わせる。この二つの出力 $X_1+Y_2$ 、 $X_2+Y_1$ をOP7で加算した結果 $(X_1+Y_2) + (X_2+Y_1)$ を分母、OP8で除算した結果 $(X_1+Y_2) - (X_2+Y_1)$ を分子として割算回路ICに入力する。そうすると、式(4)に示すように受光面上の光スポットの位置を検出することができる。

$$\frac{(X_1+Y_2) - (X_2+Y_1)}{(X_1+Y_2) + (X_2+Y_1)} = \frac{Z}{L} \quad \dots (4)$$

ここで、LはPSDの一辺の1/2の長さ、ZはPSDの中心位置から入射光の中心位置までのZ方向距離である。この回路では最終段において全受光量で割算を行っているので、PSDへ入射する光の量と無関係に位置検出ができる。しかし、入射光量が多ければPSDからの出力電流も増してオペアンプや割算回路における演算誤差が少なくなり精度が向上する。

## 6. 測定結果

### 6.1 校正曲線の測定

測定装置の出力電圧から物体の移動距離を知るために校正曲線を求める実験を行った。移動ステージに垂直に取り付けられた試料台に試料の白い紙をたるまないように貼り付けた。この状態で一回の測定を行うと、図7のような波形がデジタルオシロスコープに得られる。この波形は測定物を輪切りにした形を表している。波形の両肩がなだらかになっている部分は、集光された光スポットの一部分がPSD受光面からはみ出してしまい、演算回路で演算誤差を生じた箇所である。この図7と同様の出力波形を、Z軸に沿ってステージを一定間隔ずつ投光レンズか

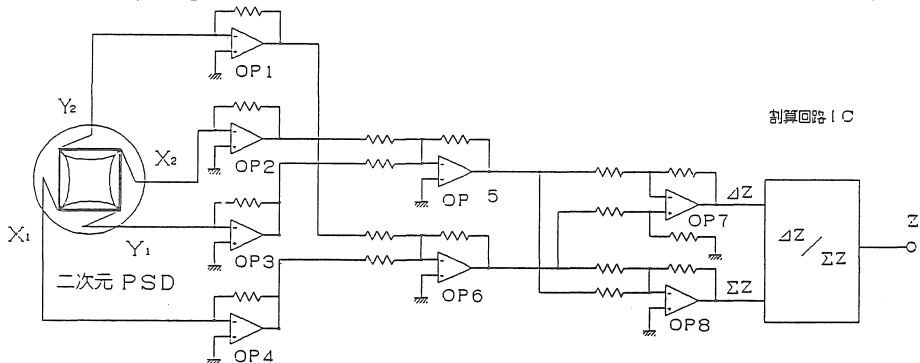


図6 演算回路

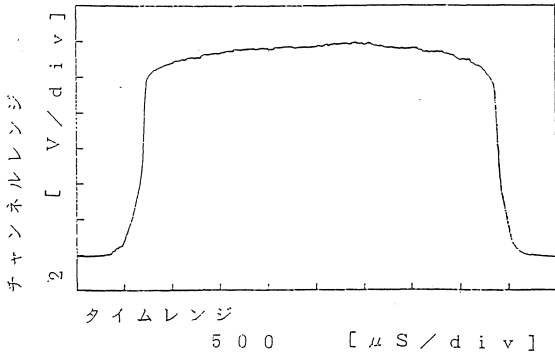


図7 出力波形

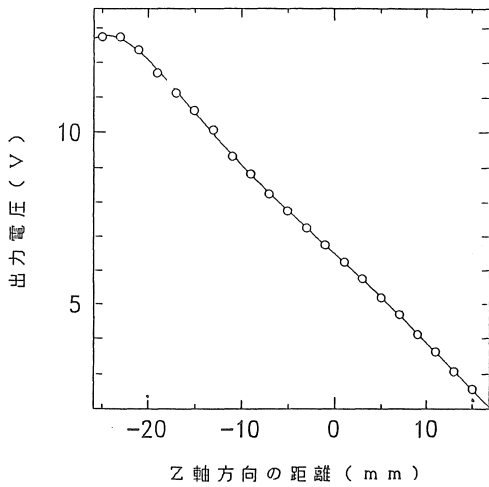


図8 校正曲線

ら遠ざかる方向に移動させながら測定していき、その出力変化を調べる。ステージの移動は備え付けのマイクロメーターにより手動で動かした。

このようにして得られた校正曲線を図8に示す。ここで、LD光軸と受光レンズ光軸の交点Oを測定位置の基準点と定め、点Oよりも投光レンズ側は“-”符号を付けて表してある。このグラフを見ると、点Oから前方-20mm、後方15mmの間でZ軸変位に対する出力が、一定の傾きを持った直線になった。これより、試料の測定可能な範囲は35mmであることが分かる。この直線性の良い範囲内で測定を行えば、出力電圧の通倍が実際のZ軸上変位を表しているので一切の後処理が必要ないので、直接、距離の測定ができる。また、この範囲内の校正曲線のばらつきは距離に直すと200μmの誤差であった。その中でも-20mmから0mmの間はばらつき誤差が100μmに収まった。この装置では

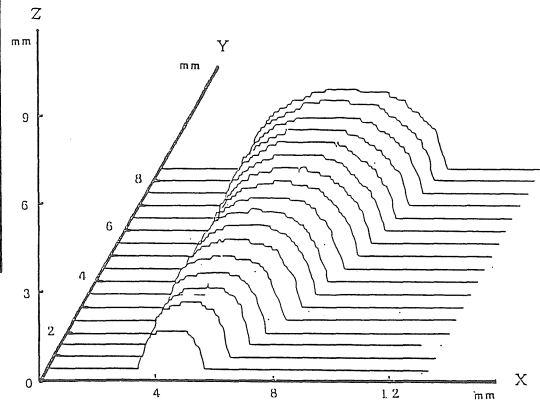


図9 半円錐形に加工した白色ゴム

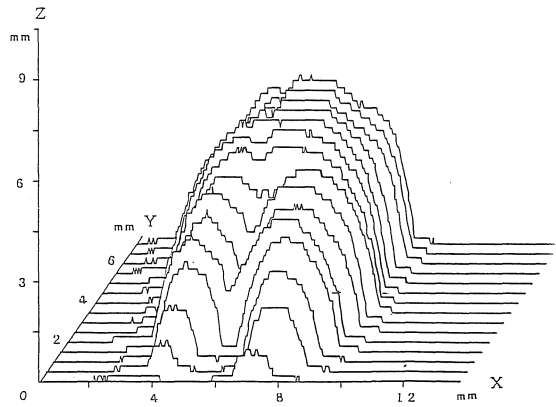


図10 先端を二股に加工した半円錐形白色ゴム

受光レンズが単レンズなので、Z軸方向の測定範囲が35mmであればX軸方向の測定範囲も同じく35mm程度となる。

### 6.2 物体表面の三次元計測

この装置によって実際に物体の表面形状を測定し三次元表示を行った。Y軸に沿ってステージを一定間隔移動させながら測定して得られた図7の様な二次元波形をパーソナルコンピュータで陰線処理をしてプロッターにより物体表面の三次元形状を描く。

プロッターで物体表面の三次元像を描いた例を図9に示す。白色ゴムを半円錐状に加工したものを試料に用いた。図より円錐状になっている物体が見取れる。波形に小さな凹凸が表れているが、これは、試料の加工を手作業で行ったために生じた試料表面の凸凹であると思われる。

もう一例を図10に示す。今度は半円錐状に加工

した白色ゴムを、さらにその先をM字型に深く削って二股にしたものを使用した。この物体の形状はY軸方向についてほぼ左右対称であるが、出力された物体形状は対称になっていない。これは、受光レンズから見て影になる部分が測定できないために生じる誤差である。

### 6. 3 誤差の測定

先ほど得られた校正曲線を使って求めた測定値と、接触式マイクロメータで測った物体の大きさ(実寸値)とを比較し、精度を求めた。測定物には白い板を使用した。この板の厚みはあらかじめノギスで測っておき、ステージに取り付けられた白い試料台に板を固定する。Z軸方向に一定間隔づつステージを移動させて、各点での物体の大きさを測定する。

実寸値2.95mmと4.70mmの板を測った結果を図11に示す。測定範囲内の誤差は $\pm 250 \mu\text{m}$ に収まっている。 $+100 \mu\text{m}$ の補正を加えると、ほぼ $\pm 150 \mu\text{m}$ 以内の精度となる。

### 7. まとめ

今回、工場内におけるインプロセスの物体形状計測を目指し、三角測量法の原理を用いて測定装置を製作した。安定した距離検出が可能なこの三角測量法を利用した三次元計測は、すでに受光器にCCDカメラ等を使用したもの等があるが、これらの装置は高価であり、複雑な画像処理を必要とするなどの欠点がある。しかし、本システムでは出力波形が距離に比例しているため、面倒な計算処理を行う必要

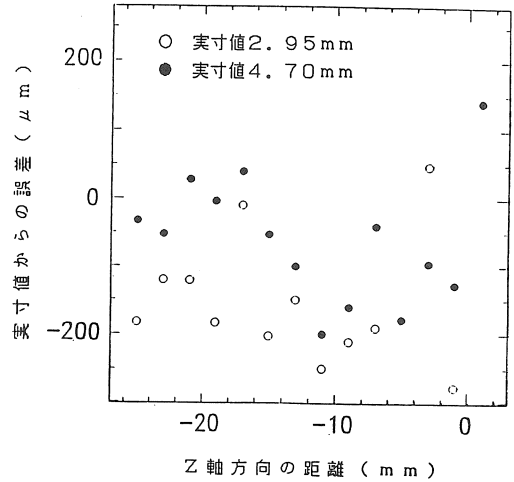


図11 誤差特性

がなく計測時間が短い。この測定速度はポリゴンミラーの回転速度のみに依存しているため、ミラーの回転速度を速くすると、高速の物体計測ができる。さらに、光学系が簡単で、装置自体が安価である。このような特徴を有する本システムは、工場内のベルトコンベアー上を流れてくる物体形状のオンライン計測に適している。今回は測定範囲が35mm程度と狭かったが、投光レンズにレンズ径の大きなものを用いれば、精度は多少悪くなるけれども測定範囲を広げることが可能である。

今後は、レーザ光に変調をかけて外乱光の影響をなくし、精度の向上を図りたい。

(受理 平成6年3月20日)