円すい状光点走査による空間姿勢検知*

内 山 寛 信^{*1}, 田 中 輝 夫^{*1}
倉 田 純 一^{*1}, 本 多 陽 介^{*2}Method of Detecting Spatial Posture by Using Conical
Optical Scanning SystemHironobu UCHIYAMA, Teruo TANAKA,
Junichi KURATA and Yosuke HONDA

An optical sensor system composed of a single photodetector and a laser scanning system with an algorithm to calculate the posture are proposed. The principle of this sensor is to observe the distortion of the circular trajectory of laser on the measured plane, and it is possible to obtain the information on the spatial posture based on the fundamental coordinate of the sensor. This information is calculated by using a new integrating method of the trajectory signals, and it matches well with the manipulating signal of a robot with the function of a path control. Basic experiments to verify this sensor were conducted and the validity of this sensor and algorithm was confirmed.

Key Words: Measurement, Optical Engineering, 3-D Shape Measurement, Posture Control

1. は じ め に

近年, 多くの生産加工システムは, 組立, 調整作業, などをロボットにより自動化する無人加工が進められている。この作業用ロボットに自律的な作業の遂行機能を実現⁽¹⁾するため, 非接触で高速, かつ, 高精度に姿勢情報を抽出し, 空間的位置・姿勢制御を可能とする視覚センサの開発が重要視⁽²⁾⁽³⁾されている。

作業対象面と作業機械自身との相対的な位置, 姿勢を計測するため, 三次元空間情報を二次元画像情報より抽出する手法については, 多くの研究, 提案⁽⁴⁾がなされている。画像情報は, 測定対象物面上の光学的特徴点を利用する受動的な手法⁽⁵⁾, あるいは, 特定の光学的パターンを測定対象物面に照射し, その反射光を検出する能動的な手法により取得される。能動的な点, 線状パターン照射法は, 光点像を検出して 3 角測量法により多数点の距離情報を算出後, これらの情報を総合化して空間的な位置, 形状を高精度に計測できる特徴⁽⁶⁾をもつ。この手法に比べて, 円すい状光を用いて, 測定対象物面上に環状のパターンを照射する手法は,

着目する測定部の局所的な位置, 姿勢情報を短時間に精度良く取得できるため, 走査性と姿勢検出の高速化などの点で, ロボット系センサに有効な手法⁽⁷⁾である。

円すい状光照射法を用いたロボット用センサには, パルス状の逐次点光走査により, 投光点像の軌跡径変化と回転方向により焦点からの遠近識別をするセンサの研究⁽⁸⁾, 環状光投射法によるパターンのスポット状態変化による距離測定, 面素の外周部を走査し, その検出光量変化を用いた傾斜状態検出⁽⁹⁾, ならびに, 環状光走査による三次元物体の特徴抽出の研究⁽¹⁰⁾がなされている。

本研究においては, 着目する測定部の局所的な情報より, センサ系のもつ基準座標軸に対する測定対象物面の位置と空間姿勢の情報を, 独立した多数点距離情報の取得走査を行うことなく検知する手法について提案する。

空間姿勢は, 円すい状の連続した光線走査により, 測定対象物面上に照射された低円側の円状光点軌跡の変形量より検知する。円状光点軌跡の変形量は, 両軸の位置信号が独立して出力される二次元光点位置検出素子の出力信号の積分値から求める。この際, 積分は光点軌跡の全周について行われる。そして, 両軸信号

* 平成元年 3 月 24 日 関西支部第 64 期定時総会講演会において講演, 原稿受付 平成元年 9 月 11 日。

^{*1} 正員, 関西大学工学部 (〒564 吹田市山手町 3-3-35)。

^{*2} 関西大学大学院 (現在, マツダ(株)勤務)。

の積分値より、着目する測定対象面部の空間姿勢を、センサ系の基準座標軸からの並進移動量と他の2軸回りの回転角として算出する。これらの光点走査法と信号処理法により、演算処理時間の短縮化、空間的な位置・姿勢情報の精度の向上、光学的・電気的雑音による測定誤差の低減化などを計っている。

以下においては、円すい状光点走査機構をもつ位置・姿勢検知用の単眼式近接センサについて、測定原理と信号処理法、および、試作装置を用いた有効性の検証結果を報告する。

2. 空間姿勢センサの構成

2.1 センサ系の構成要素 円すい状光点走査による位置・姿勢検知用の単眼式近接センサの構成説明図を図1に示す。センサ系の主たる構成要素は、半導体レーザ光源：a、測定対象物面上に照射する光点像の走査機構要素である電磁式走査ミラー：b、および、光点像の撮像要素としての半導体位置検出素子(PSD)カメラ：cである。検証実験用の試作装置では、波長が830 nm、出力が30 mWの光源と、最大位置検出誤差が $\pm 250 \mu\text{m}$ であるPSD素子を用いている。また、増幅器を含む電磁式走査ミラーの特性は、感度一様な最大周波数が10 Hzである。

レーザ光は、直交する2軸の電磁式走査ミラーにより円すい状に走査され、ハーフミラー：dを介し、測定対象物面：e上に連続した円状の光点像軌跡を描く。測定対象物面上の光点像は、ハーフミラー、レンズ系を介し半導体位置検出素子で検出され、直交する2軸の位置信号に変換、出力される。

2.2 基準座標系と光点像軌跡 センサ系の基準座標軸は、レンズ中心位置 O_0 を原点とする図2に示す X_0 - Y_0 - Z_0 直角座標系であり、センサ系のレンズ光軸は Y_0 軸と一致する。測定対象物面は、 X_0 , Y_0 軸回りにそれぞれ角度 α , β 回転し、原点より距離 L 並進移

動した X_3 - Y_3 - Z_3 座標系の X_3 - Z_3 軸面で構成される P_1 面である。ここで、空間姿勢情報として測定すべき物理量は、原点であるレンズ中心位置と測定対象物面間のレンズ光軸上の距離 L 、ならびに、センサ系の基準座標軸に対する測定対象物面の回転角 α , β である。

P_1 面上の $p_1(x_3, 0, z_3)$ 点は、次式により基準座標系の位置 $p_1(x_0, y_0, z_0)$ に変換⁽¹⁾される。

$$[x_0, y_0, z_0, 1]^T = T[x_3, 0, z_3, 1]^T \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、変換行列は次式で与えられる。

$$T = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \beta & L \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

電磁式走査ミラー機構：bとハーフミラー：dを介して照射される光点の回転中心位置を、基準座標系の Y_0 軸上の位置に変換すれば、光は座標原点 O_0 から l_1 離れた $O_1(0, l_1, 0)$ 点から出射する。そして、光点は Y_0 軸回りに開き角が ϕ である円すい形状に等角速度 ω で走査される。 Y_0 軸を法線とし、原点 O_0 から l_1 の位

図1 円すい走査機構をもつ姿勢検出装置
(a：半導体レーザ、b：電磁式走査ミラー、
c：カメラ、d：ハーフミラー、e：測定対象物面)

図2 検出機構の座標系

置にある P_2 平面上の走査光点像 $p_2(x, y, z)$ の基準座標系での位置 $p_2(x_0', y_0', z_0')$ は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} x_0' &= (l_1 - l_2) \tan \phi \cos \theta \\ y_0' &= l_1 \\ z_0' &= (l_1 - l_2) \tan \phi \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

P_2 面を Y_0 軸方向に並進移動すれば、光点像の位置は測定対象物面である P_1 面上の p_1 点に一致し、その位置座標は $(x_0, y_0, z_0) = (x_0', y_0', z_0')$ なる条件を満たす。そして、この光点像は、原点 O_0 から l 後方にある PSD 撮像素子面上の点 $p(x, y, z)$ に結像する。これらの関係を式(1)～(3)を用いて整理すれば、撮像素子の出力信号は、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} x(\theta) &= r(\theta) \cos \theta \\ z(\theta) &= r(\theta) \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、撮像素子面上の結像軌跡の動半径は、式(5)で与えられ、特に、測定対象物面が Y_0 軸を法線とする場合には、式(6)となる。

$$\begin{aligned} r(\theta) &= -l(L - l_1) \tan \phi \cos \alpha \cos \beta / \\ &\{L \cos \alpha \cos \beta - l_1 \tan \phi (\cos \alpha \sin \beta \cos \theta \\ &\quad - \sin \alpha \sin \theta)\} \dots\dots\dots (5) \\ r_0 &= [r(\theta)]_{\alpha=0, \beta=0} \\ &= -\frac{l(L - l_1)}{L} \tan \phi \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

走査光点像の撮像素子面上での結像軌跡と、撮像素子の出力信号 $x(\theta), z(\theta)$ の一例を図3、4に示す。

図2の光学系において、光源位置が $l_1 < 0$ で、測定対象物面が Y_0 軸を法線とする場合には、測定面の Y_0 軸方向距離の減少に伴い、センサ光軸点を原点とした結像軌跡半径 r_0 は滑らかに増大する。そして、余弦・正弦波形となる撮像素子出力信号 $x(\theta), z(\theta)$ の振幅が増大する。 $l_1 > 0$ の場合には、前挙動とは逆に、結像軌跡半径と撮像素子信号振幅は減少する。 $l_1 = 0$ の場合には、両者は一定値を保持し、測定系として無効となる。試作装置の光学系パラメータは、光源位置 $l_1 = -72.8 \text{ mm}$ 、撮像素子位置 $l = 58.9 \text{ mm}$ 、開き角 $\phi = 3.03^\circ$ である。

測定対象物面が傾斜している場合には、軌跡半径は動半径 $r(\theta)$ となり、撮像素子出力信号 $x(\theta), z(\theta)$ はひずみをもつ余弦・正弦波状信号となる。信号 $x(\theta), z(\theta)$ が極値をもつ走査回転角 θ_x, θ_z は、測定対象物面の回転角 α, β に依存して変化し、式(4)、(5)より次式で示される。

$$\theta_x = \sin^{-1} \left(-\frac{l_1}{L \cos \beta} \tan \phi \tan \alpha \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$\theta_z = \cos^{-1} \left(\frac{l_1}{L} \tan \phi \tan \beta \right) \dots\dots\dots (8)$$

3. 位置・姿勢情報の演算原理

3.1 距離 L の測定手法 測定対象点の位置は、原点からのセンサ光軸上の距離 L として測定される。距離 L を測定するため、撮像素子の出力信号 $x(\theta), z(\theta)$ を用い、測定対象物面の傾斜角 α, β と動半径 $r(\theta)$ の関係を定量的に解析する。光点走査1サイクル当たりの動半径の変化量の平均値を、面法線が Y_0 軸である測定面信号で無次元化した次式で定義する。

$$A_x = \frac{S_x - S}{S}, A_z = \frac{S_z - S}{S} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、各項は次式で示される。

$$S_x = \int_0^{2\pi} |r(\theta) \cos \theta| d\theta = \int_0^{2\pi} |x(\theta)| d\theta$$

$$S_z = \int_0^{2\pi} |r(\theta) \sin \theta| d\theta = \int_0^{2\pi} |z(\theta)| d\theta$$

$$S = r_0 \int_0^{2\pi} |\sin \theta \text{ or } \cos \theta| d\theta, (\theta = \omega t)$$

式(9)内の超越関数の積分を数値計算により求め、図5に示す。この特性図、および、計算結果より、測定距離 L を一定とした場合には、測定対象物面の傾斜

図3 走査光点像の結像軌跡

図4 撮像素子の出力信号

角 α, β による動半径 $r(\theta)$ の変動量は小さく、1 サイクル走査間の信号波形の積分値は、変動が極めて小さいことが判明した。これより、 $S \approx S_x, S \approx S_z$ とみなすことが可能であり、光点走査 1 サイクル間の動半径 $r(\theta)$ の平均値は、 r_0 で精度良く近似できる。

Y_0 軸上を測定対象物面が遠点に並進移動した場合、円すい状走査の効果により、撮像素子面上の結像点軌跡の半径は距離 L にほぼ反比例して減少する。また、 S_x, S_z は S に比例する。これらの関係より、距離 L_m は次式により算出できる。

$$L_m = \frac{4l_1 \cdot \tan \phi}{4l \tan \phi - S_x} \text{ or } \frac{4l_1 \cdot \tan \phi}{4l \tan \phi - S_z} \quad \dots\dots (10)$$

$$\approx L$$

式(10)による距離演算の測定誤差を $(L_m - L)/L$ で評価したものが図 6 である。これより、良好な測定精度が得られることがわかる。

光点走査 1 サイクル間の撮像素子出力信号波形を積分した面積量より距離 L を算出する手法は、測定対象物の微細な面構造による反射光路の変動、ならびに、光強度の変動、外部環境光の強度変動、などの光学的雑音、電気的雑音による誤差の低減化を計るために極めて有効である。また、3 角測量法により多数点の距離測定をした後、それらの情報を総合化、平均値化して距離を求める手法に比べ、演算の高速化と回路系の簡略化が望める。

3.2 測定対象物面の傾斜角の測定手法 3.1 節

で求めた距離情報 L_m を用いれば、式(7)、(8)の関係より、測定対象物面の傾斜角である X_0, Y_0 軸回りの回転角 α, β が算出できる。しかし、 $x(\theta), z(\theta)$ 信号の極値を微分操作により求め、 θ_x, θ_z を算出する手法は、信号中の雑音により大きな誤差が発生すると推測される。式(4)～(8)ならびに図 4 から、 $x(\theta), z(\theta)$

信号が極値をとる走査回転角は、 $r_0 \cos \theta, r_0 \sin \theta$ 波形の極値近傍にあり、 L, α, β による変化量が小さいことがわかる。そこで、 $x(\theta), z(\theta)$ 信号の複振幅、ならびに、光点走査 1 サイクル間の信号波形の面積量が、測定対象物面の傾斜角 α, β の変動の影響を受けず一定である信号波形のひずみ特性に着目し、波形のひずみ量を面積量に変換し θ_x, θ_z の移動量を算出する手法について検討をする。

θ_x, θ_z の変動に伴う信号波形のひずみ量を表示する面積量として、次式を定義する (図 4 参照)。

$$R_z = \frac{\Delta S_z}{S_z}, \Delta S_z = S_{z1} - S_{z2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$R_x = \frac{\Delta S_x}{S_x}, \Delta S_x = S_{x1} - S_{x2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、

$$S_{z1} = \int_0^{\pi/2} |z(\theta)| d\theta + \int_{3\pi/2}^{2\pi} |z(\theta)| d\theta$$

$$S_{z2} = \int_{\pi/2}^{3\pi/2} |z(\theta)| d\theta$$

$$S_{x1} = \int_0^{\pi} |x(\theta)| d\theta, S_{x2} = \int_{\pi}^{2\pi} |x(\theta)| d\theta$$

式(11)に示す信号波形の面積量の比 R_z は、式(8)で与えられる極値の移動量 $\theta_z = f_{z0}(1/L, \tan \beta)$ に依存して変化すると考えられる。そこで、 R_z と $\tan \beta$ の関係を L, α をパラメータとして数値計算し図 7 に示す。計算結果より、 $|\alpha, \beta| < \pi/4$ ラジアン の条件下では、 α に対する R_z の変動は極めて小さく無視することが可能である。 R_z の変動量を、 $\alpha=0$ の場合を代表値にして他者と比較すると、 $\beta \neq 0$ では、最大変動量は 0.05 % 以下である。また、 L の増加に伴い、直線こう配は減少する。これより、 $R_z = f_z(1/L, \tan \beta)$ なる α に依存しない関数関係を仮定できる。この仮定に基づき、 $\theta_z = \cos^{-1} R_z$ より、新たな縦軸 $\cos \theta_z$ と $\tan \beta$ との特性図を得る。図 7 より、次式に示す関係式が求められる。

$$2R_z = \cos \theta_z$$

図 5 位置信号の面積量の変化状態

図 6 距離測定アルゴリズムの誤差解析

$$= \frac{C \tan \beta}{L} \dots\dots\dots (13)$$

ただし,

$$C = l_1 \tan \phi$$

距離情報 L は L_m に置換でき, β は式(13)より求まる.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{2R_x \cdot L_m}{C} \right) \dots\dots\dots (14)$$

式(12)についても同様な条件下で数値計算と処理をすると, 面積量の比 R_x は式(7)右辺の括弧内と同様な関数関係 $R_x = f_x(1/L, 1/\cos \beta, \tan \alpha)$ を満足する. 数値計算結果を図8に示す. β, L によって変化する特性線図のこう配は一定であり, 次式の関係で表示できる.

$$\begin{aligned} 2R_x &= \sin \theta_x \\ &= -\frac{C \tan \alpha}{L \cos \beta} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

$$\therefore \alpha = \tan^{-1} \left(-\frac{2R_x \cdot L \cos \beta}{C} \right)$$

式(13), (15)より, $R_x \neq 0$ ($\beta \neq 0$) の場合には, 次式が成立する.

$$R_{xz} = \frac{R_x}{R_z} = -\frac{\tan \alpha}{\sin \beta} \dots\dots\dots (16)$$

これより, α は次式で示される.

$$\alpha = \tan^{-1} (-R_{xz} \cdot \sin \beta) \dots\dots\dots (17)$$

なお, 数値解析結果によれば, $R_x/R_z \approx \Delta S_x/\Delta S_z$ と近似しても十分な精度が得られる.

以上のことより, 測定対象物面の傾斜角と撮像素子信号波形の面積量との関係を定式化でき, 距離 L の算出手法と同様に簡単なアルゴリズムで測定対象物面の傾斜角の算出が可能となる.

4. 信号処理回路系の構成

提案したように, センサ系の姿勢情報である距離, 基準座標軸回りの回転角である L_m, α, β は, 光学的, 電氣的雑音による測定誤差の低減化が可能な積分演算処理法により算出される. しかし, 信号量が小さいため, 安定性, 分解能の良好な積分器を使用することが望ましい.

検証実験用に試作した装置の信号処理回路系と, 姿勢情報の演算処理過程のブロック図を図9に示す.

半導体位置検出素子の位置信号 $x(\theta), z(\theta)$ は, 絶対値回路を介し高精度・高パルス密度の電圧・周波数変換器 (0.5 Mpulse/V) でパルス列信号に変換される. そのパルス列信号はカウンタで加算積分され, 信号波形の面積量に変換される. そのとき, 積分範囲は光点走査信号に同期して制御される.

面積量である積分値は, マイクロプロセッサにより処理され, 数値化された姿勢情報として出力される. 最初に, $x(\theta)$ あるいは $z(\theta)$ 信号の面積量 $S(\approx S_x, \approx S_z)$ より距離 L_m を算出し, ついで, R_x と L_m より β を求め, その後, R_{xz}, β より α を算出する. この際, $\Delta S_z = 0$ である $\beta = 0$ の場合には, R_x より α を算出する.

5. 試作装置による測定結果

図1ならびに図9に示す試作した測定系を用い, 測定原理を実験的に検証した結果を以下に示す.

図10が距離測定の結果であり, 基準座標軸に対する測定対象物面の回転角が $\pi/6$ ラジアン以内においては, 良好に測定できることが判明した. 測定精度は, 試作装置の測定距離範囲内においては, ± 1 mm 程度である.

測定対象物面の回転角 β を, 式(14)を用いて算出した実測値を先の図7にプロットして示す. ただし, 実測値は $|\alpha| < \pi/6$ ラジアンの場合である. 同様に, 回転

図7 極値をとる走査回転角と面積量の関係

図8 面積量と α との関係図

角 α の算出結果は、図 8 に $\beta=0$ の代表例についてプロットして示す。

図 7, 8 より、面積量とその比から測定対象物面の傾斜角を算出する式(11)～(17)の関係式の妥当性が確認される。

総合的な測定対象物面の基準座標軸に対する回転角 α, β の測定結果は、それぞれの回転角が $\pi/6$ ラジアン以内の場合について、図 11(a), (b) に示す。両側定結果より、回転角による姿勢測定の精度は、ほぼ $\pm 1^\circ$ である。

測定アルゴリズムなどの検証用試作装置の場合においては、距離、回転角の測定誤差は、光学装置系に多数存在する位置調整用可動部の設定の困難さによるものであり、小形、一本化し剛性を高め固定化すれば、さらに良好な測定精度を得られると考える。

6. ま と め

円すい状の光点走査による測定対象物面上の結像点

軌跡の変形量より、空間的な位置・姿勢を検知する視覚センサ系とその演算アルゴリズムを提案し、試作測定装置を用い検証した。

その結果、円すい状に走査された測定対象物面上の円状光点像の軌跡は、

(1) 測定対象物面までの距離により、センサ光軸を原点とする平均動半径が変化する。しかし、半径変化に対する、測定対象物面の傾斜角の影響は微小である。

(2) 測定対象物面が傾斜することにより、軌跡の長軸と短軸位置が回転移動する。

この両者の性質を用い、二次元撮像素子の 2 軸位置信号波形の面積量ならびにその比から、測定対象物面の姿勢を、センサ系のもつ基準座標軸からの距離、ならびに、軸系に対する回転角として算出するアルゴリズムを数値解析的に導き、提案した。

数値解析および試作装置による検証実験の結果、以下のことが判明した。

図 9 信号処理回路系のブロック図

図 10 距離測定の結果

(a) 回転角 α の測定

(b) 回転角 β の測定

図 11 傾斜角の測定結果

(1) 簡単な情報処理を施すことにより, 距離, 回転傾斜角の姿勢情報が直接的に算出できる。

(2) 検証実験の結果, 距離および回転角の測定精度は, それぞれ $\pm 1 \text{ mm}$, $\pm 1^\circ$ であった。

光学系を軽量化して剛性を強化し, 一体化すればさらに測定精度の向上が望め, 小形な単眼視覚センサとして有効であると考ええる。

文 献

(1) 金出, 日本ロボット学会誌, 5-5(1987), 376.

(2) 石井・ほか2名, 計自論, 21-4(1985), 403.

(3) 出澤, 計測と制御, 26-2(1987), 103.

(4) 例えば, Hall, E. L., ほか1名, *IEEE, Comput.*, (1982), 42.

(5) 例えば, 安江・白井, 電総研究報, 37-12(1974), 1101.

(6) 例えば, Agin, G. J., ほか1名, *IEEE, Trans. Comput.*, 25 C-4(1976), 439.

(7) 木下・出澤, 計自論, 22-11, (1986), 1204.

(8) 花房・ほか2名, 第27回 JAACE 講論集, (1983), 117.

(9) 木下・出澤, 電学論, 107-5(1987), 436.

(10) 木下・出澤, 計自論, 25-1(1989), 112.

(11) Paul, R. P., *Robot Manipulators*, (1981), 13, M. I. T. Press.