非接触型傾き・距離検出センサによる三次元形状の 自律高速測定に関する研究（第1報）*

——マルチビーム投光型傾き・距離同時連続検出センサ用エレメントの設計——

青山英樹** 山崎和雄*** Kee Sein LEE† 沢辺雅二††

A Study on Autonomic High Speed Measurement of a Three Dimensional Shape by Using
a Non-contact Sensor for Detecting an Inclination Angle and a Gap Distance (1st Report)
—Design of an element for the Sensor with Multi-beam Projection—

Hideki AOYAMA, Kazuo YAMAZAKI, Kee Sein LEE and Masaji SAWABE

The study is on autonomic high speed measurement of a three dimensional shape by using a non-contact sensor which can continuously and simultaneously detect the normal direction and the position of a measured point. This paper describes the system architecture and a design of the sensor. In order to design the sensor, the principle for detecting a normal direction and a position by reflected light of a beam projected on a measured point is clarified. According to the principle, a structure of the sensor element which has an emitting optical fiber with a graded-index lens and eight receiving optical fibers is determined. Also, computer simulations are performed to make the performance of the sensor element clear. In the simulations, a model-equation which expresses ray-intensity of the projected beam is derived, and reflected light of the beam is modeled by a diffuse component and a specular component. From the simulation-results, it became clear that the sensor element can detect a normal direction in the range from -45.0° to 45.0° and detect a position in the range from 2.7 mm to 6.0 mm for a diffuse surface. For a specular surface, the range of a detected normal direction is restricted from -7.5° to 7.5° .

Key words: non-contact sensor, normal direction, position, optical fiber, high speed measurement, three dimensional shape, multi-beam projection

1. 緒 言

機能部品に対する製造工程は、設計（CAD）、評価（CAE）、加工（CAM）、検査（CAT）技術により確立されつつある。一方、車のボディに代表されるような意匠部品に対する製造工程では、リバースエンジニアリング¹⁾技術により物理モデルから計算機（ソフトウェア）モデルへの変換が行われており、同変換において、物理モデルの測定技術および測定データから計算機モデルの構築技術が必要とされている。この物理モデルの測定技術に対しては高速自動測定が要求されており、また、計算機モデルの構築技術においては、測定データと計算機モデル定義データが一致していないため、測定データから計算機モデルを形成することが容易ではないことが問題点として指摘されている。

物理モデルの高速測定に対して、これまで幾つかの非接触センサ²⁾³⁾が提案されているが、いずれも位置（距離）検出センサであり、位置データのみから滑らかに接続された曲面パッチにより自由曲面計算機モデルを直接構築することは容易ではない。一方、測定データから計算機モデルを直接構築するため、位置ベクトルと単位法線ベクトルに基づく方法⁴⁾が提案されているが、同方法を実現するセンサ⁵⁾⁶⁾は接触式であるため高速測定に対する要求を満足していない。

本研究は、図1に最終システム構成を示すように、計算機モデルを自動構築するための物理モデル自律高速測定システムを

開発することを目的としている。同目的を達成するため、物理モデルとの干渉を自律的に回避しながら計算機モデルを直接構築できるデータを検出するためのセンサ、すなわち傾き（法線）と距離（位置）を同時にかつ連続的に非接触検出するセンサが必要となる。

本報（第1報）では、光ファイバによる傾き・距離同時連続検出型非接触センサの開発を目的として、同センサのエレメントを提案し、検出原理を明らかにするとともにその設計を行い、計算機シミュレーションにより設計したセンサエレメントの評価を試みる。また第2報では、同センサエレメントを試作し、基礎実験により評価を行うこととしている。

- a: Gap distance & inclination angle
- b: Control data of CMM
- c: Three-dimensional coordinate values
- d: Gap distance, inclination angle & coordinates
- e: Three-dimensional shape data

Fig. 1 Proposed overall system architecture

* 原稿受付 平成5年2月2日

** 正 会 員 苫小牧工業高等専門学校（現、慶応義塾大学理工学部；横浜市港北区日吉3-14-1）

*** 正 会 員 カリフォルニア大学（Davis, California 95616, U. S. A.）

† カリフォルニア大学

†† 正 会 員 （株）ミットヨ（川崎市高津区坂戸1-20-1）

Fig. 2 Principle of detecting an inclination

2. 傾き・距離の検出原理

図2(a)は、傾きの検出原理図を示している。測定点S上にビームが投光されスポットが形成されているとき、その反射光強度分布は、測定点の面性状（拡散性、面粗さ）に依存する。本研究では、同反射光強度分布は、図2(a)に示されているように楕円形状であると仮定する。その楕円の1軸は、測定点Sの法線Nに対するビームの入射角 θ_i と反射角 θ_r が等しい方向N'に一致している。

一方、反射光は、ビーム軸に対して平行および対称に設置された受光ファイバA,Bにより検出されるが、同ファイバに入射できる光線はファイバのNA（開口数）に依存する。すなわち図2(a)に示しているように、受光ファイバ軸に対して $\pm\theta_c$ （空中からの入射の時 $\theta_c = \sin^{-1}(NA)$ ）以下の角度を持つ光線のみが同ファイバに入射できる。同図において、点Sabで囲まれる斜線領域部分の光線が受光ファイバAで、点Scdで囲まれる斜線領域部分の光線が受光ファイバBで検出される。したがって、受光ファイバA,Bで検出される光量は、それぞれの斜線領域の面積として考えることができる。同光量（斜線面積）は、ビーム強度、測定点の面性状、受光ファイバと測定点の距離、測定点の傾き角 α により決定される。

ビーム強度、測定点の面性状、受光ファイバと測定点の距離が一定であるとき、傾き角 α と受光ファイバA,Bで検出される光量の間には、図2(b)に示されるような定性的関係（それぞれ $-\alpha_m, \alpha_m$ で最大）が認められる。同図に示されるように、傾き角 α はそれぞれの受光ファイバで検出される光量から一意に定まらないため、式(1)に示す無次元数 T_a を導入する。

Fig. 3 Principle of detecting a gap distance

$$T_a = \frac{I_b - I_a}{I_a + I_b} \quad (1)$$

式(1)において、 I_a, I_b はそれぞれ受光ファイバA,Bで検出される光量を表している。無次元数 T_a は、ビーム強度の影響を排除した変数となっている。傾き角 α と無次元数 T_a は、少なくとも $-\alpha_m \sim \alpha_m$ の範囲において図2(c)に示される定性的関係を有している。これより、ある角度範囲において無次元数 T_a から傾き角 α の検出が可能であることが分かる。

図3(a)は、受光ファイバと測定点Sの間の距離 Z (Gap Distance)の検出原理図を示している。測定点Sにビームが投光されスポットが形成されているとき、ビーム軸に平行に並んで設置された2本の受光ファイバAi,Aoにより反射光が検出される。反射光の強度分布を楕円形状で仮定するとき、それぞれの受光ファイバで検出される光量は、点Sab,点Scdで囲まれた斜線領域の面積として考えられる。同光量（斜線面積）は、ビーム強度、測定点の面性状、測定点の傾き、距離 Z に依存する。

ビーム強度、測定点の面性状、測定点の傾きが一定であるとき、距離 Z と受光ファイバAi,Aoで検出される光量は、図3(b)で示される定性的関係を有する。同図に示されるように、距離 Z はそれぞれの受光ファイバで検出される光量から直接一意に定まらないため、式(2)に示す無次元数 G_p ⁷⁾を導入する。

$$G_p = \frac{I_i - I_o}{I_i + I_o} \quad (2)$$

式(2)において、 I_i, I_o はそれぞれ受光ファイバAi,Aoで検出される光量を表している。無次元数 G_p はビーム強度の影響を排除しており、また測定点の傾きの影響を小さくしている。Bukow⁷⁾は、ある被測定面に対して、距離 Z と無次元数 G_p が図3(c)に示される定性的関係を有することを示し、無次元数 G_p から距離 Z の検出が可能であることを明らかにしている。

Fig. 4 Projected beam

3. 傾き・距離検出非接触センサエレメントの設計

3.1 ビーム投光部の検討

本研究で提案されるセンサは三次元座標測定機に設置されるため（図1）、小型軽量であることが要求される。このためビーム投光部を小型軽量化する目的から、同部を光ファイバで構成する。しかし、光ファイバから発せられるビームは、 NA によりファイバ軸に対して $\pm 28^\circ$ の開き角（プラスチック光ファイバの場合）を持ち、スポット径が大きくなる問題があるため、図4(a)に示すように、コリメータとして発光ファイバの先端にGraded-Index (GRIN) レンズを設置する。

発光ファイバの半径 r_1 、GRIN レンズへの入射光角度 θ_1 と GRIN レンズから発せられるビーム端半径 r_2 、ビーム角度 θ_2 には、式(3)に示される関係がある。

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\sqrt{A}L) & \frac{1}{N_0\sqrt{A}} \sin(\sqrt{A}L) \\ -N_0\sqrt{A} \sin(\sqrt{A}L) & \cos(\sqrt{A}L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)において、 $\sqrt{A}$ は2次勾配係数、 N_0 は屈折率、 L はGRIN レンズの長さを表している。最終的に目的とするセンサは、センサエレメントを球面上に複数個配置することにより構築されるため、センサを小型にするうえでセンサエレメントの長さを短くすることが必要である。また、測定点に形成されるスポット径は小さい方が望ましい。このような観点から、本研究では光源として波長が $0.637 \mu\text{m}$ のLEDを用い、同波長に対し $\sqrt{A}$ が 0.6075 、 N_0 が 1.6067 となる直径 1.0 mm 、長さ 2.58 mm のGRIN レンズを採用することとした。この場合の発光ファイバ径 d_1 とビームの半開き角 θ_2 およびGRIN レンズ端におけるビーム直径 d_2 の関係を図4(b)に示している。図より、GRIN レンズ端におけるビーム直径は約 1 mm とほぼ一定であるが、ビーム開き角は発光ファイバ径が大きくなるにつれ広がることが分かる。したがって、スポット径を小さくするため発光ファイバ径を小さくする必要があるが、本研究では直径 0.5 mm の発光ファイバを採用することとした。

3.2 センサエレメント

前述した二次元空間における傾きおよび距離の検出原理（図3）を三次元空間に展開し、上記のビーム投光部を組み

Fig. 5 Designed sensor element

合わせ、図5(a), (b)に示すようなセンサエレメントの設計を行った。同エレメントは最外径が 6.0 mm であり、直径 0.75 mm の受光ファイバを2本1組として、発光ファイバ（直径 0.5 mm 、GRIN レンズ付き）を中心に 90° 間隔に配置している。

図5(c)に示すように、受光ファイバ E_i, E_o, W_i, W_o により傾き θ を、また受光ファイバ N_i, N_o, S_i, S_o により傾き ϕ を検出する。これらの傾き θ, ϕ により、測定点 S の三次元空間における傾きを認識できる。また、8本の受光ファイバにより発光ファイバ先端に設置されたGRIN レンズ端面から測定点 S までの距離 Z が検出される。各受光ファイバにより得られる光量をそれぞれ $E_i, E_o, W_i, W_o, N_i, N_o, S_i, S_o$ とすると、式(1), (2)に基づき、距離 Z を求める無次元数 G_p と傾き θ を求める無次元数 T_{ew} および傾き ϕ を求める T_{ns} は、それぞれ式(4)~(6)で表される。

$$G_p = \frac{(E_i + W_i + N_i + S_i) - (E_o + W_o + N_o + S_o)}{E_i + E_o + W_i + W_o + N_i + N_o + S_i + S_o} \quad (4)$$

$$T_{ew} = \frac{(E_i + E_o) - (W_i + W_o)}{E_i + E_o + W_i + W_o} \quad (5)$$

$$T_{ns} = \frac{(N_i + N_o) - (S_i + S_o)}{N_i + N_o + S_i + S_o} \quad (6)$$

Fig. 6 Model of reflected light

(a) Measuring method of beam intensity

Fig. 7 Measurement of beam intensity

4. シミュレーションによるエレメントの検討

4.1 シミュレーション方法

ビームの投光により測定点にスポットが形成されるが、スポットにおけるビーム中の1光線の反射光は拡散反射成分と正反射成分から成ると仮定し、図6に示すように、それぞれを楕円形状としてモデル化した。

またビーム強度分布をモデル化するため、図7(a)に示すようなビーム強度の測定実験を行った。発光ファイバ、GRINレンズ、LED光源によりセンサエレメントの投光部と同一のビーム投光系を構築し、直径0.3 mmの受光ファイバの先端位置を x, y, z 方向にそれぞれ任意に設定し、同ファイバに入射する光強度を測定した。図7(b)は、 $y=0$ 面における測定結果を示しており、同結果に基づきビーム光強度のモデル化⁸⁾を行った。式(7)はそのモデル式を表している。

$$I(x, z) = \frac{23.82K}{(z+0.66)^2} \exp\left[\frac{-34.33x^2}{(z+0.66)^2}\right] \quad (7)$$

式(7)において、 K は光源(LED)強度に依存する係数を、 x, z は位置を、 $I(x, z)$ は位置 (x, z) における光強度を表している。また同実験により、ビームの開き角が $\pm 14^\circ$ であることが明らかになったが、この結果は、ビームの径と開き角を解析的に検討した結果(図4(b))と一致している。

図8は、受光ファイバに入射する光量の計算方法を示している。 $-\lambda \sim +\lambda$ の開き角を持つビーム中の1光線(角度 β)が

Fig. 8 Ray tracing for simulation

Table 1 Reflected light model in simulations

	Value of a/b for specular component	Value of a/b for diffuse component	Value of "light intensity of specular component"/"light intensity of diffuse component"
Diffuse surface	1.1	0.65	0.9
Specular surface	9.0	1.1	3.0

被測定面と交わる点Rにおいて、その点の法線Nに対して入射角と反射角が等しくなる方向にY軸を、点Rを通りY軸に垂直にX軸を定義する。点Rからの反射光として、拡散反射成分と正反射成分の2つの楕円(楕円の1軸はY軸上にあり点Rを通る)を定義する。点Rにおける拡散反射成分と正反射成分を表す楕円の合計面積(点Rにおける光強度)は、点Rの位置 (x, z) を式(7)に代入し求める。また、拡散反射成分と正反射成分の光量比(面積比)およびそれぞれの楕円形状を決定するパラメータ a, b の値は、被測定面の面性状から任意に決定しなければならないが、本シミュレーションでは文献7)を参考として拡散面と鏡面に対してそれぞれ表1に示す値とした。拡散反射成分と正反射成分の楕円モデルに対して、受光ファイバに入射する光量 A (点R, c_1, c_2 で囲まれる斜線部分の面積)を式(8)よりそれぞれ算出し、それらの光量の和を角度 β を持つ光線からの入射光量とする。

$$A = b^2 \left[\frac{a}{b} \tan^{-1} \left(\frac{\tan \sigma}{\frac{a}{b}} \right) - \frac{\left(\frac{a}{b} \right)^2 \tan \sigma}{\tan^2 \sigma + \left(\frac{a}{b} \right)^2} \right]_{\sigma=\sigma_1}^{\sigma=\sigma_2} \quad (8)$$

上式(8)において、 a, b は楕円形状を決定するパラメータ、 σ_1, σ_2 は点Rから受光ファイバに入射する反射光線の始角度と終角度を表している。

本シミュレーションでは、1光線の角度 β をビームの開き角 $\lambda = \pm 14^\circ$ に対して 0.5° 間隔で変化させ、それぞれの光線からの入射光量の合計を点Sの測定により受光ファイバで検出される光量とする。

Fig. 9 Diffuse surface

Fig. 10 Specular surface

図9(a), (b), (c)は、それぞれシミュレーションの対象とした拡散面の反射光モデルに関して、1光線の光量を100とした場合について、点Rを極としX軸を原線としたときの角度 γ に対する拡散反射成分、正反射成分およびそれらの和を表している。また図10(a), (b), (c)は、シミュレーションの対象とした鏡面の反射光モデルに関する同様の結果を示している。

シミュレーションは、受光ファイバ E_i , E_o , W_i , W_o に対して二次元問題として行われた。図9, 10の反射光モデルを示す拡散面と鏡面について、受光ファイバから測定点までの距離 Z を1~8 mmの範囲において0.1 mm間隔に、測定点の傾き角 θ を $-45^\circ \sim 45^\circ$ の範囲において 2.5° 間隔に設定し、それぞれの点で受光ファイバに入射する光量 E_i , E_o , W_i , W_o (面積) を計算し、式(4)より距離 Z を検出する無次元数 G_p を、式(5)より傾き角 θ を検出する無次元数 T_{ew} を求めた。

4.2 シミュレーション結果

図11, 12は拡散面に対する、図13, 14は鏡面に対するシミュレーション結果の一例を示している。図11(a)は $\theta = 30^\circ$, $\phi = 0^\circ$ の場合の距離 Z と光量 E_i , E_o , W_i , W_o の関係を、同図(b)は θ が 0° と 30° の場合($\phi = 0^\circ$)の距離 Z と無次元数 G_p の関係を示している。図12(a)は $Z = 4.5$ mm, $\phi = 0^\circ$ における傾き角 θ と光量 E_i , E_o , W_i , W_o の関係を、同図(b)は Z が3.5 mmと4.5 mmの場合($\phi = 0^\circ$)の傾き角 θ と無次元数 T_{ew} の関係を示している。図11(b), 図12(b)より、拡散面に対しては、無次元数 G_p から2.7~6.0 mm以上の範囲で距離 Z を、無次元数 T_{ew} から $\pm 45^\circ$ の範囲で傾き角 θ を検出可能であることが明らかになった。

図13(a)は、 $\theta = 7.5^\circ$, $\phi = 0^\circ$ の場合の距離 Z と光量 E_i , E_o , W_i , W_o の関係を、同図(b)は θ が 0° と 7.5° の場合($\phi = 0^\circ$)の距離 Z と無次元数 G_p の関係を示している。図14(a)は $Z = 4.5$ mm, $\phi = 0^\circ$ における傾き角 θ と光量 E_i , E_o , W_i , W_o の関係を、同図(b)は距離 Z が3.5 mmと4.5 mmの場合($\phi = 0^\circ$)の傾き角 θ と無次元数 T_{ew} の関係を示している。図

Fig. 11 Simulation results (1) for a diffuse surface

Fig. 12 Simulation results (2) for a diffuse surface

13(b), 図14(b)より、鏡面に対しては、傾き角 θ が $\pm 7.5^\circ$ の範囲において、無次元数 G_p から距離 Z (2.7~6.0 mm以上) を、無次元数 T_{ew} から傾き角 θ を検出できることが分かる。

図11(b), 図13(b)に示されているように、測定点の傾き角 θ の影響により、無次元数 G_p のみから距離 Z を直接求めるこ

Fig. 13 Simulation results (1) for a specular surface

Fig. 14 Simulation results (2) for a specular surface

とは困難であり、また図 12 (b)、図 14 (b) に示されているように、距離 Z の影響により、無次元数 T_{ew} のみから傾き θ を直接求めることは困難である。同様に、無次元数 T_{ns} のみから傾き ϕ を直接求めることも困難である。このため第 2 報にお

いて、キャリブレーションデータの 1 次補間に基づき、無次元数 G_p と無次元数 T_{ew} から距離 Z と角度 θ を算出する方法および無次元数 G_p と無次元数 T_{ns} から距離 Z と角度 ϕ を算出する方法を提案する。また、キャリブレーションデータは、拡散面に対する結果 (図 11, 12) と鏡面に対する結果 (図 13, 14) が異なっていることから分かるように、測定対象ごとに求める必要がある。

5. 結 言

本研究は、物理モデルから計算機モデルを構築するための自律高速測定システムを開発することを目的としており、その基礎となる傾きと距離の同時連続検出型非接触センサエレメントに関し、以下の結論を得た。

- (1) 光ファイバによる傾き θ, ϕ と距離 Z の検出原理を明らかにし、傾き θ, ϕ を求めるための無次元数 T_{ew}, T_{ns} と距離 Z を求めるための無次元数 G_p を導入した。
- (2) センサの小型軽量化のため、ビーム投光部を光ファイバと GRIN レンズにより構成することとし、同部の設計を行った。
- (3) 検出原理に基づきセンサエレメントを提案し、ビーム投光部を組み合わせることで 6 mm の最外径を持つセンサエレメントの設計を行った。
- (4) シミュレーションを行うためビーム強度分布を測定し、そのモデル式を明らかにした。
- (5) シミュレーションにより、距離 Z 、傾き θ, ϕ と無次元数 G_p, T_{ew}, T_{ns} の相互の関係を明らかにした。
- (6) シミュレーション結果より、拡散面では距離に関して 2.7~6.0 mm、傾きに関して $\pm 45^\circ$ の範囲で測定可能であることが明らかになった。鏡面では距離に関して 2.7~6.0 mm、傾きに関して $\pm 7.5^\circ$ の範囲で測定可能であることが分かった。

参 考 文 献

- 1) B. Bidanda, S. Motavalli and K. Harding: Reverse Engineering - An Evaluation of Prospective Noncontact Technologies and Applications in Manufacturing System, Int. J. Computer Integrated Manufacturing, **4**, 3, (1991) 145.
- 2) 三好隆志, 中村智彦, 近藤 司, 斎藤勝政: 金型用模型の非接触自動形状測定装置の開発, 精密工学会誌, **55**, 2 (1989) 393.
- 3) 三好隆志, 近藤 司, 斎藤勝政, 神谷征男, 岡田宏司: 非接触 3-D デジタル計測システムの開発研究, 精密工学会誌, **56**, 6 (1990) 1021.
- 4) H. Aoyama and T. Kishinami: A Proposition of an Interpolation Defined by Position Vectors and Unit Normal Vectors, Int. J. JSPE, **25**, 3, (1991) 239.
- 5) H. Aoyama, M. Kawai and T. Kishinami: A New Method for Detecting the Contact Point between a Touch Probe and a Surface, Ann. CIRP, **38**, 1, (1989) 517.
- 6) 青山英樹, 岸浪建史, 斎藤勝政, 河合正治: 位置ベクトルと単位法線ベクトルの検出に基づく寸法測定システムの開発, 精密工学会誌, **57**, 5 (1991) 807.
- 7) H. M. T. Bukow, M. J. Bailey and W. H. Stevenson: Simulation of Reflectance Sensors Using Image Synthesis Techniques, Computers in Mech. Eng., **1**, (1985) 69.
- 8) Y. Libo, S. Reilan, Q. Anping and L. Zhiyi: Compensation Mechanism of an Optical Fiber Turning Reflective Sensor, SPIE, **1572**, (1991) 258.