

非接触型位置および単位法線ベクトル検出センサーに関する基礎的研究

青山 英樹*・岸 浪 建 史**・斎 藤 勝 政**

A Basic Study on a Non-Contact Sensor to Detect a Position Vector and a Normal Vector

Hideki AOYAMA, Takeshi KISHINAMI and Katsumasa SAITO

Abstract

This paper deals with a non-contact sensor, which is able to detect a position vector and a normal vector, to measure a shape of a sculptured surface with a diffusing surface. The principle and a theoretical examination to detect a position vector and a normal vector in non-contact by using a beam of light and light detectors are described and basic experiments are made for the confirmation.

Key words : non-contact sensor, measurement, sculptured surface, position vector, normal vector

1. 緒 言

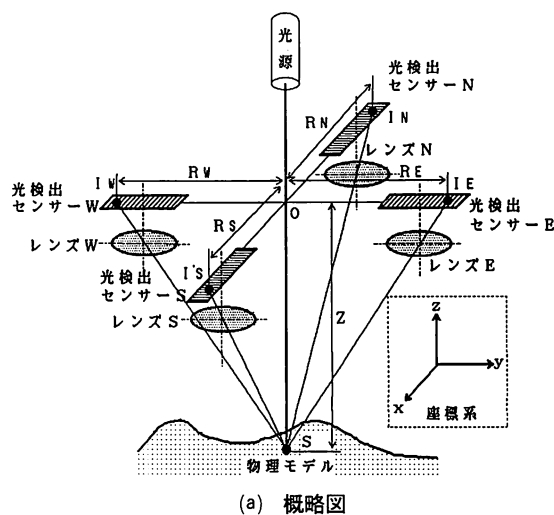
筆者らは、物理モデルの測定において位置ベクトルのみならず法線ベクトルの検出がきわめて重要であることを提案し、これまで接触型位置ベクトルおよび単位法線ベクトル検出センサー¹⁾とそれを用いた計測システム²⁾の開発を行ってきた。

開発した接触型位置および単位法線ベクトル検出センサー¹⁾は電気的接触に基づいて測定を行うため、絶縁体物理モデルに対してはその表面に導電体薄膜を形成する必要がある、また極めて低い接触圧においても接触傷を生ずるような物理モデルに対しては適用が困難であった。

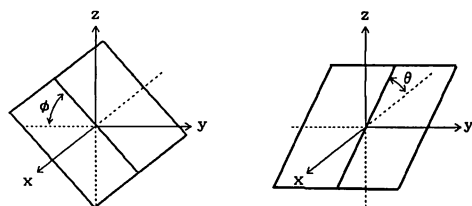
本研究では、物理モデル上にスポット光を投光しその反射光情報からスポット点の位置ベクトルと単位法線ベクトルを検出する非接触型センサーを開発することを目的として、その測定原理を示し、基礎実験より測定原理の確認を行ったので報告する。

2. 非接触型位置および単位法線ベクトル検出センサーの概要

図1(a)は提案する位置および単位法線ベクトル



(a) 概略図



(b) 法線表示座標系 (θ , ϕ)

図1 提案する位置および単位法線ベクトル検出センサー

* 助 手 機械工学科

** 教 授 北海道大学 工学部 精密工学科

検出センサーの概略図を示しており、同図(b)は法線を表示するための座標系 (θ, ϕ) を示している。同図(a)に示されているように、光源より光線が物理モデル上に投光されスポット S が形成されている。このとき、物理モデル上方に設置しているレンズ N, S, E, W を介して光検出センサー N, S, E, W によりスポット S の反射光情報を検出する。反射光情報は、それぞれのセンサー上においてスポット S の結像として検出され、像の位置情報 RN, RS, RE, RW と像の光量情報 IN, IS, IE, IW が得られる。

センサー上におけるスポット S 像の結像の位置情報 RN, RS, RE, RW より、点 O からスポット S までの距離 Z、すなわちスポット S 点の位置ベクトル Z を得ることができる。このとき、位置ベクトル Z は 1 つのセンサーから得られるスポット S 像の位置情報を用いて三角測量法を基に算出することができるが、点 O に対して対称に位置するセンサーから得られる距離情報と組み合わせ、すなわち $(RN + RS)$ 情報あるいは $(RE + RW)$ 情報を用いて算出するほうが、測定精度の向上を期待できる。この理由ならびに詳細な検討については 3 章において述べる。

単位法線ベクトルの測定においてはスポット S 像の光量情報を用いる。すなわち、物理モデル表面が拡散反射面により構成されていると仮定するならば、光量情報 IN と IS の比よりスポット S 点の x 軸回りの角度 ϕ を算出でき、光量情報 IE と IW の比より y 軸回りの角度 θ を算出できる。この詳細な検討については 4 章において述べる。

3. 位置ベクトル測定法の検討

位置ベクトル Z は図 2 に示す三角測量法に基づき、光検出センサー上のスポット S の結像位置を検出することにより式(1)から算出できる。

$$Z = \frac{R \cdot f}{r} \quad (1)$$

ここで、Z は光検出センサーからスポット S までの距離、R はスポット像と光線間の距離、r はスポット像と光検出センサー中心間の距離、f はレンズの焦点距離である。式(1)は三角形の相似則より導かれるが、以下において光線の投光角度に誤差を生じた場合についての検討を行う。

すなわち、図 3 に示すように、点 O'' にスポット点形成されるべきときに、光源の設置誤差により点 O'' より X'' 方向に r だけ離れた点 S にス

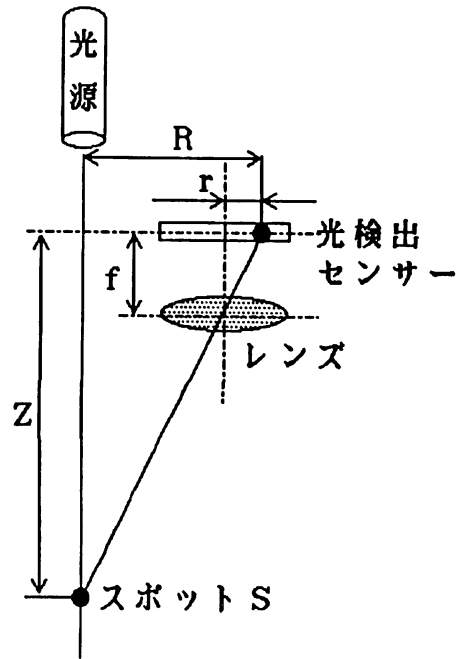


図2 三角測量法

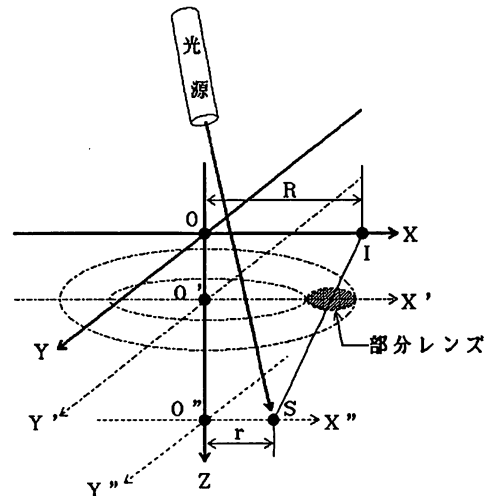
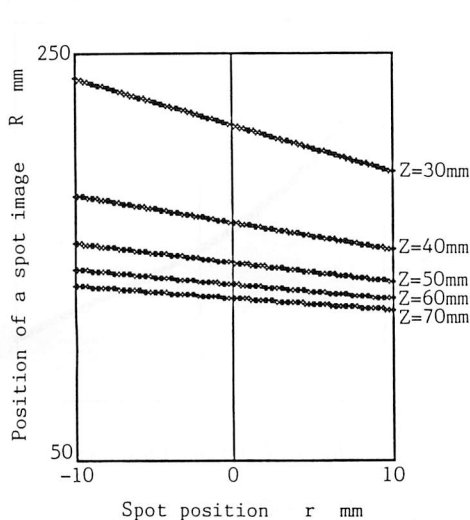
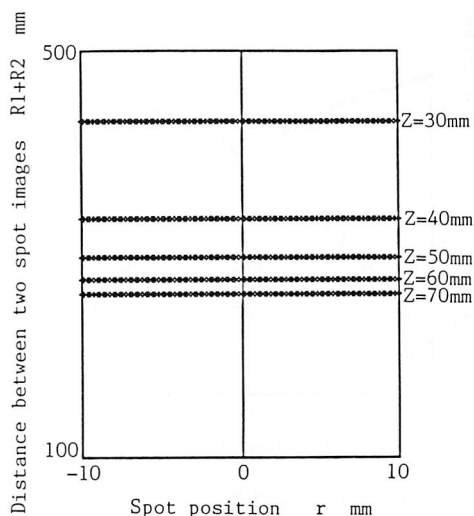


図3 スポット S とスポット像 I の位置関係

ポットが形成された。このとき部分レンズによるスポットの結像 I の位置 R を算出する。図 4 (a) は点 O から距離 Z (30, 40, 50, 60; 70mm) 離れた座標系 X'' Y'' における、スポット S の投光位置誤差 r (-10 ~ +10mm) に対するスポット像 I の位置 R の関係を示している。図 4 (a) より、スポット S の投光位置が r だけ誤差を生じたとき、光検出センサー上のスポット S 像の位置 R に影響を及ぼし、スポット S の位置ベクトルの算出において大きな誤差要因になることがわかる。



(a) 三角測量法における r と R の関係



(b) ステレオ測量法における r と $R1 + R2$ の関係

図4 三角測量法とステレオ測量法

ここで、図3において点 O' を対称として2組のレンズと光検出センサーを設置し、それぞれにより検出されるスポット像位置を $R1$, $R2$ として、 $R1 + R2$ について注目する。図4(b)はスポット S が光検出センサーより距離 Z (30, 40, 50, 60, 70mm) 離れた点における投光位置誤差 r (−10〜+10mm) と $R1 + R2$ の関係を示している。同図より、 $R1 + R2$ はスポット S の投光位置誤差 r によらず一定であることがわかる。したがって、図5に示すようなステレオ型距離計構造を用いてスポット S 像間の距離 $R1 + R2$ を検出し、式(2)³⁾より位置ベクトル Z を算出することにより、位置ベクトル測定におけるスポット S の投光誤差の影響を排除できる。

$$Z = \frac{(R1 + R2) \cdot f}{(R1 + R1) - 2L} \quad (2)$$

ここで、 Z は光検出センサーからスポット S まで

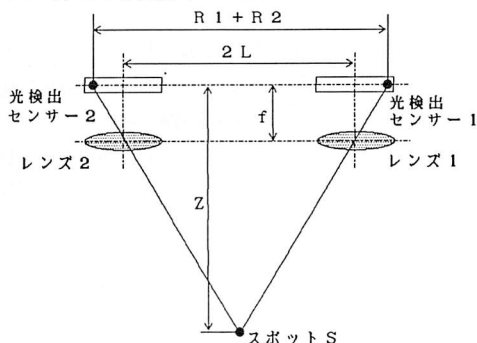


図5 ステレオ測量法

の距離、 $2L$ は光検出センサー中心間の距離、($R1 + R2$) は光検出センサー上のスポット S 像間の距離、 f はレンズ焦点距離である。本研究ではこのステレオ測量法を採用することとする。

4. 単位法線ベクトル測定法の検討

図6に示すようにスポット S の上方に2組の

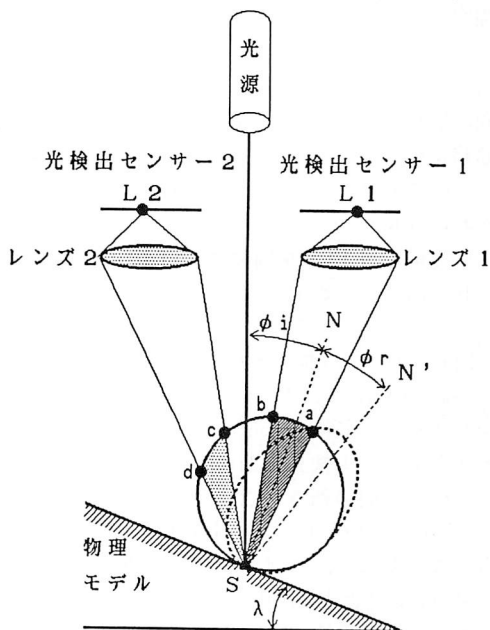
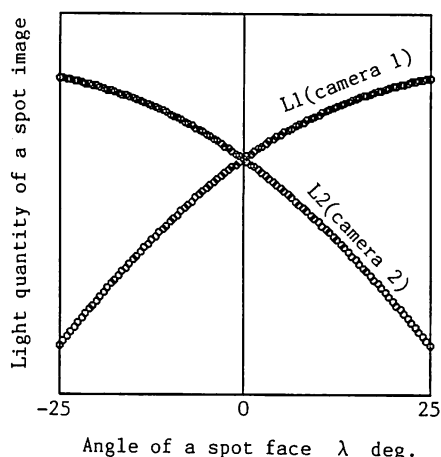
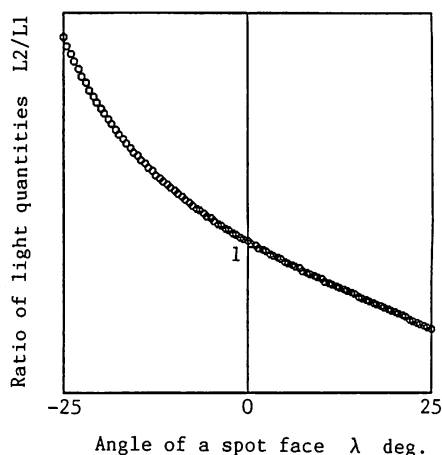


図6 単位法線ベクトルの検出原理



(a) スポット点の面の傾き λ と
スポット像の光量 L_1, L_2 の関係



(b) スポット面の傾き λ と
スポット像の光量比 L_2 / L_1 の関係

図7 スポット点の面の傾きと反射光量（計算結果）

レンズと光検出センサーを設置したとき、それぞれのレンズにより集光されるスポット S の反射光量すなわちスポット S 像の光量 L_1, L_2 および (L_2 / L_1) とスポット S 点の面角度 λ の関係について検討を行う。

物理モデル表面が拡散反射面であり、その測定点（スポット S 点）が角度 λ を有するとき、物理モデル表面に投光されたスポット S の反射光強度分布は、定性的には図6において点線楕円で示しているようにスポット S 点の法線方向 N に対して入射角 ϕ_i と反射角 ϕ_r が等しい N' の方向に最も強い分布となっている。本研究では計算簡略化のためスポット S の反射強度分布を図6において実線で示している円形状と仮定し、それぞれの光検出センサーで検出されるスポット S 像の光量 L_1 と L_2 を同図に示している斜線部分 S_{ab} の面積と点影部分 S_{cd} の面積として算出した。

図6において光検出センサーの中心間の距離を100mm、光検出センサーからスポット S までの距離を50mmとして得られたスポット S 点の面の傾き λ とスポット像光量 L_1, L_2 の関係を図7(a)に、また、面の傾き λ とスポット像光量 L_1 と L_2 の比 (L_2 / L_1) の関係を図7(b)に示している。図7(b)より、スポット S の上方に設置した2組のレンズと光検出センサーにより検出されるスポット像光量比 L_2 / L_1 より、スポット S 点の面の傾き λ を算出できることがわかる。

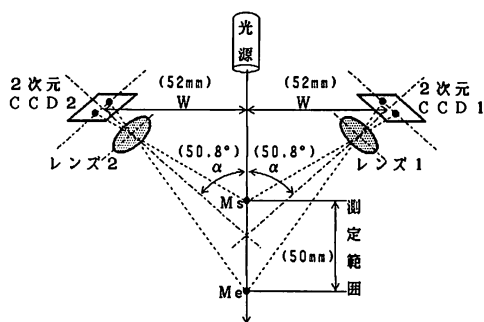


図8 基礎実験用センサー

5. 基礎実験と結果

提案するセンサーの位置ベクトルおよび単位法線ベクトルの検出方法と検討結果について3章、4章において述べてきたが、基礎実験によりその確認を行った。

基礎実験ではスポットの反射光情報を収集するため、512×512画素のエレメントにより構成される2次元CCDと16mmの焦点距離を持つレンズを組み合わせたCCDカメラ（National WV-CD 50）を用いた。図8に示すように、2台のCCDカメラを中心から52mmの位置に中心に対して50.8 deg. 傾けてそれぞれ設置した。このとき、測定範囲は同図に示すように点 M_s から点 M_e までの50mmとなる。光源は0.95 mW の He-Ne レーザーを用いた。

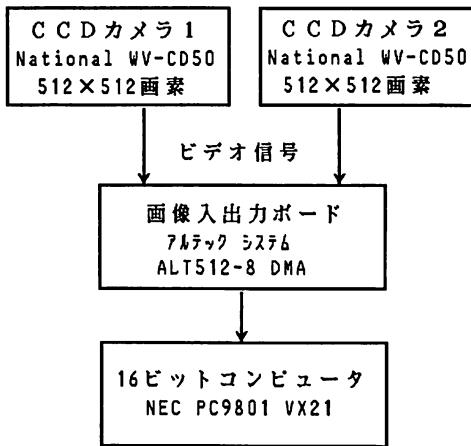


図9 位置および単位法線ベクトル検出システム

図9は実験で用いた位置および単位法線ベクトルの検出システムを示しているが、CCDカメラによって検出されたスポット像はビデオ信号として出力され、画像入出力ボード（アルテックシステム ALT 512-8 DMA）を介して16ビットコンピュータ（NEC PC 9801 VX 21）へ入力される。これより、2台のCCDカメラのCCD面（光検出センサー）上のスポット像の位置と光量を検出する。スポット像位置情報よりスポット点の位置ベクトルを算出し、スポット像光量情報よりスポット点の面の傾きを算出する。

実験1として0度の傾きを持つ被測定面を測定範囲50mmの間を5mm間隔に設定して位置ベクトルの測定を行い、実験2として位置ベクトルを一定として被測定面の傾きを $-25^{\circ} \sim +25^{\circ}$ の範囲を5度間隔に設定して単位法線ベクトル測定を行った。図10は実験1により得られたスポット点の位置ベクトルZとスポット像間の距離 $R1 + R2$ の関係を示している。また、図11(a)は実験2により得られたスポット点の面の傾き λ とスポット像の光量 $L1, L2$ の関係を示しており、同図(b)は面の傾き λ とスポット像の光量比 $(L2/L1)$ の関係を示している。

図10より、2台のCCDカメラのCCD面上のスポット像間の距離 $(R1 + R2)$ を検出することにより、スポット点の位置ベクトルZを算出できることがわかる。また、図11(b)より、スポット像の光量比 $(L2/L1)$ を検出することによりスポット点の面の傾き λ を算出できることがわかる。すなわち、CCDカメラを90度間隔に4台設置し、光線に対して対称の位置関係にあるス

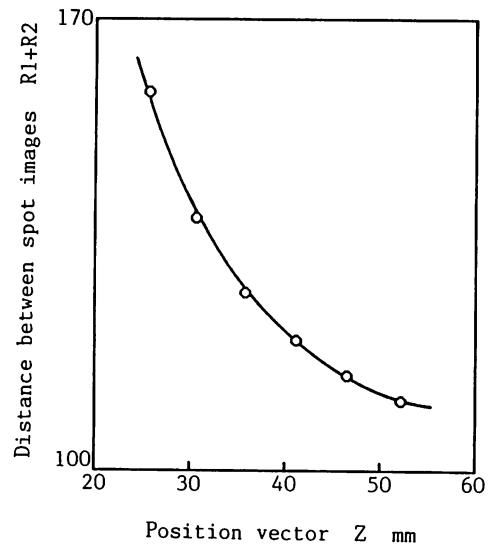
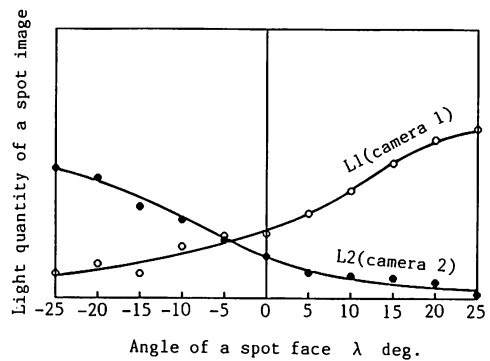
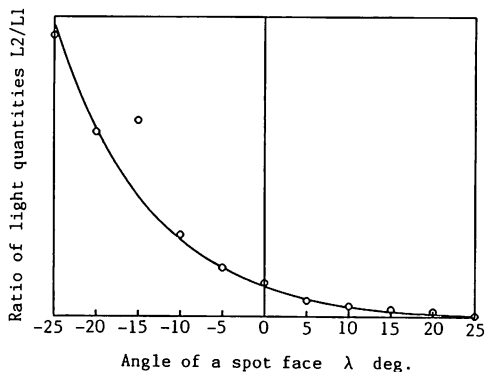
図10 位置ベクトルZとスポット像間距離 $R1 + R2$ の関係（実験結果）(a) スポット点の面の傾き λ と
スポット像の光量 $L1, L2$ の関係(b) スポット点の面の傾き λ と
スポット像の光量比 $L2/L1$ の関係

図11 スポット点の面の傾きと反射光量（実験結果）

ポット像光量比を得ることにより, θ , ϕ の2方向に対するスポット点の面の傾きを算出でき, 単位法線ベクトルの測定が可能となる。

6. 結 言

本研究をまとめると次の通りである。

- (1) 非接触型位置ベクトル単位法線ベクトル検出センサーを提案し, その概要を示した。
- (2) 位置ベクトルの測定方法を明かにし, スポットの投光誤差の影響を排除するため, ステレオ型センサーとすることを検討した。
- (3) 単位法線ベクトルの測定方法を明かにし, シミュレーションにより測定方法の検討を行った。
- (4) 基礎的実験を行うためのセンサーシステムを試作し, 位置ベクトル測定実験および単位法線ベクトル測定実験を行い, 提案した測定方法が

初期の目的を達成することを確認した。

参 考 文 献

- 1) 青山, 岸浪, 斎藤: 球面抵抗薄膜を用いた接触式面法線検出プローブの基礎的研究, 精密工学会誌, 54, 10 (1988), 1957.
- 2) H. Aoyama, M. Kawai, T. Kishinami: A New Method for Detecting Contact Point between a Touch Probe and a Surface, Annals of the CIRP, Vol.38/1, 517.
- 3) H. Aoyama, T. Kishinami, K. Saito: A Range Finder Based on Stereo Vision and Multi-Spot Projection for Computer Vision, Proc. of ICAM (1989), 635.

(平成元年11月30日受理)