

## 鏡面反射スポット画像に基づく形状計測装置の開発（第3報）

北海道大学大学院工学研究科 山崎知之, 北海道大学大学院情報科学研究科 小野里雅彦, 田中文基

## 要 旨

本研究では、鏡面性質をもった自由曲面形状の非接触計測のための新しい計測法として、鏡面反射スポット画像に基づく形状計測法を提案している。本計測法は、対象の位置情報と同時に、法線情報を近傍近似によらず直接計測することができるという特徴をもつ。本報では、計測において既知情報としてきたパラメータの取得法の見直しと、計測範囲の拡大を狙った改良について報告する。

## 1. はじめに

金型や自動車のボデーなどの鏡面反射特性の表面をもった物体には、ステレオ法などの受動的な計測法や、アクティブステレオ法を適用することができないため計測が困難であり、これらに対する非接触形状計測技術が求められている。

著者らは、鏡面形状計測のための新しい装置として、鏡面反射スポット画像に基づく形状計測装置（図1）の開発を行ってきた。<sup>1)2)</sup> 本計測装置は、計測対象の鏡面反射を積極的に利用することで、対象の位置情報と法線情報を同時に直接計測することができるという特徴をもつ。これまでに、試作装置により鏡面性質をもった対象の形状計測が可能であり、計測理論が妥当であるという結果が得られている。本報では、計測において既知情報としてきたパラメータの取得法の見直しと、計測範囲の拡大を狙った前傾スクリーンへの対応について報告する。

## 2. 鏡面反射スポット画像に基づく形状計測法

本計測法の計測装置の光学系の構成を図2に示す。測定面に対して照射したレーザービームの反射光をスクリーンに投影する。投影された像を鏡面反射スポットと呼ぶ。この鏡面反射スポットを CCD カメラによって鏡面反射スポット画像として取得し、画像計測によりスクリーン上での鏡面反射スポットの位置を得る。スクリーン上の鏡面反射スポット  $s_1$  と、 $\Delta L$  後退させたスクリーン上の鏡面反射スポット  $s_2$  から、反射光ベク

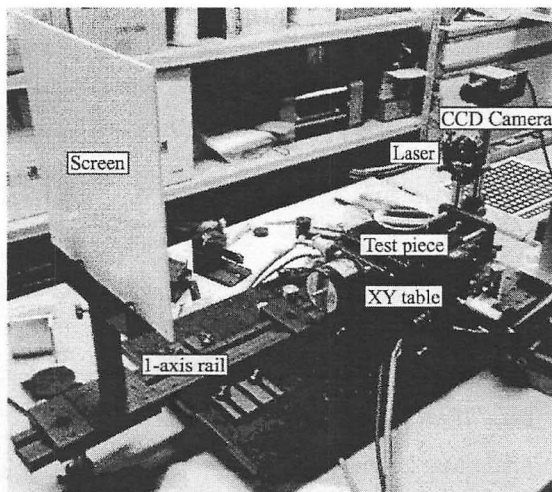


Fig. 1 A view of the measurement system

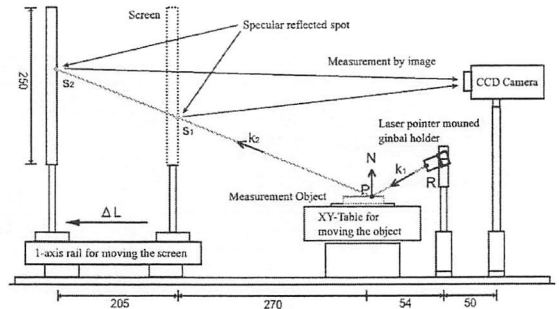


Fig. 2 Structural drawing of the measurement system

トル  $k_2$  は、

$$k_2 = \frac{s_2 - s_1}{|s_2 - s_1|} \quad (1)$$

により求めることができる。また、入射光ベクトル  $k_1$  は、レーザービーム照射角度により決定され、既知情報である。求められた  $k_2$  と  $k_1$  から、反射位置の法線  $N$  は、

$$N = \frac{k_2 - k_1}{|k_2 - k_1|} \quad (2)$$

反射位置  $P$  は、レーザー光源位置  $R$  を通り方向ベクトルが  $k_1$  の直線と、 $s_1$  を通り方向ベクトルが  $k_2$  の直線の交点なので、連立方程式、

$$\begin{cases} P = k_1 t_0 + R \\ P = k_2 t_1 + s_1 \end{cases} \quad (3)$$

の解  $P$  として求められる。従って、 $t_0 = |P - R|$ ,  $t_1 = |s_1 - P|$  である。求められた  $P$  に、XY テーブルの変位量を加えることによって位置情報の計測結果とする。

## 3. 入射光パラメータ決定法

前節で述べたように、本計測法では計測前に光源位置  $R$  と入射光ベクトル  $k_1$  が既知である必要がある。

これまで  $R$  は、図3に示すように、角度を変えながらスクリーンへ直接照射した場合のレーザー光の交点を求めることにより取得していた。また、 $k_1$  は、平面試料に対する鏡面反射スポットから反射光ベクトル  $k_2 = [k_{2x} \ k_{2y} \ k_{2z}]^t$  を求め、これを用いて  $k_1 = [k_{1x} \ k_{1y} \ -k_{1z}]^t$  として決定していた。

しかし、これらの方法では、光線を推定するためにスポットを画像計測している。このことは、計測装置の既知情報の取得のために、その計測装置を用いているということであり、計測の際に誤差原因の特定を困難にするなどの問題を生じてしまっていた。

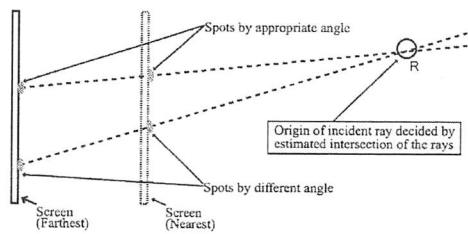


Fig. 3 Old method for decides origin of incident ray

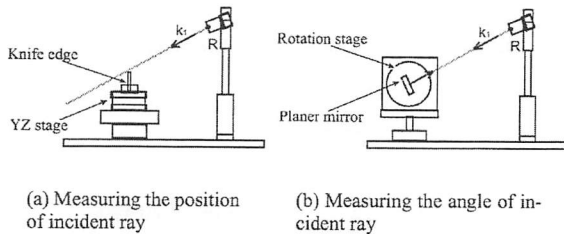


Fig. 4 Measuring the parameters of incident ray

そこで、レーザの位置およびレーザ照射角度の直接取得を行うことにより、この問題に対応した。これは、 $R$  は入射光線上の1点であればどこでもよく、また、 $k_1$  は、レーザ照射角度  $\theta$  によって決定されることに基づく。試作した装置では、レーザはジンバル機構に固定されており、ある程度の位置と角度を知ることができるが、より高精度に  $R$  と  $k_1$  を取得するために、照射されるレーザそのものについて、以下の方法でその位置と照射角度を求めた。

レーザの位置に関しては図 4(a) に示すように、YZ 軸ステージを用いて縦と横からナイフエッジにより光線を切断し、その位置を求め、これを  $R$  とした。レーザの照射角度に関しては、図 4(b) に示すように平面ミラーつき回転ステージを用いて、反射光がビーム出口に戻るよう回転ステージの角度を設定し、そのときの角度を照射角度  $\theta$  とした。この  $\theta$  から、 $k_1 = [\cos\theta \ 0 \ -\sin\theta]^t$  として  $k_1$  を決定した。

#### 4. 前傾スクリーンの導入

本計測法では、鏡面反射スポットが反射面法線の  $x$  方向の角度 ( $\phi_x$ ) に対して過敏に反応するため、 $x$  方向について計測可能な角度の範囲が極めて小さく、これを大きくするには非常に巨大なスクリーンを用意するしかないという問題点があった。

この問題に対して、図 5 に示すように、スクリーンを適当な角度で前に傾けて設置することによって対応した。図からもわかるように、前傾スクリーンでは、直立スクリーンでは捉えられない反射光のスポットを取得できる。

スクリーンを傾けると「カメラ光軸とスクリーン平面が垂直に交わる」という計測の前提が成り立たなくなり、実際に計測すると、見かけ上のスポット位置  $s'_1$  が計測されてしまう。しかし、真のスポット位置  $s_1$  は、と CCD カメラの焦点  $F$  とを結ぶ直線と、前傾スクリーン平面の交点の位置にあることが明らかである。従って、あらかじめ  $F$  を求めておき、この交点を求めることによって  $s_1$  を取得できる。

図 6 は、反射位置  $P$  から  $x$  方向に 270[mm] の位置に投影

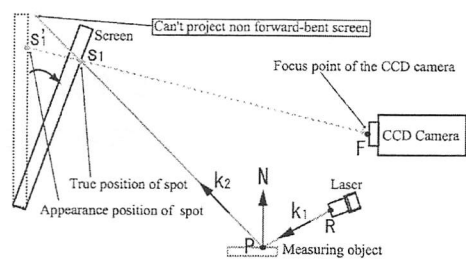


Fig. 5 Forward-bent screen

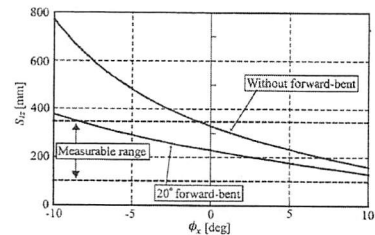


Fig. 6 Measurable range

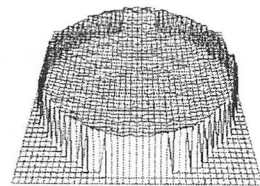


Fig. 7 Measurement result

したスポット  $s_1$  の高さ  $s_{1z}$  と  $\phi_x$  の関係を、直立スクリーンと前傾スクリーンそれぞれについて示したものである。直立スクリーンでは約 1[deg] までしか計測できないが、前傾スクリーンでは約 8[deg] まで計測できることがわかる。

#### 5. 実測実験

曲率半径が既知 (406.4mm) である凹球面に対して、 $80 \times 80$ [mm] の範囲を 2.0[mm] ピッチで形状計測を行った結果を図 7 に示す。この曲率半径の場合、試作装置ではこれまで、形状全体の計測は不可能であったが、本報にて述べた改良を加えたことにより形状全体を計測できている。位置計測結果の標準偏差は 0.115[mm]、法線計測結果の標準偏差 (角度) は  $6.17 \times 10^{-4}$ [rad] (0.0353[deg]) となった。

#### 6. まとめ

鏡面反射スポット画像に基づく形状計測において、(1) 既知情報である入射光線のパラメータ取得法の問題点を見直し、新しい取得手順を考案した。(2) 前傾スクリーンを用いることにより、 $x$  方向の計測可能角度を従来の約 1[deg] までから約 8[deg] までに拡大した。

#### 参考文献

- 1) 山崎, ほか: 鏡面反射スポット画像に基づく形状計測装置の開発, 2003 年度精密工学会秋季大会講演論文集
- 2) 山崎, ほか: 鏡面反射スポット画像に基づく形状計測装置の開発 (第 2 報), 2005 年度精密工学会春季大会講演論文集

特許あり?