

鏡面反射スポット画像に基づく形状計測装置の開発

北海道大学 ○山崎 知之, 近藤 司, 金子 俊一, 五十嵐 悟

要旨

鏡面形状計測の為に新しい手法である、鏡面反射スポット画像に基づく形状計測装置を開発した。本装置では鏡面反射レーザー光の投影画像から、測定鏡面の位置・法線情報を直接取得する。測定原理及び実測実験の結果を検討し報告する。

1 緒論

工業製品が複雑化、多様化してゆくなか、その形状の計測に対する要求は増す一方である。測定精度や測定速度の向上に対する要求はもちろんであるが、それ以外にも従来の測定技術では測定できない対象に対する測定の要求なども多岐にわたる。これに対応して、現在に至るまで多種の形状計測法が考案され、様々な要求、用途に対応してきた。

しかし、現在でも測定が困難な対象として、鏡面の表面形状がある。鏡面は表面の品質が重要であり、接触式の計測では表面を傷つけてしまう。また、非接触式の光学的計測でも、鏡面の反射してしまうという性質から表面の輝度が形状によらないので、計測困難であるとされてきた。

これに対し、本研究室*では鏡面形状の計測・評価のための新しい手法に関する研究が行われ、1軸レーザーリット光を用いた鏡面反射投影画像に基づく形状計測法が提案された。[1][2][3]

鏡面反射投影画像に基づく形状計測法は、ただ単に鏡面の形状を測定できるというだけでなく、もう一つの特徴として、法線情報を直接測定することが可能という性質をもっている。一般に、形状計測は、物体の形状情報すなわち位置情報のみを測定するのであって、法線情報の取得のためには、位置情報の近傍近似などが用いられる。法線情報は表面のなめらかさである連続性を表すパラメータであり、その評価のためには、法線情報の直接測定ができる測定法が求められる。

表面形状のなめらかさは反射光に反映され、現在行われているその評価法のひとつとして「ハイライトチェック」が挙げられる。これは自動車のボディなど意匠性の高いものや、その金型などに対して、視覚的な完成度を評価するために用いられる方法である。そこでは評価対象の面に対して蛍光灯などの平行光源を写しこみ、その反射光のラインの流れやデフォームをチェックして形状の変化具合やなめらかさを評価している。[4]つまり人間がその感性に基づき、面のゆがみを定性的に評価しているというのが現状であり、そこには経験によって得られるノウハウや、評価の個人差という問題点がある。このことは、生産工程の自動化の妨げにもなっている。

多様化する工業製品の形状に対して、表面形状のなめらかさの評価は必要不可欠であり、法線情報を直接測定することができるという点から、ハイライトチェックに代わる定量的なための方法として、鏡面反射投影画像に基づく形状計測法は大きく期待されている。

本研究では、曲面形状の評価のための新しい測定法である、鏡面反射投影画像に基づく形状計測法を改良し、その計測装置の開発と測定法の確立、および装置の評価を行った。

2 鏡面反射スポット画像に基づく形状計測法

ある形状を持つ鏡面の表面に対してレーザービームを照射すると、ビームは照射位置で反射する。この反射は、光の反射に関する基本的な法則であるスネルの法則に従う。スネルの法則の概念図を図1に示す。

図において、

N	反射位置の面法線
k_1	入射光の方向ベクトル (入射光ベクトル)
k_2	反射光の方向ベクトル (反射光ベクトル)
θ_1, θ_2	入射角, 反射角

である。入射光の方向ベクトル k_1 と反射光の方向ベクトル k_2 はそれぞれ図1に示すような方向成分を持ち、その大きさは $|k_1| = |k_2| = 1$ であると定義する。

鏡面 (測定面) に光を入射したとき、スネルの法則より、

1. 反射光は入射面 (入射光の方向ベクトルと反射位置の法線が作る面) 内にある。
2. 入射角と反射角は等しい。 ($\theta_1 = \theta_2$)

の2つが成り立つ。1から入射光 k_1 、反射光 k_2 、反射面法線 N は同一平面内に存在することがわかる。したがって、測定における幾何学的関係を二次元的に考えることができる。また、2から、反射位置

* 北海道大学 制御情報工学講座 生産環境制御工学分野

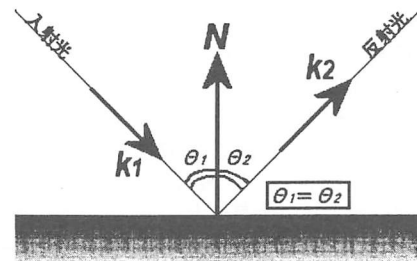
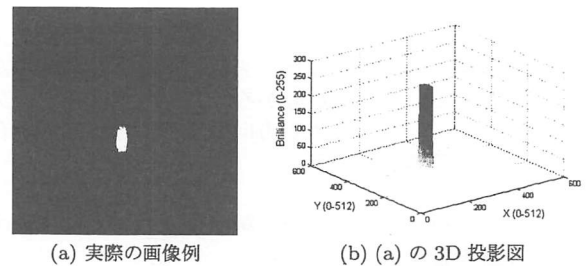


図1: 光の反射の法則 (スネルの法則)

すなわち測定位置は入射光と反射光の交点、法線 N は入射光と反射光の方向ベクトルの差として求めることができる。

これを計測に利用するには、反射光ベクトルの測定を行う必要がある。そのために本測定法では反射光をスクリーンに投影し、CCDカメラにより画像として取得する。投影された像を鏡面反射スポットと呼び、得られた画像を鏡面反射スポット画像と呼ぶ。鏡面反射スポット画像の一例を図2示す。



(a) 実際の画像例

(b) (a) の3D投影図

図2: 鏡面反射スポット画像

予め CCD カメラのカメラパラメータを求めておくことにより、鏡面反射スポット画像から鏡面反射スポットの位置を求めることができるが、反射光ベクトルを求めるためには、反射光と平行ではない2つ以上の平面 (スクリーン) 上に投影された鏡面反射スポットの位置情報が必要である。そこで、本装置では投影を行うスクリーンに1軸 (前後) 移動機構をもたせ、スクリーンを移動させることにより、2枚の鏡面反射スポット画像を得る。2つの鏡面反射スポット投影点から反射位置 (測定位置) とその法線を求める方法を以下に述べる。

図3は本装置における幾何学的関係図である。

図において、

R	レーザー光源位置
θ	レーザービーム照射角度
P	測定位置
s_1, s_2	鏡面反射スポット投影点
ΔL	スクリーン移動量

である。その他のパラメータは図1の表示に従う。このとき、スクリーン上の投影点 s_1 と、 ΔL 後退させたスクリーン上の投影点 s_2 から、反射光ベクトル k_2 は、

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

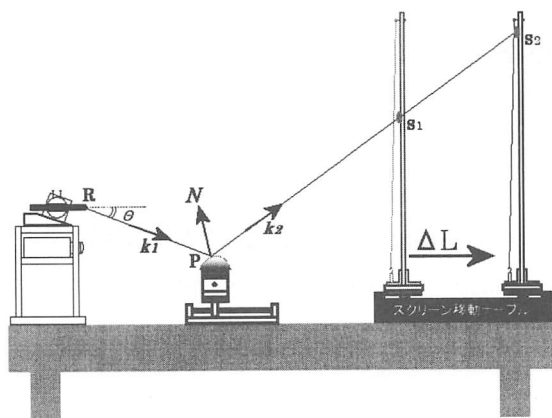


図 3: 幾何学的関係

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 θ により、

$$k_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ 0 \\ \sin\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表される。求められた k_2 と k_1 から、法線 N は、

$$N = \frac{k_2 - k_1}{|k_2 - k_1|} \quad (3)$$

位置 P は、 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、

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{1x} \\ k_{1y} \\ k_{1z} \end{bmatrix} t_1 + \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{2x} \\ k_{2y} \\ k_{2z} \end{bmatrix} t_2 + \begin{bmatrix} s_{1x} \\ s_{1y} \\ s_{1z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

の解 $P(P_x, P_y, P_z)$ として求められる。

3 装置の構成と精度

装置は計測を行うための光学系と、光学系の各構成要素の制御を行う制御部からなる。光学系の測定装置は、レーザー/カメラユニット（レーザー光装置、CCD カメラ）、試料移動用 XY テーブル、スクリーンユニット（スクリーン、スクリーン移動テーブル）、からなる。制御部の装置の中心となるのは PC で、CCD カメラと試料移動テーブルの制御をここから行う。また、計測で得られた情報の処理も PC で行う。光学系部分の外観を図 4 に示す。

光学系の各ユニット毎のアライメント（軸合わせやカメラキャリブレーションなど）は、3 軸の NC フライス盤を利用して行った。使用した NC フライス盤の移動精度は各軸共に $10[\mu\text{m}]$ である。従って、測定の際の既知パラメタである $R, \theta, \Delta L$ 及びスクリーンの平面度や移動テーブルの移動軸の直交性には、 $10[\mu\text{m}]$ 程度の精度が得られている。

本測定法は画像応用計測という性質上、測定精度は画像反射スポット画像の解像度に大きく依存する。開発した装置では、スクリーン最前位置（鏡面反射スポット s_1 投影位置）における解像度は約 $1.00[\text{mm}/\text{pixel}]$ 、スクリーン最奥位置（鏡面反射スポット s_2 投影位置）における解像度は約 $1.25[\text{mm}/\text{pixel}]$ である。単純に画素単位で計測を行うと、この数値がそのまま測定精度となってしまうので、鏡面反射スポット画像のスポット像がある程度の大きさ（図 2 の例では約 $30 \times 70[\text{pixel}]$ ）をもって利用し、その輝度重心を画像上のスポット位置としている。本装置では 256 階調 (8bits) の濃淡画像を用いているので、少なくとも 2 倍、最大で 256 倍の精度を期待できる。

4 実測実験

実測実験として、図 5 に示す半径 500mm の球の一部を切り出した物体を測定した。

測定は装置の座標系で行われ、その真の値を知ることは極めて困難なので、測定結果の点群の位置と法線から、設定値がわかっている球の

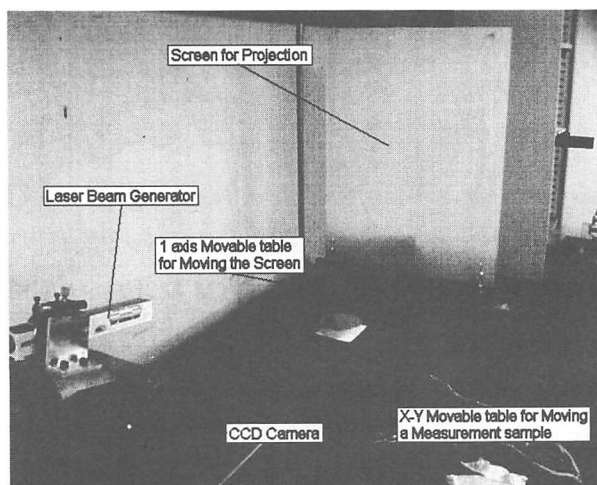


図 4: 装置外観



図 5: 測定対象試料

中心と半径を算出し、結果の評価を行った。法線情報を近傍近似によらず直接取得できるという本測定法の特徴を用いて、

1. 全ての測定点の位置から同じ距離にある点を求める方法
2. 得られた法線情報から測定点を通り法線方向の傾きを持った直線の交点として求める方法

の 2 つの方法を使って球の中心と半径を算出した結果を以下に示す。

1 の方法による中心の座標	(-79.01, -48.50, -811.99)
1 の方法による半径	488.84mm
2 の方法による中心の座標	(-115.05, -48.50, -802.31)
2 の方法による半径	487.78mm

この結果を見る限り、本装置は形状計測装置としては、まだまだ精度的に問題がある。精度向上にはこれから策を講じてゆく必要がある。しかし、大きく外れているわけではないので、本測定法の理論は妥当であるといえる。

5 結論

- 鏡面反射画像に基づく形状計測法を改良し、レーザービームを用いた鏡面反射スポット画像に基づく形状計測法を提案した。
- 実際に装置を開発し、実測実験を行うことにより、提案手法が妥当であることを確認した。

参考文献

- [1] 森田泰章, 近藤司, 金子俊一, 五十嵐悟, 「鏡面反射光を用いた曲面評価に関する研究」, 1999 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p.447, (1999)
- [2] 森田泰章, 佐藤文彦, 近藤司, 金子俊一, 五十嵐悟, 「鏡面反射光を用いた曲面評価に関する研究」, 1999 年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, pp.64-65, (1999)
- [3] 近藤司, 森田泰章, 金子俊一, 五十嵐悟, 「鏡面反射光を用いた金型曲面評価に関する研究」, 型技術 1999 年 12 月号 VOL.14 NO.12, 日本工業新聞社, pp.42-43, (1999)
- [4] OGIHARA, CORPORATE PROFILE