49. 半球面に配置した点光源による鏡面物体の形状計測に関する研究

— 光源の配置についての検討 —

松下 朋宏

池本 直隆

磯村 稔

(日本大学)

1. はじめに

現在、工業製品には鏡面を有する物体が多数存在しており、これらの物体を自動検査することは品質管理やコストの面で重要であると考えられる。さらに、製品の自動検査は近年の著しいコンピュータ性能の向上により、より一層有効になると考えられる。

先に著者らは半球面上に配置した複数の点光源により鏡面物体に光を照射し、鏡面物体に生じた光源の虚像から鏡面物体の形状を計測する手法を提示した^{(1),(2)}。そこで今回は、シミュレーションにより鏡面物体に光を照射する光源の配置方法について検討を行ったのでその結果を報告する。

2. 計測原理

図 1 に示すような直交座標系 xyz の原点を中心とする半径 R の半球面を考える。ここで、図に示すように半球面上に点光源を複数配置すると、鏡面物体には光源の正反射像である虚像が複数映り込む。これを視点で計測することにより、鏡面物体表面の法線ベクトルを算出することができる。

図1 計測装置の概略

図2 光源、視点、鏡面物体の幾何学的関係

いま、図 2 に示すように任意な 1 つの光源から鏡面物体に光を照射

することを考えると、鏡面物体上には虚像点 $P(x_p, y_p, z_p)$ を生じる。このとき、点 P における法線ベクトル $\vec{n}$ は(1)式により求めることができる。

$$\vec{n} = \frac{\vec{PL}}{|\vec{PL}|} + \frac{\vec{PS}}{|\vec{PS}|} \quad \dots (1)$$

ここで、光源 L と虚像点 P との距離を $|\vec{PL}|$ 、視点 S と虚像点 P との距離を $|\vec{PS}|$ とし、鏡面物体上に生じた虚像点 P の z 座標 z_p が(2)式の条件を満たすとする、虚像点 $P(x_p, y_p, z_p)$ は $P'(x_p, y_p, 0)$ と近似することができる。

$$z_p \ll |\vec{PL}| \quad \dots (2)$$

$$z_p \ll |\vec{PS}|$$

よって、鏡面物体上に生じた虚像点 P における法線ベクトル $\vec{n}$ は近似的に(3)式として求めることができる。

$$\vec{n} \approx \frac{\vec{P'L}}{|\vec{P'L}|} + \frac{\vec{P'S}}{|\vec{P'S}|} \quad \dots (3)$$

従って、視点 S により鏡面物体に生じた点光源の虚像の 2 次元座標 (x_p, y_p) を計測することで、鏡面物体形状の情報の一つである法線ベクトルを求めることができる。

3. 光源の配置方法について

図3は光源の配置方法の検討に想定した光源の配置を示したものである。本計測法において最適な光源の配置とは虚像点が鏡面物体全体に、かつ均一に分布する配置とし、以下にその配置方法を定義する。検討した光源の配置方法は図(a),(b),(c),(d)の4種類とし、それぞれ配置A、配置B、配置C、配置Dと呼称する。配置Aは図(a)のように光源を配置する半球面に沿って等間隔に配置するものとする。配置Bは図(b)のように光源を xy 平面において等間隔に配置するものとする。配置Cは

図3 光源の配置

Study on Shape Measurement of Specular Objects by Point Light Source in Hemispherical Surface. — On Configuration of the Light Source — Tomohiro Matsushita, Naotaka Ikemoto, and Minoru Isomura.

図(c)のように光源を放射状に配置するものとする。また、配置 D は図(d)のように光源を同心円状に配置するものとする。

本計測法は鏡面物体に生じた虚像点から鏡面物体表面の法線ベクトルを算出する方法であるため、鏡面物体全体に虚像点が存在する必要がある。また、虚像点と虚像点の間隔が狭い場合には計測が困難となる。そこで、鏡面物体に存在する虚像点の分布状態を表す数値として比率 p を(4)式で定義する。比率 p は図 4 に示すように鏡面物体の表面を等面積に k 分割し、その分割した面のうち虚像点が生じた分割面の数 m の割合である。

$$p = \frac{m}{k} \times 100 \quad \cdots (4)$$

さらに(5)式により標準偏差 σ を算出する。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(m(i) - \frac{\sum_{i=1}^k m(i)}{k} \right)^2} \quad \cdots (5)$$

なお(5)式中の k は分割面数を、 $m(i)$ は任意な分割面内に存在する虚像点をそれぞれ示している。ここで(4)式から、比率 p の値が 100 となる場合は、すべての分割面内に虚像点が存在することを示す。また(5)式から、標準偏差 σ が大きいとすると分割面内に存在する虚像点の数が多く、1つの分割面内に集中して存在し、虚像点と虚像点の間隔が狭いことを示す。

4. 結果および検討

シミュレーションにより想定した計測装置は点光源を配置する半球面の半径 R を 1 とした。このとき、鏡面物体の光源の間隔等はすべて R を 1 としたときの相対値とした。なお、光源の間隔は配置 A においては $d=0.09 \sim 0.25$ の範囲で変化させた。配置 B においては $d=0.06 \sim 0.2$ の範囲で変化させた。配置 C においては $\alpha=15^\circ$ 一定として $\beta=4 \sim 10^\circ$ の範囲で変化させた。配置 D においては $d=0.1$ 一定として $\alpha=0.0349 \sim 0.1571$ の範囲で変化させた。また、図 5 に想定した物体を示す。想定した物体は底面の幅 l が 0.2、曲率半径 r_c が 0.149、高さ h が 0.0385 となる半球状の物体とした。さらに、(4)、(5)式において $k=101$ とした。

図 6 は想定した鏡面物体において、配置した光源数に対する比率 p を示した図である。図において、プロット $\circ$ 、 $\triangle$ 、 $\bullet$ 、 $\blacktriangle$ はそれぞれ光源の配置を配置 A、配置 B、配置 C、配置 D とした結果である。図より、配置 A は他の配置と比較して比率の大きくなることわかる。よって、配置 A は他の配置と比較して鏡面物体全体に虚像を生じさせることが可能であり、本計測法により適していると考えられる。

図 7 は光源数に対する標準偏差 σ を示した図である。図中のプロットは前述と同様である。図より、配置 A は他の配置と比較して標準偏差の小さくなることわかる。よって、配置 A では虚像点を鏡面物体により均等に生じさせることが可能となると考えられる。

以上の結果から、本計測法の光源配置としては配置 A が適していると考えられる。

5. まとめ

本報告では半球状の鏡面物体を想定し、シミュレーションにより光源の配置方法および、形状計測結果について検討を行った。その結果、光源の配置方法は光源を半球面に沿って等間隔に配置する配置 A がより適していることを明らかにした。今後は、本計測法の実験的検討を行う予定である。

参考文献

- (1) 荒井、池本、磯村：「鏡面物体の形状計測に関する基礎研究」，日本大学生産工学部第 27 回学術講演会 2-A-4, 13-16, (1994)
- (2) 池本、磯村：「鏡面物体の形状計測に関する研究」，平成 7 年度照明学会全国大会, 175, 292-293, (1995)

図4 鏡面物体上の虚像点と分割面

図5 想定した物体

図6 光源数に対する比率

図7 光源数に対する標準偏差