

光沢を有する曲面物体の反射特性の推定に関する研究 —鏡面反射率の計測について—

日大生産工（院） ○若島 陽介
日大生産工 内田 暁・大谷 義彦

1.はじめに

近年、加工や組立てなどの産業分野では、工業部品表面の仕上がり具合や欠陥の有無などを検査する工程において、基本的に全数検査が義務づけられ、品質の維持・管理が徹底して行われている。しかしながら、物体の表面性状を表す 1 つの指標である反射率の測定法は多くの場合、平面物体に限られている。

したがって、3 次元形状を有する物体をはじめとして、その最終的な検査工程はいまだ人間の目視に頼っている場合が多い。

そこで本研究では、画像認識技術を用いた光沢を有する曲面物体の反射特性の推定法の確立を目的としている。

先に筆者らは双方向反射率関数¹⁾を用い、光沢を有する曲面物体からの反射光のうち鏡面反射光成分を除去し、照度差ステレオ法²⁾による曲面物体の拡散反射率の測定法³⁾を提案した。

また、Cook-Torrance⁴⁾のモデルを用いて鏡面反射光成分をモデル化し、物体表面の輝度分布と鏡面反射率との関係から、光沢を有する曲面物体の鏡面反射率の推定法⁵⁾を提案した。

しかしながら、Cook-Torrance のモデルは曲面物体の鏡面反射率 ρ_s が高い場合に、その鏡面反射光成分による輝度分布を表現できない⁶⁾。そのため、曲面物体表面に光源の虚像が生じてしまうような高光沢を有する曲面物体の場合では、先に提案した鏡面反射率推定法の適用が困難となる。

そこで筆者らは、鏡面反射率 ρ_s と鏡面反射光成分による輝度との関係、ならびに曲面物体の曲率半径と鏡面反射光成分による輝度との関係より、鏡面反射率 ρ_s が高い場合の曲面物体の鏡面反射率推定法を提案した⁷⁾。

本報告では、提案する鏡面反射率 ρ_s が高い場合の曲面物体の鏡面反射率推定法を任意な形状の曲面物体にも適用するため、半球状物体の場合の曲率半径と鏡面反射光成分による輝度との関係について実験的検証を行ったのでその結果を報告する。

2. 鏡面反射光成分による輝度と鏡面反射率との関係

物体表面の反射特性は、拡散反射光成分と鏡面反射光成分とに分けることができる。本章では、光沢を有する曲面物体について、その鏡面反射率 ρ_s と鏡面反射光成分による輝度 L_s との関係について述べる。

図 1 は、光源、視点と光沢を有する曲面物体の幾何学的関係を示したものである。図 1 に示すように、

光源から曲面物体に光を照射した場合を想定する。

なお、図 1 の $\vec{L}$ は物体表面上の任意の点 P から光源へ向かうベクトルを示している。 $\vec{N}$ は、点 P の法線ベクトルを示している。また、 $\vec{R}$ は、点 P への入射光に対する鏡面反射方向のベクトルを示す。

$\vec{N}$ 点 P の法線ベクトル

$\vec{L}$ 点 P から光源へ向かうベクトル

$\vec{R}$ 鏡面反射方向のベクトル

θ 光の入射角
($\vec{N}, \vec{L}, \vec{R}$ は単位ベクトル)

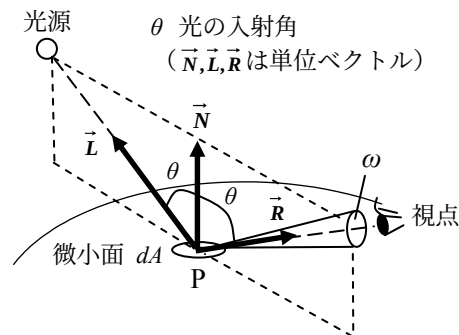


図 1 光源、視点と曲面物体との幾何学的関係

鏡面反射方向のベクトル $\vec{R}$ は図 1 に示すように、ベクトル $\vec{L}$ 、 $\vec{N}$ と同一平面上に存在し、光の入射角と等しい反射角を有する。

したがって、鏡面反射方向のベクトル $\vec{R}$ は、点 P から光源へ向かうベクトル $\vec{L}$ および法線ベクトル $\vec{N}$ が既知ならば、

$$\vec{R} = -\vec{L} + 2\vec{N}(\vec{N} \cdot \vec{L}) \quad \dots (1)$$

として、求めることができる。

このとき、鏡面反射率 ρ_s は、

$$\rho_s = \frac{\Phi_s}{\Phi_i} \quad \dots (2)$$

となる。なお、 Φ_i は物体表面上の点 P を含む微小面 dA への入射光束量、 Φ_s は微小面 dA から鏡面反射方向への反射光束量である。

また、鏡面反射光成分による反射光度 I_s は、微小面積を有する視点が鏡面反射方向に存在するとき、単位立体角あたりの反射光束量として、

$$I_s = \frac{\Phi_s}{\omega} \quad \dots (3)$$

となる。なお、 ω は点 P が視点へ張る立体角である。

したがって、鏡面反射光成分による反射輝度 L_s は、単位面積あたりの反射光度として(3)式を用いて、

Study on the Estimation Method for the Reflection Characteristic of Glossy Curved Objects
-Specular Reflectance Measurement-

Yosuke WAKASHIMA, Akira UCHIDA and Yoshihiko OHTANI

$$L_s = \frac{I_s}{dA \cos \theta} = \frac{\Phi_s}{\omega dA \cos \theta} \quad \dots (4)$$

となる。

また、(2)式より(4)式は、

$$L_s = \rho_s \frac{\Phi_i}{\omega dA \cos \theta} \quad \dots (5)$$

となり、鏡面反射光成分による反射輝度 L_s は鏡面反射率 ρ_s に比例する値となる。

このことから、曲面物体での鏡面反射率 ρ_s は、鏡面反射光成分による反射輝度 L_s を求めることにより推定が可能であると考えられる。

3. 実験装置および実験方法

図2は実験に用いた装置の概略である。実験装置は反射特性を測定する物体に光を照射するための光源と、照射された物体表面の輝度分布を測定するための CCD カメラから構成されている。

測定物体は直交座標系 xyz における黒色に塗料した参照面($z=0$)上の中心に置くものとする。光源は直交座標系 xyz の原点 O から距離 r が 1000mm、天頂角 θ_i が 30° 、方位角 ϕ_i が 60° (光源 i)、 180° (光源 j)、 300° (光源 k)となるように配置した。

また、物体表面の輝度を測定するための CCD カメラは、直交座標系 xyz の原点 O より高さ h が 500mm のところに設置し、縦 1024 画素、横 1280 画素の 1024 輝度階調のものを使用した。なお、測定時は焦点距離 28mm、絞り 4.0 のレンズ、光源は定格 6.0V、5.0A の電球を用いた。

なお、CCD カメラで撮影される濃淡画像中の輝度階調値 K と輝度 L は、比例関係が確認されている。

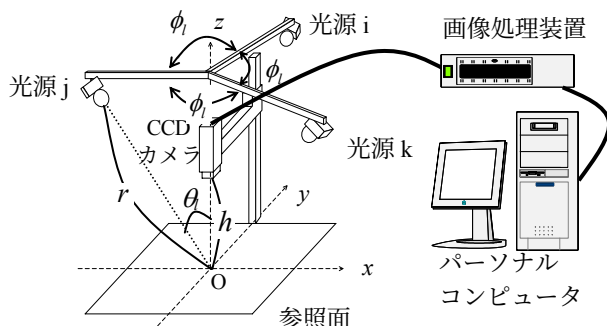


図2 実験装置

図3は、測定に使用した曲面物体の形状と寸法である。曲面物体は曲率半径の異なる4種類の半球状物体を石膏で生成し、その表面に光沢を持たせるためにポリ塩化ビニリデン製ラップを貼付した。

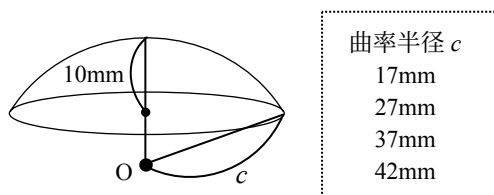


図3 曲面物体の寸法

なお、曲面物体の反射特性は、すべて同様のポリ塩化ビニリデン製ラップを貼付しているため、曲率

半径によらず鏡面反射率 ρ_s 、拡散反射率 ρ_d ともに一定であると考えられる。

4. 結果と検討

図4は、曲面物体と同様の反射特性を有する平面板を作成しその反射配光を測定した結果である。図4より、物体表面の反射特性には鏡面反射光成分が含まれていることが確認できる。

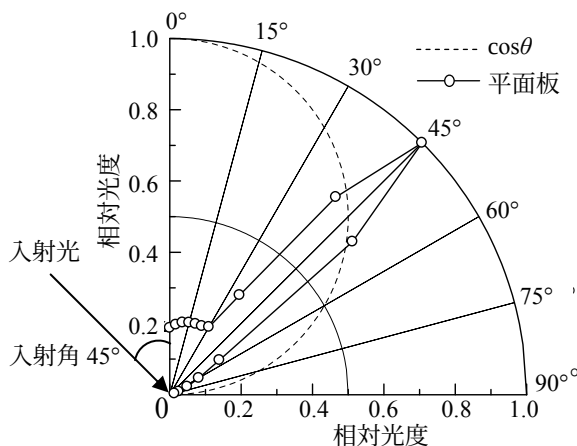


図4 反射配光曲線

4.1 最大輝度階調値 $K_{\max}$ の測定結果

図5は、曲面物体の曲率半径に対する最大輝度階調値 $K_{\max}$ の値を測定した結果である。

最大輝度階調値 $K_{\max}$ は、曲面物体表面の鏡面反射光成分により濃淡画像中の最大輝度階調値 $K_{\max}$ が飽和(1023輝度階調を超える)してしまうため、減光フィルタの減光率を512倍として測定した。

なお、図5の曲率半径が ∞ (無限大)は平面物体である。

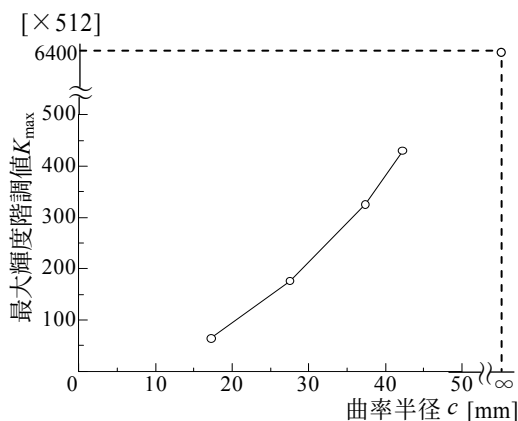


図5 曲率半径に対する最大輝度階調値 $K_{\max}$

図5より、曲面物体では曲率半径が大きいほど、すなわち平面(曲率半径 ∞)となるにしたがって最大輝度階調値 $K_{\max}$ が高くなっていることがわかる。

このことから、最大輝度階調値 $K_{\max}$ は、鏡面反射率 ρ_s が一定である場合でも、曲面物体の曲率半径によって変化することがわかる。

曲面物体の曲率半径による最大輝度階調値 $K_{\max}$ の変化は、以下に述べる要因によるものと考えられる。

図6は、想定した計測環境での、光源、視点、鏡面反射光との幾何学的関係の $x-z$ 断面を表したものである。

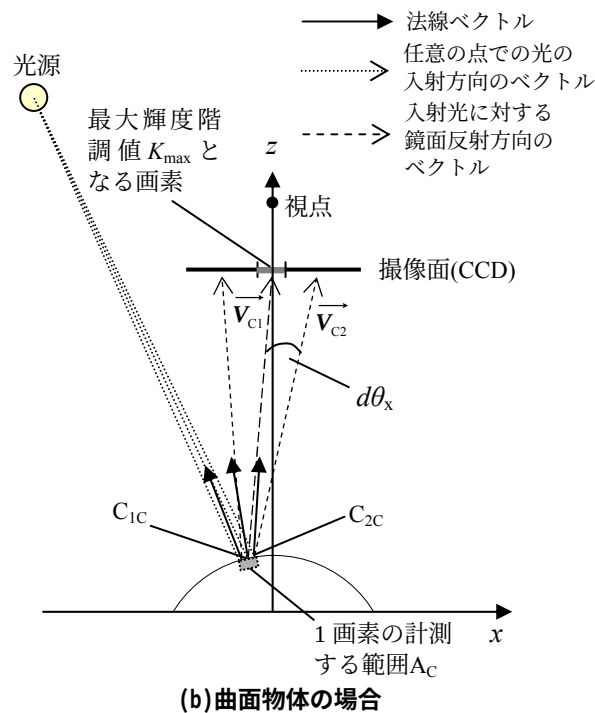
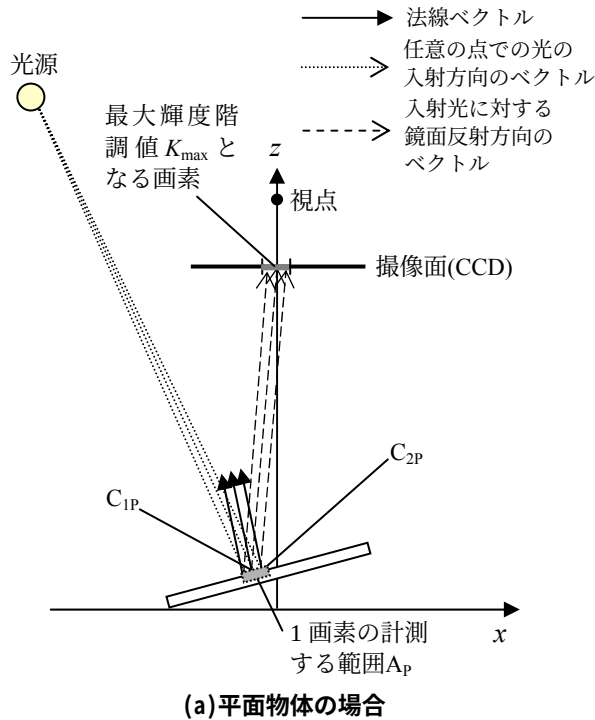


図 6 光源、視点と鏡面反射光との幾何学的関係 ($x-z$ 断面)

図 6(a)は、平面物体の場合の光源、視点、鏡面反射光との幾何学的関係を示したものである。

平面物体の鏡面反射光は、図 6(a)の撮像面(CCD)の 1 画素に入射し、最大輝度階調値 K_{max} として計測される。最大輝度階調値 K_{max} を計測する画素は、平面物体上の面積 A_p からの反射輝度を計測している。この A_p を最大輝度階調値 K_{max} を計測する画素の計測範囲と呼称する。

なお、図 6(a)の C_{1P} は、計測範囲 A_p の中心、すな

わち鏡面反射点を示している。 C_{2P} は、計測範囲 A_p の x 軸方向の端点を示している。

図 6(b)は、曲面物体の場合の光源、視点、鏡面反射光との幾何学的関係の $x-z$ 断面を示したものである。

なお、図 6(b)の A_c は平面物体の場合と同様に、最大輝度階調値 K_{max} を計測する画素の計測範囲を示している。 C_{1C} は、計測範囲 A_c の中心、すなわち鏡面反射点を示している。 C_{2C} は、計測範囲 A_c の x 軸方向の端点を示している。また、角度 $d\theta_x$ は C_{1C} における鏡面反射方向へのベクトル $\vec{r}_{C1}$ と、 C_{2C} における鏡面反射方向へのベクトル $\vec{r}_{C2}$ の x 方向のなす角度を示している。

図 6(a)より、平面物体の場合では、 A_p への入射光に対する鏡面反射方向のベクトルは、すべて最大輝度階調値 K_{max} となる 1 画素へと向かっていることがわかる。

図 6(b)より、曲面物体の場合では、 A_c への入射光に対する C_{2C} での鏡面反射方向のベクトルが最大輝度階調値 K_{max} となる 1 画素から大きく外れていることがわかる。

なお、鏡面反射方向のベクトルが最大輝度階調値 K_{max} となる 1 画素から大きく外れることは、光源、視点、鏡面反射光との幾何学的関係が $y-z$ 断面の場合も同様であると考えられる。

また、図 7 は、曲面物体の曲率半径に対する角度 $d\theta_x$ 、 $d\theta_y$ の値を求めた結果である。図中のプロット $\circ$ は、 x 方向のなす角度 $d\theta_x$ 、プロット $\triangle$ は、 y 方向のなす角度 $d\theta_y$ である。図 7 より、角度は曲率半径が小さくなるほど大きくなっていることがわかる。

このことから、視点で撮影される濃淡画像中の最大輝度階調値 K_{max} は、角度が大きくなるほど、すなわち曲面物体の曲率半径が小さくなるほど、視点へ向かう鏡面反射光が減少するために低下するものと考えられる。

したがって、鏡面反射率 ρ_s の推定は、(5)式から曲率半径に対する濃淡画像中の最大輝度階調値 K_{max} が一定となるように補正することで可能となる。

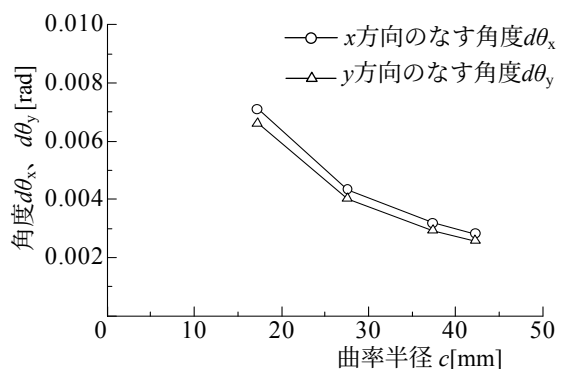


図 7 曲率半径に対する角度 $d\theta_x$ 、 $d\theta_y$

4.2 最大輝度階調値 K_{max} の補正法の提案

本節では、曲率半径による最大輝度階調値 K_{max} の変化の補正法について述べる。

図 8 は図 6(b)に示した、光源、視点と曲面物体での鏡面反射光との幾何学的関係を直交座標系 xyz の 3 次元で表したものである。

なお、図 8 の R は、鏡面反射点 C_{1C} から視点までの距離、 l は計測範囲 A_c の y 軸方向の端点による鏡面反射

ベクトルの差である。

また、 dS は A_C の鏡面反射ベクトルが視点方向へ張る面積、 ω はその立体角である。

このとき、面積 dS は、

$$dS = 2Rd\theta_x d\theta_y \quad \dots (6)$$
 となる。

また、立体角 ω は、

$$\omega = \frac{dS}{R^2} \quad \dots (7)$$

で求められる。

したがって、(6)式および(7)式より立体角 ω は、

$$\omega = \frac{2lR}{R^2} d\theta_x d\theta_y \quad \dots (8)$$

となる。

ここで、鏡面反射点 C_{1C} から視点までの距離 R 、および l は、曲率半径に対してほぼ一定であると考えられる。

したがって、立体角 ω は、(8)式より角度 $d\theta_x$ 、 $d\theta_y$ に比例する値となる。

さらに、立体角 ω への反射光束量は、鏡面反射率 ρ_s が曲率半径に対して変化しないことから、一定となる。このことから、単位立体角あたりの反射光束量、すなわち反射光度 I_s は、(3)式および(8)式より、

$$I_s = \frac{\Phi_s R^2}{2lR} \frac{1}{d\theta_x d\theta_y} \quad \dots (9)$$

となり反射光度 I_s は $d\theta_x$ 、 $d\theta_y$ の逆数に比例することになる。なお、 Φ_s は立体角 ω への反射光束量である。

したがって、鏡面反射光成分による輝度 L_s は、(4)式および(9)式から、角度 $d\theta_x$ 、 $d\theta_y$ の逆数に比例するものと考えられる。

このことから、曲率半径による最大輝度階調値 K_{max} の変化分は、最大輝度階調値 K_{max} に角度 $d\theta_x$ 、 $d\theta_y$ を掛けることにより、補正が可能となる。

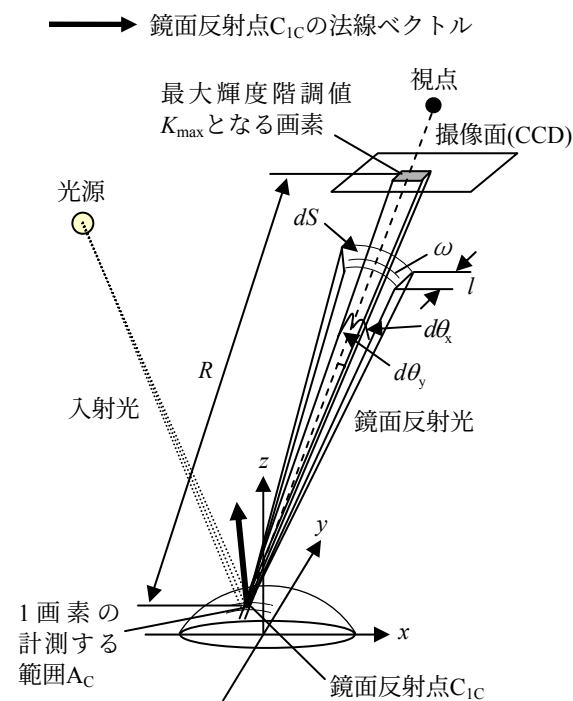


図8 光源、視点と曲面物体での鏡面反射光との幾何学的関係

4.3 最大輝度階調値 K_{max} の補正結果

図9は、曲率半径に対する最大輝度階調値 K_{max} を補正した結果である。

なお、ここでの角度 $d\theta_x$ 、 $d\theta_y$ は図8で求めた範囲(曲率半径17mmから42mm)の、最大値で正規化した値である。

図9より、補正後の最大輝度階調値 K_{max}' は、補正前の最大輝度階調値 K_{max} (図5)に比べ、曲率半径に対し、ほぼ一定の値となっていることがわかる。

このことから、曲面物体での鏡面反射光成分による輝度 L_s を曲率半径に依存せず求められることが明らかとなった。

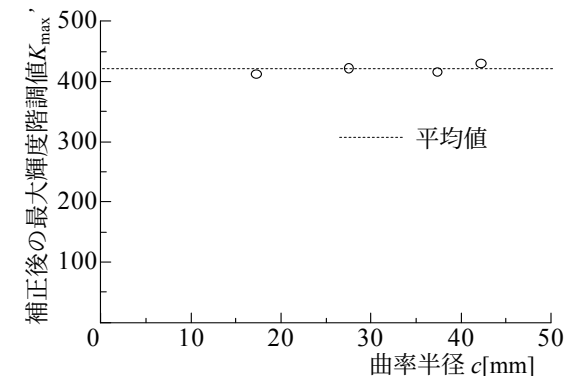


図9 曲率半径に対する補正後の最大輝度階調値 K_{max}'

5. おわりに

本報告では、提案する鏡面反射率 ρ_s が高い場合の曲面物体の鏡面反射率推定法を任意な形状の曲面物体の場合にも適用するため、曲面物体の曲率半径と鏡面反射光成分による輝度との関係を実験により検討を行った。

その結果、半球状物体の場合についても曲率半径と鏡面反射光成分による輝度との関係から曲率半径による鏡面反射光成分の輝度の変化が補正可能であることを明らかにした。

今後は、得られた鏡面反射率 ρ_s と鏡面反射光成分による輝度 L_s との関係から、半球状物体における鏡面反射率 ρ_s の推定を試みる予定である。

参考文献

- (1) Lighting Handbook, IESNA, p389(1993)
- (2) Woodham, R.J. : Photometric method for determining surface orientation from multiple images, Opt. Eng. Vol.19, No.1, pp.139-144(1980)
- (3) 永野, 池本, 磯村 : 光沢を有する曲面物体の拡散反射率の測定, 照明学会全国大会講演論文集, No.168, pp.286-287 (2002)
- (4) Cook, Robert L. and Torrance, K.E. : A reflectance model for computer graphics, ACM trans on graphics, Vol.1, pp.7-24 (1982)
- (5) 山田, 池本, 磯村 : 光沢を有する曲面物体の鏡面反射率の推定, 照明学会全国大会講演論文集, No.151, pp.213-214 (2003)
- (6) Nayar, K., Ikeuchi, K. and Kanade, T. : Surface reflection : Physical and geometrical perspectives, IEEE trans. pattern anal. machine intell, vol.13, NO.7(1991)
- (7) 若島, 池本 : 光沢を有する曲面物体の反射特性の推定に関する研究—鏡面反射特性について—, 電気学会全国大会講演論文集, pp.152-153 (2006)