

光沢を有する曲面物体の形状と反射特性の推定に関する研究

—形状と拡散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 池本 直隆・山崎 憲

1. はじめに

近年、加工や組立てなどの産業分野では、機械が人間と同等の仕事をするために、機械に視覚を与えるマシンビジョンの研究が重要な課題となっており、画像認識による非接触計測の利用が期待されている。

非接触による 3 次元形状計測法の 1 つである照度差ステレオ法¹⁾は、カメラで同一シーンを光源の方向のみ変化させて撮影した 3 枚の画像から物体表面の法線ベクトルを定める手法である。この方法は、視差が存在しないこと、煩雑な計算を必要としないという利点がある。

本研究は、照度差ステレオ法を用いた光沢を有する曲面物体の 3 次元形状計測及び反射特性の推定法の確立を目的とする。

しかしながら、照度差ステレオ法は物体表面の反射特性が拡散反射光成分のみの物体を想定している。

したがって、物体表面の反射特性に鏡面反射光成分を含む場合や反射特性が未知な場合は、物体を撮影した濃淡画像中に鏡面反射光成分による輝度を含む領域、すなわちハイライトが生じ、表面の法線ベクトルが得られず形状計測結果に誤差が生じる²⁾。

先に我々は、物体を CCD カメラで撮影した濃淡画像中のハイライトの補正法を提案した³⁾。

また、提案したハイライトの補正法により、物体の反射特性が未知である曲面物体の 3 次元形状計測を、均等拡散面である物体と同様に照度差ステレオ法に必要な 3 枚の濃淡画像から計測可能であることを報告した⁴⁾。

照度差ステレオ法には、もう一つ、物体と視点である CCD カメラの間の絶対的な距離を計測できないという欠点がある。

物体と視点である CCD カメラの間の絶対的な距離は、物体の 3 次元形状情報として非常に重要であり、さらに、物体表面の反射特性である拡散反射率、鏡面反射率、光沢の推定に欠かせないものである。

そこで、本報告では、物体と視点である CCD カメラの間の絶対的な距離を考慮し、物体の形状と反射特性の一つである拡散反射率を計測する方法を提案する。さらに、提案した方法の実験的検証を行ったのでその結果を述べる。

2. 照度差ステレオ法

図 1 は、照度差ステレオ法による被測定物体の形状計測の概略を示す。

図に示すように、直交座標系 xyz の xy 平面に被測定物体を置き、光源から光を照射した場合を想定する。

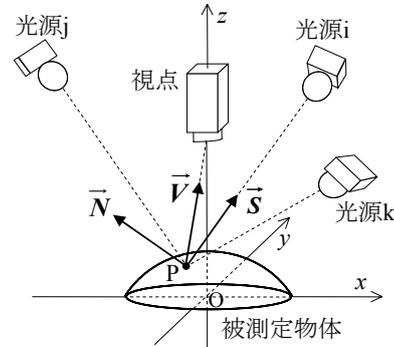


図 1 視点、光源と被測定物体の位置関係

また、光源は点光源、被測定物体の表面は均等拡散面であるとする。このとき、被測定物体表面の任意の点 P における輝度 L は、

$$L = \frac{I}{r_p^2 \pi} \rho_d \cdot (\vec{N} \cdot \vec{S}) \quad \dots (1)$$

と表せる。ただし、

\vec{N} : 点 P における物体表面の法線ベクトル

\vec{S} : 点 P と光源を結ぶ直線の方向ベクトル

(\vec{N} 、 \vec{S} は単位ベクトル)

$\vec{N} \cdot \vec{S}$: \vec{N} と \vec{S} の内積

r_p : 光源から点 P までの距離

I : 光源の光度

ρ_d : 被測定物体表面の拡散反射率

である。

光源の位置を i, j, k と変えることにより、視点である CCD カメラで観測される点 P の輝度は各々の光源の位置に対応した値 L_i, L_j, L_k となる。したがって、点 P から各々の光源へ向かうベクトルを $\vec{S}_i, \vec{S}_j, \vec{S}_k$ 、点 P と各光源との距離を r_{pi}, r_{pj}, r_{pk} とすると L_i, L_j, L_k は、

$$\left. \begin{aligned} L_i &= \frac{I}{r_{pi}^2 \pi} \rho_d \cdot (\vec{N} \cdot \vec{S}_i) \\ L_j &= \frac{I}{r_{pj}^2 \pi} \rho_d \cdot (\vec{N} \cdot \vec{S}_j) \\ L_k &= \frac{I}{r_{pk}^2 \pi} \rho_d \cdot (\vec{N} \cdot \vec{S}_k) \end{aligned} \right\} \quad \dots (2)$$

となる。(2)式から点 P における被測定物体表面の法線ベクトル \vec{N} を導くことができる。これを被測定物体表面のすべての点について行うことにより被測定

物体表面の法線ベクトルの分布を得ることができる。
 ただし、被測定物体の任意の点Pの3次元座標 (P_x, P_y, P_z) は、視点で観測された濃淡画像から得られる座標 $(P_x, P_y, 0)$ に近似している。したがって、(1)式中の \vec{S} と r_p には、被測定物体の3次元座標の近似による誤差が含まれている。

3. 提案する物体の形状と拡散反射率の計測方法

提案する方法は、照度差ステレオ法に必要な3枚の濃淡画像から、視点であるCCDカメラと被測定物体の間の絶対的な距離を得ることで、被測定物体の形状と拡散反射率を従来法に比較して正確に計測することができる。

視点であるCCDカメラと被測定物体の間の絶対的な距離は、照度差ステレオ法により得られる被測定物体の法線ベクトル分布から、被測定物体の高さに関する情報を相対的に算出することで得られる。被測定物体の形状と拡散反射率は、得られたCCDカメラと被測定物体の間の絶対的な距離、被測定物体の高さ情報を考慮し、再度、照度差ステレオ法を用いることで得られる。

3.1 形状の計測方法

照度差ステレオ法は、視点で撮影した濃淡画像中に鏡面反射光成分により輝度の著しく高くなるハイライトが生じる場合、得られる法線ベクトルに誤差が生じる。したがって、被測定物体の法線ベクトルは、先に提案したハイライトの補正を行い、拡散反射光成分のみによる輝度分布とし、照度差ステレオ法を用いて被測定物体の法線ベクトル分布を得る。

次に、得られた法線ベクトル分布から相対的な高さを算出する⁵⁾。

図2は、被測定物体の任意の点Pの高さを算出する方法の概略を表したものである。

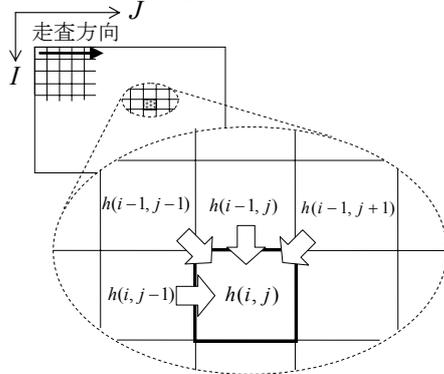


図2 高さの計算方法の概略

図中の i, j は、被測定物体の点Pが視点で観測される濃淡画像の画素を表している。点Pの x, y 座標である P_x, P_y は、この画素の座標である i, j から求められる。

点Pの高さ $h(i, j)$ は、点Pの周囲の点の高さから相対的に求めることができる。ここで、点Pから距離 dx, dy 離れた点P'の高さを h' 、点Pの法線ベクトルを、

$$\vec{N} = (n_x, n_y, n_z) \quad \dots (3)$$

とすると、点Pの高さ $h(i, j)$ は、

$$h(i, j) = h' + p' dx + q' dy \quad \dots (4)$$

で表される。

ただし、

$$p' = -\frac{n_x}{n_z}, \quad q' = -\frac{n_y}{n_z} \quad \dots (5)$$

である。ここで、図2の走査方向に、高さを逐次計算すると点Pの周囲に高さが既知な点が、4画素存在する。そこで、点Pの周囲の4画素から算出される高さを h_1, h_2, h_3, h_4 とすると、

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= h(i-1, j-1) + p(i-1, j-1)dx + q(i-1, j-1)dy \\ h_2 &= h(i-1, j) + q(i-1, j)dy \\ h_3 &= h(i-1, j+1) + p(i-1, j+1)dx + q(i-1, j+1)dy \\ h_4 &= h(i, j-1) + p(i, j-1)dx \end{aligned} \right\} (6)$$

となる。よって、高さ $h(i, j)$ は、

$$h(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^4 h_k}{4} \quad \dots (7)$$

で求めることができる。

したがって、点Pのz座標である P_z は、

$$P_z = h(i, j) \quad \dots (8)$$

となる。ここで、視点となるCCDカメラと被測定物体の任意の点Pの間の絶対的な距離 r_p は、視点となるCCDカメラの3次元座標を (V_x, V_y, V_z) とすると

$$r_p = \sqrt{(V_x - P_x)^2 + (V_y - P_y)^2 + (V_z - P_z)^2} \quad \dots (9)$$

で求めることができる。

この得られた距離 r_p を(1)式に代入し、再度、照度差ステレオ法を用いて法線ベクトル分布を算出することで被測定物体の形状が計測できる。

3.2 拡散反射率の計測方法

図3は、被測定物体表面上の任意の点Pと光源、視点との位置関係を示したものである。

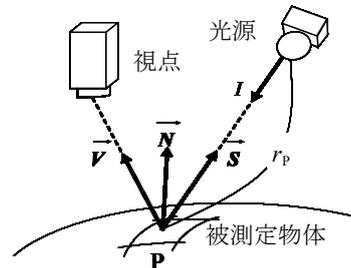


図3 光源、視点と被測定物体表面の幾何学的関係

\vec{V} : 点Pから視点へ向かうベクトル

($\vec{N}, \vec{S}, \vec{V}$ は単位ベクトル)

なお、 $\vec{N}, \vec{S}, \vec{V}$ の算出には、前節3.1で求めたCCDカメラと被測定物体の任意な点Pの間の絶対的な距離 r_p を用いる。

拡散反射率の計測は、反射率の空間的な特性分布を表す双方向反射率関数⁶⁾ $f(\vec{N}, \vec{S}, \vec{V})$ を用いて行う。

双方向反射率関数 $f(\vec{N}, \vec{S}, \vec{V})$ は、ハイライト補正後の濃淡画像から求める。

ハイライト補正後の濃淡画像は、拡散反射光成分のみによる輝度分布であるため、得られた双方向反射率関数と拡散反射率 ρ_d の関係は、

$$f(\vec{N}, \vec{S}, \vec{V}) = \frac{\rho_d}{\pi} \quad \dots (10)$$

となる。

よって、拡散反射率 ρ_d は、

$$\rho_d = f(\vec{N}, \vec{S}, \vec{V}) \cdot \pi \quad \dots (11)$$

として求められる。

4. 実験装置および被測定物体

図4は実験に用いた装置の概略である。

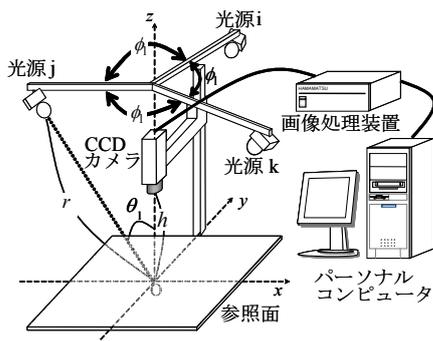


図4 実験装置

実験装置は被測定物体に光を照射するための光源と、照射された被測定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。被測定物体は、直交座標系 xyz における黒色に塗装した参照面に置く。光源 i, j, k 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 120° とし x 軸を基準に、 $60^\circ, 180^\circ, 300^\circ$ となるように配置した。被測定物体表面の輝度を測定するための CCD カメラは、縦 1024 画素、横 1280 画素、1024 輝度階調のものを使用した。また、CCD カメラから参照面までの距離を 500mm とした。なお、測定時は焦点距離 28mm、絞り 2.8 のレンズ、光源は定格 6.0V、5.0A の電球を用いた。

図5は、実験に用いた被測定物体の形状である。

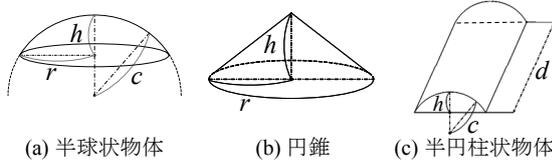


図5 被測定物体の形状

図(a)、(b)、(c)に示すように被測定物体は、半球状物体、円錐、半円柱状物体の3種類とした。

表1は、被測定物体の寸法を示したものである。

表1 被測定物体の寸法

被測定物体	高さ h [mm]	曲率半径 c [mm]	半径 r [mm]	幅 d [mm]
半球状物体	10.0	28.4	21.3	
円錐	7.8		30.0	
半円柱状物体	12.1	42.9		68.0

また、被測定物体は焼石膏で作成し、表面に光沢を生じさせるために、塗料を塗布した。

図6は、曲面物体と同様の反射特性を有する平板を作成し、その反射配光を測定した結果である。

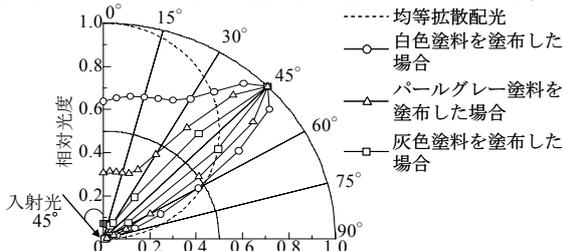


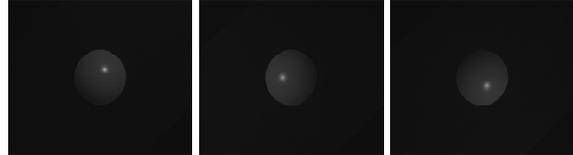
図6 反射配光

図中のプロット $\circ, \triangle, \square$ はそれぞれ白色、パールグレー、灰色の塗料を塗布した場合である。いずれの被測定物体も、光の入射角度にほぼ同様な角度

に反射光の指向性が強いことがわかる。図より、灰色塗料を塗布した場合が最も指向性が強く、拡散反射光成分に対する鏡面反射光成分の割合が大きいことがわかる。また、それぞれの平板表面を村上色彩技術研究所の携帯型反射率計 CM-53D により測定したところ 0.872、0.484、0.190 であった。

5. 結果および検討

図7は、実験装置を用いて各光源から光を照射した場合、視点で撮影される濃淡画像である。



(a) 光源から光を (b) 光源から光を (c) 光源から光を照射した場合 照射した場合 照射した場合
図7 濃淡画像

なお、被測定物体は半球状物体であり、その表面にパールグレー塗料を塗布した場合である。図(a)、(b)、(c)は、それぞれ光源 i, j, k から光を照射した場合の濃淡画像である。図より、各濃淡画像には、光源に対応して鏡面反射光成分による輝度が著しく高くなるハイライトが生じていることがわかる。

図8は、先に提案したハイライト補正法により、濃淡画像に生じたハイライトを補正した結果である。



(a) 光源から光を (b) 光源から光を (c) 光源から光を照射した場合 照射した場合 照射した場合
図8 ハイライト補正した濃淡画像

図より、輝度の著しく高くなるハイライトが補正されていることがわかる。

図9は、図8の濃淡画像から、照度差ステレオ法により求めた被測定物体の法線ベクトル分布を示したものである。

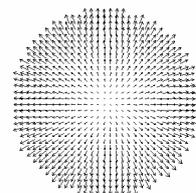
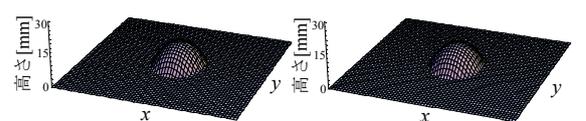


図9 法線ベクトル分布

図より、被測定物体の法線ベクトルに近似した情報が得られていることがわかる。

図10は、被測定物体形状の再構築を行った結果である。

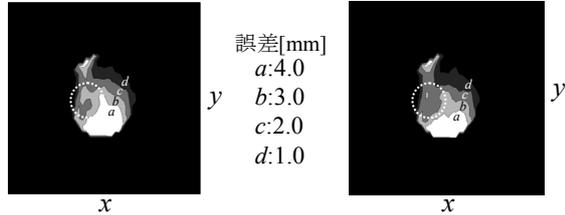


(a) 従来法の場合 (b) 提案した場合
図10 3次元再構築結果

なお再構築は、図9の法線ベクトル分布から被測定物体の相対的な高さを算出した。図(a)は、物体と視点である CCD カメラの間の絶対的な距離を考慮していない従来法の場合、図(b)は、物体と視点である

CCD カメラの間の絶対的な距離を考慮した提案した方法の場合である。図(a)、(b)を比較すると、3次元再構築結果は、どちらも被測定物体の形状とよく近似しており、大きな差が生じていないことがわかる。

図 11 は、得られた被測定物体の再構築結果から高さの誤差を算出し、等誤差分布として表したものである。

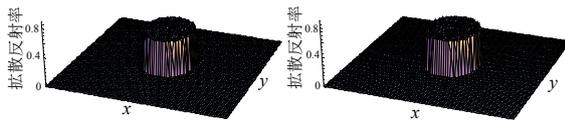


(a) 従来法の場合 (b) 提案した方法の場合

図 11 等誤差分布

図(a)、(b)は前述同様である。図中の点線内において提案した方法は、従来法に比較して誤差が減少していることがわかる。また、再構築結果の平均誤差を求めたところ従来法の場合 0.297mm、提案した方法の場合 0.272mm であった。このことから、提案した方法は、従来法に比較して被測定物体の高さの平均誤差が 8% 減少することがわかった。

図 12 は、被測定物体の拡散反射率分布を求めた結果である。

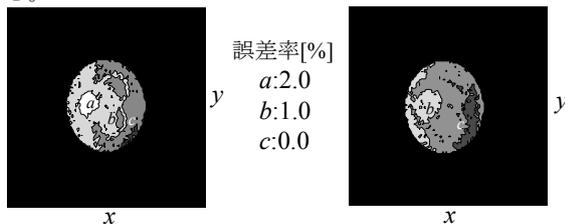


(a) 従来法の場合 (b) 提案した方法の場合

図 12 拡散反射率分布

図(a)、(b)は前述同様である。図(a)、(b)を比較すると、どちらも様な拡散反射率分布となり拡散反射率分布には、大きな差が生じていないことがわかる。

図 13 は、得られた被測定物体の拡散反射率から誤差率を算出し、等誤差率分布として表したものである。



(a) 従来法の場合 (b) 提案した方法の場合

図 13 等誤差率分布

なお、拡散反射率の真値は、被測定物体と同様の反射特性を有する平板表面を村上色彩技術研究所の携帯型反射率計 CM-53D により測定した結果である 0.484 とした。図(a)、(b)は前述同様である。被測定物体表面の全体にわたり提案した方法は、従来法と比較して誤差率が減少することがわかる。

また、拡散反射率分布の平均誤差率を求めたところ従来法の場合 1.426%、提案した方法の場合 0.202% であった。このことから、提案した方法は、従来法に比較して拡散反射率の平均誤差率が約 1/7 減少し、拡散反射率を高精度に計測できることがわかる。

図 14 は、拡散反射率(真値)に対する計測した拡散反射率の平均誤差率を示したものである。

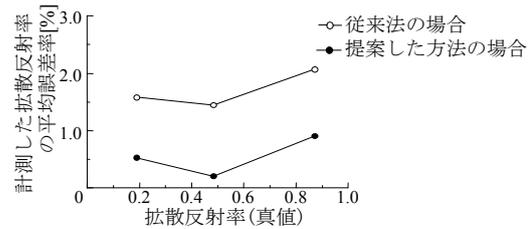
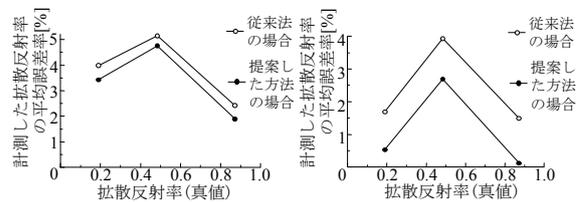


図 14 半球状物体の場合の拡散反射率(真値)に対する計測した拡散反射率の平均誤差率

なお、被測定物体の形状は、半球状物体の場合である。図中のプロット○は、従来法を用いた場合の拡散反射率の平均誤差率、プロット●は、提案した方法を用いた場合の拡散反射率の平均誤差率の結果である。図より、従来法に比較して提案した方法で計測した拡散反射率の平均誤差率は、拡散反射率によらず低いことがわかる。

図 15 は、被測定物体を円錐、半円柱状物体とした場合における拡散反射率(真値)に対する計測した拡散反射率の平均誤差率を示したものである。



(a) 円錐の場合 (b) 半円柱状物体の場合

図 15 拡散反射率(真値)に対する計測した拡散反射率の平均誤差率

図(a)は、被測定物体を円錐とした場合、図(b)は、被測定物体を半円柱状物体とした場合である。図より円錐、半円柱状物体の場合ともに、従来法と比較して提案した方法で計測した拡散反射率の平均誤差率は、拡散反射率によらず低いことがわかる。

6. おわりに

本報告では、物体の形状と拡散反射率を計測する方法を提案し、提案した方法の有用性を実験により検証を行った。

その結果、提案した方法は、従来法に比較して被測定物体の形状と拡散反射率を実験の範囲内において高精度に計測が可能であることを明らかにした。

今後は、提案した方法を鏡面反射光成分の反射特性である鏡面反射率、光沢度の計測法へ適用するための検討を行う予定である。

参考文献

- (1) R.J.Woodham: Photometric method for determining surface orientation from multiple images, Optical Engineering, Vol.19, No.1, pp.139-144(1980)
- (2) 藤皮池本,磯村:照度差ステレオ法による光沢のある物体の3次元形状計測に関する研究—ハイライト抽出の基礎的検討—,平成10年度照学全大160p.260(1998)
- (3) 池本,磯村:物体表面の拡散反射成分による輝度分布の推定と形状計測について—数値実験による検討—,照学誌,86-5,pp.298-307(2002)
- (4) 池本,磯村:物体表面の拡散反射成分による輝度分布の推定と形状計測について—実験による検討—,照明学会誌, Vol.89, No.8A, pp.453-462(2005)
- (5) 新本,本多,金子:テクスチャパターンをもった物体の形状再構成とその評価,信学誌, D- II, Vol. J78-D- II, No.8, pp.1157-1164(1995)
- (6) Lighting Handbook ISENA, p.389