

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：35403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760325

研究課題名(和文)光反射特性に基づく表面テクスチャの機能性推定に関する開発研究

研究課題名(英文)A Study of Estimation of Surface function of an Object Base on its Surface reflectance

研究代表者

大谷 幸三(Ohtani, Kozo)

広島工業大学・情報学部・教授

研究者番号：40351978

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文): 表面改質の分野では、材料表面の機能性を向上させるため、「表面テクスチャ」といわれる幾何学的な微細加工を施すことがよく行われる。ただし、表面テクスチャの幾何形状と表面機能との因果関係は、材質やスケール等の因子もあって必ずしも明確でなく、これらの相関を見出すことには大きな価値がある。そこで本研究では、表面テクスチャの光反射特性から、その機能性を推定する方法の開発に取り組んだ。まず、表面テクスチャの光反射特性を簡便に測定できる魚眼カメラシステムを開発した。そして、表面テクスチャの機能性を推定するための第一段階として、単純な凹凸が繰り返し加工された表面テクスチャの周期性と反射特性との相関を考察した。

研究成果の概要(英文): In surface modification, to improve the functionality of a material surface, fine processing called "surface texture" on the surface of the material is often performed. On the other hand, light reflection from an object depends on the material and micro-structure of the object's surface. We have proposed a simple measurement method for obtaining reflection characteristics using a fisheye camera. In this study, as a first step to estimate the functionality of the surface texture from the surface characteristic, by using a fish-eye camera system, we measure the reflection properties of the surface texture that is processed simple irregularities repeatedly. Then, we consider the correlation between the reflection characteristics and the periodicity of the surface texture.

研究分野：工学

キーワード：表面テクスチャ 表面粗さ 光反射特性 表面機能

1. 研究開始当初の背景

表面改質の分野では、材料表面の機能性を向上させるため、「表面テクスチャ」といわれる幾何学的な微細加工を施すことがよく行われる。この表面テクスチャによって、物体表面の濡れ性や流動抵抗などの表面機能を制御できることがわかっており、潤滑効果の制御やエネルギー輸送効率の向上などに寄与している。表面テクスチャによる表面改質は、既存の機器や設備に対して省資源化と省エネルギー化を促進することができるため、今後その重要性が益々高まることが予想される。

しかし、表面テクスチャの幾何学的形状と表面機能との因果関係は、材質やスケール等の因子もあって必ずしも明確でなく、試行錯誤的に表面テクスチャを作成している実状がある。そこで、これらの相関を見出すことには大きな価値がある。物体表面の幾何学的形状は、一般的に「表面粗さ」として触針等の変位計で得た物体表面の断面曲線の起伏を計測する。したがって、物体表面上を2次元に広がる表面テクスチャを瞬時に定量化することはできない。そこで、非接触かつ高速に、物体表面の幾何学的特徴を定量化する装置が開発できれば、表面テクスチャと表面機能との因果関係を解明する、あるいは所望の表面機能をもつ最適な表面テクスチャを設計する上で、重要な知見を得ることができる。

2. 研究の目的

本研究ではコンピュータグラフィックス(CG)の質感情報等として利用されている反射特性に着目し、これを簡便に測定できる魚眼カメラシステムを開発することを一つの目的とした。反射特性は、物体表面の微視的構造、すなわち表面テクスチャに起因する情報であり、CGだけでなく物体認識や工業用部品の外観検査において有用な情報を与える。次に、表面テクスチャの光反射特性から機能性を推定することを二つ目の目的とした。その第一段階として、単純な凹凸が繰り返し加工された表面テクスチャを作成し、魚眼カメラシステムでその反射特性を測定した。そして、表面テクスチャの周期性と反射特性との相関を考察し、本手法の有用性を検討した。

3. 研究の方法

(1) 魚眼カメラシステムの開発

魚眼カメラシステムは、図1に示すように魚眼カメラ、拡散ドーム(ドーム型の暗室で、内面は拡散反射特性を有する)およびスポット光源から成る。

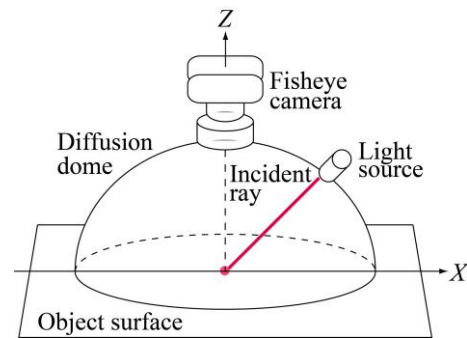


図1：魚眼カメラシステムの構成

魚眼カメラは拡散ドーム頭頂部に取り付けられており、ドーム内面を一度の撮影で取得できる。測定対象を覆うようにシステムを設置し、拡散ドーム側面からスポット光を測定対象に向けて照射する。スポット光は測定対象の表面で反射すると、その反射光の強度分布が拡散ドーム内面に映り込む。この強度分布を魚眼カメラで撮像し反射特性を得る。

魚眼カメラシステムで撮影した2次元画像をもとに、反射光の方向と強度が読み取れる球座標表示へ変換する。図2に魚眼カメラと拡散ドームを組み合わせた場合のユークリッド空間を示す。図は光軸を通る断面(X', Z 座標系)を示しており、光軸と拡散ドームの中心が一致している。拡散ドームの内径を r 、高さを h 、拡散ドーム内壁の点 $P_{X'}$ と X' 軸とのなす仰角を $\alpha_{X'}$ とする。このとき、点 $P_{X'}$ は画像座標系の点 $P_{X'}$ に投影される。この投影平面と点 $P_{X'}$ とのなす俯角を $\phi_{X'}$ とする。魚眼レンズが等距離投影で設計されている場合(レンズ半径 l)、投影中心 O から点 $P_{X'}$ までの画素上の距離 $L_{X'}$ と俯角 $\phi_{X'}$ には、 $DL_{X'} = f(2\pi - \phi_{X'})$ の関係がある。ただし、 D は $\pi f / (2L_a)$ で与えられる定数で、 f は焦点距離である。この関係式から俯角 $\phi_{X'}$ は式(1)で表すことができる。

$$\phi_{X'} = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{L_{X'}}{L_a} \right) \quad (1)$$

一方、レーザの照射点 Q と点 O 、 $P_{X'}$ がなす二等辺三角形より、俯角と仰角の関係には式(2)が成り立つ。

$$\frac{\pi}{2} - \phi_{X'} = \phi_{X'} + \alpha_{X'} \quad (2)$$

したがって、仰角 $\alpha_{X'}$ は投影平面上の座標を用いて式(3)で表すことができる。

$$\alpha_{X'} = \pi \left(\frac{L_{X'}}{L_a} - \frac{1}{2} \right) \quad (3)$$

次に、図3に示すように、投影平面を xy 座標系で考える。このとき、図2における $L_{X'}$ 、 $P_{X'}$ が、図3における L_{xy} 、 P_{xy} にそれぞれ相当する。したがって、図4に示す球座標系における仰角 α_{xy} は式(4)のように表すことができ、その分解能は L_a に対する L_{xy} の比で決定される。

$$\alpha_{x'} = \alpha_{xy} = \pi \left(\frac{L_{xy}}{L_a} - \frac{1}{2} \right) \quad (4)$$

点 P_{xy} と x 軸とのなす方位角を $\rho_{xy} = \tan^{-1}(y/x)$ とすると、図4における点 P_{XYZ} の XYZ 座標は式(5)で表される。

$$\begin{aligned} X &= I_{xy} r \cos \alpha_{xy} \cos \rho_{xy} \\ Y &= I_{xy} r \cos \alpha_{xy} \sin \rho_{xy} \\ Z &= I_{xy} r \sin \alpha_{xy} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 I_{xy} は点 P_{xy} における輝度値であり、反射光強度の大きさを照射点からの距離で表すことになる。なお、方位角 ρ_{xy} の分解能は魚眼画像における点 P_{xy} の画素座標の比 (y/x) で決定される。

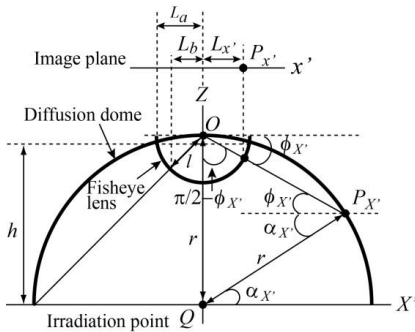


図2：カメラシステムのユークリッド空間

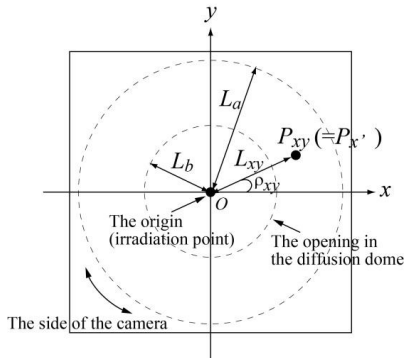


図3：カメラシステムの投影画像

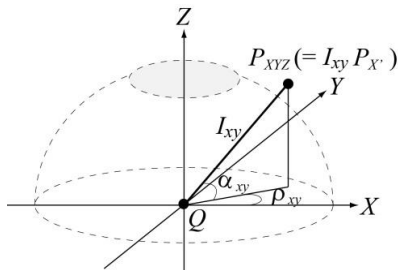


図4：カメラシステムの球座標

(2) 表面テクスチャの周期性と反射特性との相関解析

表面テクスチャの周期性と反射特性との相関を考察するため、図5に示す30種類の試験片の反射特性を図6に示す魚眼カメラシステムで取得した。試験片は、アルミ板の表面30mm四方に直径0.1mmの円形穴をドリル

加工してある。穴のピッチは0.6mm~3.0mmまでの10種類で、穴の深さは0.2mm, 0.4mm, 0.6mmの3種類ある。以降、試験片番号を“穴ピッチ-穴深さ”で表す。円形穴の場合、スポット光の照射方向を設定する際の自由度が高い。そこで、実験では一方向のみからスポット光を照射して得た反射特性を用いた。一方、魚眼カメラシステムの視野角は185度、レンズ径は55mm、解像度は1000 x 750である。拡散ドームには、市販のLEDドーム照明のドーム部分を用いた。その開口径は200mm、高さは90mmである。光源はハロゲンである。

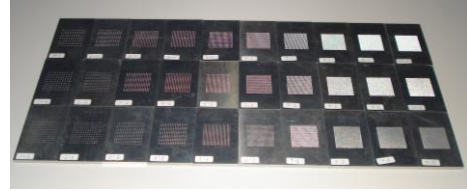


図5：作成した30種類の試験片

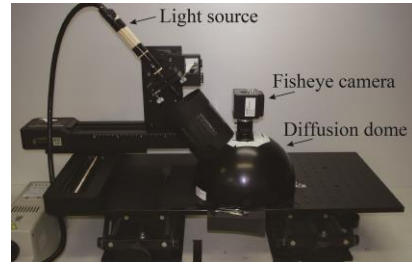


図6：カメラシステムの外観

魚眼カメラシステムで取得する反射特性は、図7示すように拡散ドームの領域を16等分し、各領域の総輝度を特徴量として用いた。図中には領域番号を示している。実験では、スポット光を領域1から入射したため、正反射(鏡面反射)方向は領域9となる。参考として、試験片1.0-0.4を魚眼カメラシステムで取得した際の魚眼画像、反射特性画像および特徴量を図8(a)~(c)にそれぞれ示す。図8(a)上部の輝点が入射スポット光、中央部が測定対象上の照射位置、下部が反射光強度分布を表している。これらに対応して図8(b)の反射特性画像では、各輝点の位置と強度が球座標に変換されている。図8(c)は、各領域の輝度総和をグラフ化したものである。正反射方向である領域9の輝度がもっとも大きく、周辺にいくほど小さくなっていることがわかる。

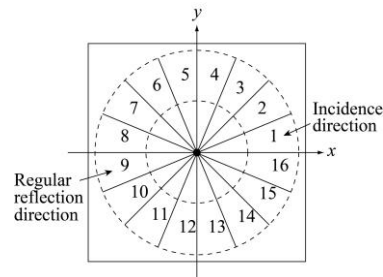
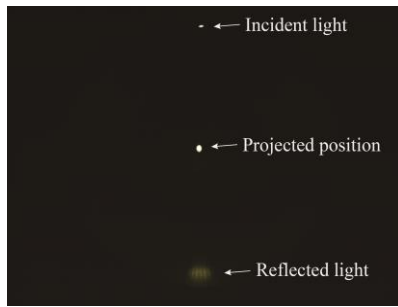
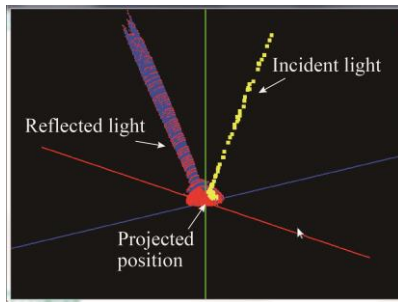


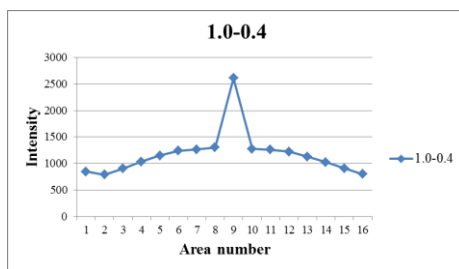
図7：光反射特性の特徴量抽出法



(a) 魚眼画像



(b) 反射特性



(c) 特徴量

図 8：試作システムで観測した反射特性

4. 研究成果

(1) 照射領域サイズと反射特性との相関

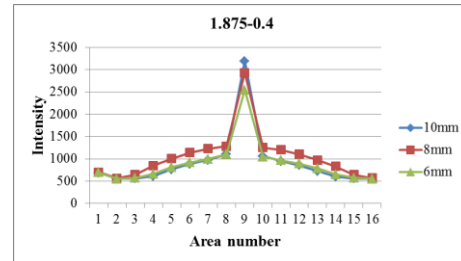
照射領域のサイズが変化した場合に、周期性もった表面形状の反射特性がどのような様相を示すかを考察した。実験では、同じ試験片に対して、スポット光の径を 6, 8, 10mm の 3 種類に変えて反射特性を取得した。

図 9 に試験片 1.875-0.4 と 0.75-0.6 の反射特性を示す。いずれの試験片でも照射領域が大きくなるにしたがって、正反射方向である領域 9 の輝度値が大きくなった。これは、照射領域においてドリル加工されていない平面部分の面積の大きさと相関があるものと考えられる。一方、他の領域では、多少のばらつきはあるものの、照射領域の大きさが異なっても輝度値に大きな変化はみられなかった。

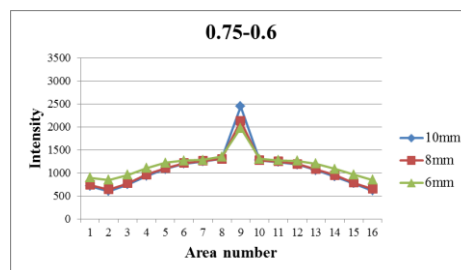
(2) 加工ピッチと反射特性との相関

加工ピッチの変化に対する反射特性の様相を考察した。図 10 は穴深さが同じ試験片ごとに、正反射方向である領域 9 の輝度総和を示している。図の横軸は、入射スポット光の径 (6, 8, 10mm) に対する穴領域の比を表している。照射領域に対する穴領域が占める

割合と、正反射方向の輝度値には負の相関があることがわかる。ただし、この相関は穴領域が 10%以上のときにみられ、それより小さい場合には確認できない。穴領域が 5%未満の場合は平面部分が支配的であり、基材そのものの研磨痕等の特性が優位に現れているものとする。

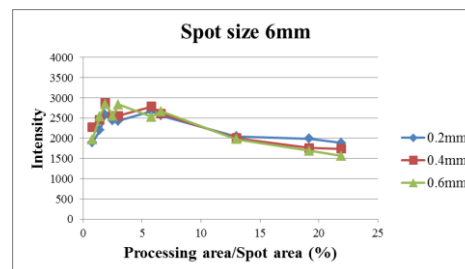


(a) 試験片 1.875-0.4

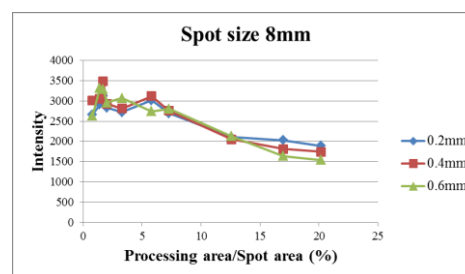


(b) 試験片 0.75-0.6

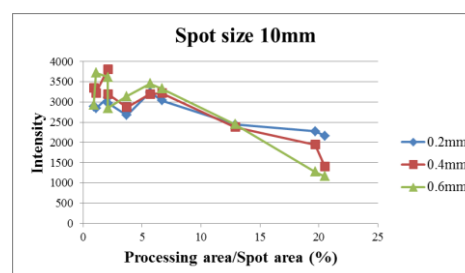
図 9：測定した反射特性



(a) スポット径 6mm



(b) スポット径 8mm

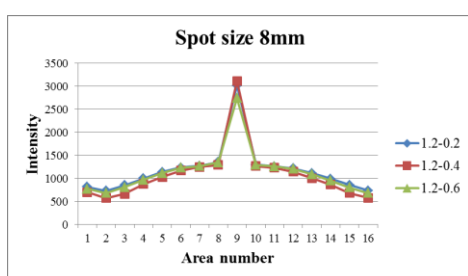


(c) スポット径 10mm

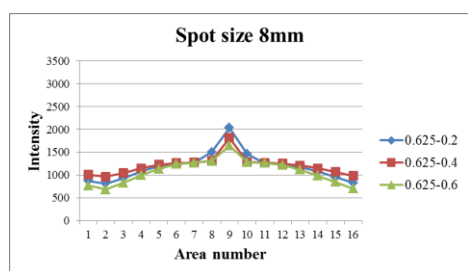
図 10：スポット径が異なる場合の反射特性

(3) 加工深さと反射特性との相関

加工深さの変化に対する反射特性の様相を考察した。図 11 に、試験片 1.2-0.2~0.6 および 0.625-0.2~0.6 の反射特性を示す。スポット光の径は 8mm である。図に示すように穴深さが深いほど鏡面成分が小さく、拡散成分が大きくなる傾向がみられた。ドリル加工した穴の底部は図 12 に示すように平坦な形状をしている。穴深さが比較的浅い場合は底部から正反射方向へ反射する鏡面成分がみられるものの、深くなるに従って穴の内部で反射光が多重反射し、正反射方向以外へ拡散したものと考える。したがって、表面テクスチャの深さ方向の形状にも依存するが、深くなるにつれて鏡面成分から拡散成分に移行するものとする。



(a) 試験片 1.2-0.2~0.6



(b) 試験片 0.625-0.2~0.6

図 11: 加工深さが変化した場合の反射特性

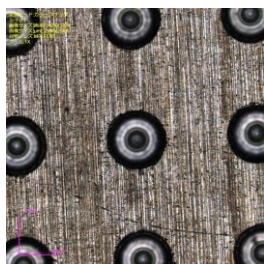


図 12: 加工部分の拡大写真

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- (1) 大谷幸三, 馬場充, “鏡面反射特性を有する物体に対応した逆光線追跡による 3 次元形状計測法,” 精密工学会誌, 査読有, vol. 78, no. 10, pp. 880-886, 2012. 10
- (2) 大谷幸三, 馬場充, “魚眼カメラを用いた光反射特性の簡易測定法,” 電気学会論文

誌 C, 査読有, vol. 134, no. 7, pp. 964-970, 2014. 7

〔学会発表〕(計 13 件)

- (1) K. Ohtani, L. Li and M. Baba, “Light Scattering Simulation of Various Translucent Objects,” SICE Annual Conference 2014, pp. 1585-1589, Hokkaido, Japan, Sep., 2014.
- (2) K. Ohtani and M. Baba, “Simple Measurement Method for a Surface Reflection Using a Fisheye Camera,” SICE Annual Conference 2013, pp. 1831-1835, Nagoya, Japan, Sep., 2013.
- (3) K. Ohtani, L. Li and M. Baba, “Laser rangefinder calibration based on genetic algorithm,” SICE Annual Conference 2012, WeA05-01, pp. 1234-1237, Akita, Japan, Aug., 2012
- (4) 四方聡, 柳光希, 大谷幸三, 馬場充, “表面形状の周期性と光反射特性との相関に関する考察,” 第 31 回センシングフォーラム, pp. 29-34, 佐賀大 (佐賀県佐賀市), 2014. 9. 25-26
- (5) 石橋侖, 坂田佳寿, 河内佑太, 大谷幸三, 馬場充, “光反射特性の簡易計測と表面粗さとの相関に関する考察,” 第 22 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp. 142-143, 山口大 (山口県宇部市), 2013. 11. 30
- (6) 石橋侖, 河内佑太, 坂田佳寿, 大谷幸三, 馬場充, “魚眼カメラを用いた光反射特性の簡易測定法,” 第 30 回センシングフォーラム, pp. 67-72, 信州大 (長野県上田市), 2013. 8. 29-30

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷 幸三 (OHTANI, KOZO)
広島工業大学・情報学部・教授
研究者番号: 40351978