

## 鏡面・拡散反射成分分離のための 照明パターンの最適化

森 隆浩<sup>†1</sup> 日浦 慎作<sup>†2</sup> 佐藤 宏介<sup>†1</sup>

つやのある物体への映り込み（鏡面反射）を拡散反射と分離するために、空間的に高周波なパターンをディスプレイ等の上に表示して物体を照明し、それをずらしたときの明暗変化を解析する手法が提案されている。しかしこのとき、表示するパターンの周期が小さすぎたり大きすぎたりすると正しい分離が行えない。そこで本研究では、ディスプレイ上の画素とカメラ画素との対応関係を求めることにより、最適な照明パターン周期を自動的に求める方法を提案する。

### Optimization of Illumination Pattern for the Separation of Specular and Diffuse Reflections

TAKAHIRO MORI,<sup>†1</sup> SHINSAKU HIURA<sup>†2</sup>  
and KOSUKE SATO<sup>†1</sup>

Diffuse and specular reflections can be separated by using high frequency illumination pattern followed by the analysis of intensity change of images those are captured when pattern is shifted. However accurate separation is not possible if pitch of illumination pattern is too short or long. Therefore, we propose a novel method to automatically calculate appropriate pitch of illumination pattern by using correspondence between display-pixel and camera-pixel.

<sup>†1</sup> 大阪大学大学院基礎工学研究科  
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

<sup>†2</sup> 広島市立大学情報科学研究科  
Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University

### 1. はじめに

画像処理アルゴリズムの多くは拡散反射を前提にしている。したがって、画像に鏡面反射成分や影を含むと、画像処理の精度が劣化してしまうことが知られている。また、カタログなどの商品写真では、撮影機材のセッティングに専門的な工夫を凝らすことでカメラや撮影者が映り込むことを防いでいるが、画像を鏡面反射成分と拡散反射成分に分離し適切に合成することで、このような映り込みのない画像を作成することが出来る。ここで鏡面反射成分は入射光が大気と物体表面層との境界において反射することで生じる、正反射方向付近で強く観測される成分であり、拡散反射成分は入射光が物体表面層内部で乱反射することで生じる、視線方向に依存しない成分のことである。二色性反射モデルを仮定すると、反射光は鏡面反射成分と拡散反射成分の和で表現することができる。そこで、反射光を鏡面反射成分と拡散反射成分に分離する研究が盛んに行われている。

従来の反射成分の分離手法は、空間周波数領域における高周波な照明パターンを用いる手法<sup>1)2)</sup>、拡散反射成分と鏡面反射成分の色の違いを利用する手法<sup>3)</sup>、偏光を利用する手法<sup>4)</sup>、拡散反射成分の自由度に基づく手法<sup>5)6)</sup>の四つの手法に大別することができる。ここでは、空間周波数領域における高周波な照明パターンを用いる手法について考える。

Lamondらは空間的に高周波なパターンをディスプレイ等の上に表示して物体を照明し、パターンをシフトした時のシーンの明暗変化を解析することでシーンの鏡面反射と拡散反射を高速に分離する手法を提案している<sup>1)</sup>。しかし、表示するパターンの周期が小さすぎたり大きすぎたりすると正しく分離することができないという問題がある。そこで本稿では、グレイコードパターンを用いて鏡面反射を介したディスプレイ上の画素とカメラ画素との対応関係を求めることにより、シーンに対して適切な照明パターンの周期を自動的に求める手法を提案する。

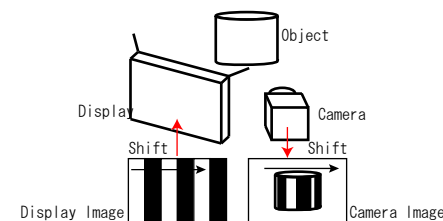


図 1 システム概念図

## 2. 関連研究

### 2.1 空間的に高周波な照明パターンを用いた鏡面・拡散反射成分分離の原理

ここでは、空間周波数領域における高周波な照明パターンを用いて反射成分を分離する手法<sup>1)</sup>を詳しく説明する。図1に示すシステム概念図のように、対象物体の方向にディスプレイを向け、ディスプレイ上に照明パターンを表示する。その際に対象物体をカメラで撮影すると、右下図のように対象物体上で「鏡面反射成分と拡散反射成分の両方を含んでいる領域」と「拡散反射成分のみを含んでいる領域」が生じている画像を得ることができる。ディスプレイ上の照明パターンを矢印の方向にずらす度にカメラで対象物体を撮影する。

次に、得られた複数枚の画像をもとに、シーン画像を鏡面反射成分と拡散反射成分に分離する。このとき、照明パターンをずらすことによる鏡面反射成分と拡散反射成分の明暗変化(輝度変化)に関する性質の違いを利用する。すなわち、鏡面反射成分はディスプレイとカメラ間の幾何的な対応関係により決定されるため、空間的に高周波な照明パターンをシフトしたときの明暗変化が大きい。一方、拡散反射成分はディスプレイ上の多くの点の影響を少しずつ受けるため、空間的に高周波な照明パターンをシフトしたときの明暗変化が小さいというものである。これを式で表すと以下のようになる。

$$L^+[c, i] = L_s[c, i] + \alpha L_d[c, i] \quad (1)$$

$$L^-[c, i] = (1 - \alpha)L_d[c, i] \quad (2)$$

$$L_{max} = L^+ \quad (3)$$

$$L_{min} = L^- \quad (4)$$

$L^+[c, i]$ :カメラから見たシーンの領域  $i$  における鏡面反射成分を含んでいるときの輝度

$L^-[c, i]$ :カメラから見たシーンの領域  $i$  における鏡面反射成分を含んでいないときの輝度

$L_s[c, i]$ :カメラから見たシーンの領域  $i$  における鏡面反射成分の輝度

$L_d[c, i]$ :カメラから見たシーンの領域  $i$  における拡散反射成分の輝度

$\alpha$ :光源全体における光っている領域の占める割合

$L_{max}$ :各画素における照明パターン変化時の最大輝度

$L_{min}$ :各画素における照明パターン変化時の最小輝度

ここで  $\alpha$  は用いる照明パターンによって決定されるため既知である。したがって、式(1)-(4)を用いて鏡面・拡散反射成分を分離することが可能である。

### 2.2 照明パターンの周期と反射成分分離の精度

ディスプレイに表示する照明パターンの周期は、反射成分の分離精度を大きく左右する。周期が小さすぎる場合は、図2(a),2(b)に示すように、照明パターンをシフトした際に、シーンにおいて常に鏡面反射成分を含んでいる箇所が生じてしまう。これは鏡面反射成分のじみが生じた原因である。すると、図2(c)に示す拡散画像からも分かるように、鏡面・拡散反射成分を正しく分離することができない。この拡散画像の赤線上の各画素の輝度値をプロットすると図2.2の赤線のようになる。このグラフからも、ディスプレイに表示する照明パターンの周期が小さすぎる場合は、拡散画像から鏡面反射成分を除去できていないことが分かる。

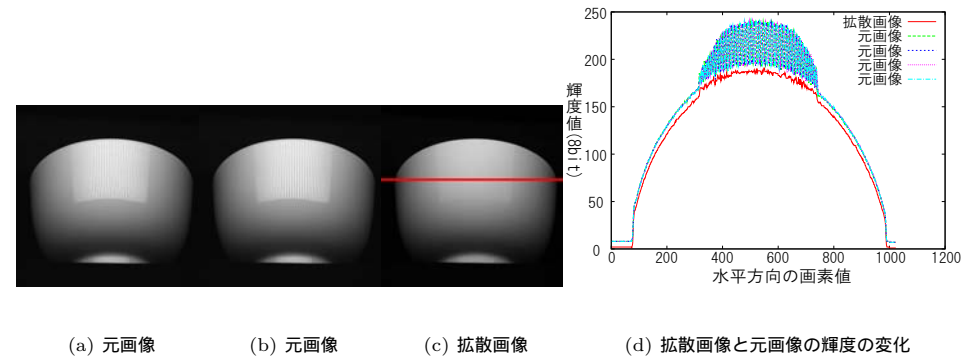


図2 照明パターンの周期が小さすぎる場合

また、ディスプレイに表示する照明パターンの周期が大きすぎる場合は、図3(a),3(b)のように、光源の方位がまとまって変化することによるシェーディングの影響(2.3節に記述)により、パターンをシフトした際に拡散反射成分のみを含む領域が明暗変化してしまう。これは「拡散反射成分は照明パターンをシフトすることに伴う明暗変化が小さい」という仮定が崩れていることを意味する。そのため、図3(c)に示す拡散画像からも分かるように、鏡面・拡散反射成分を正しく分離することができない。この拡散画像の赤線上の各画素の輝度値をプロットすると図3(d)の赤線のようになる。このグラフからも、ディスプレイに表示する照明パターンの周期が大きすぎる場合は、反射成分を正しく分離できないことが分かる。

比較として、照明パターンの周期が適切な場合の結果を図4に示す。図4(c)の画像と図4(d)のグラフを見ると、拡散画像から鏡面反射成分を適切に除去できていることが分かる。

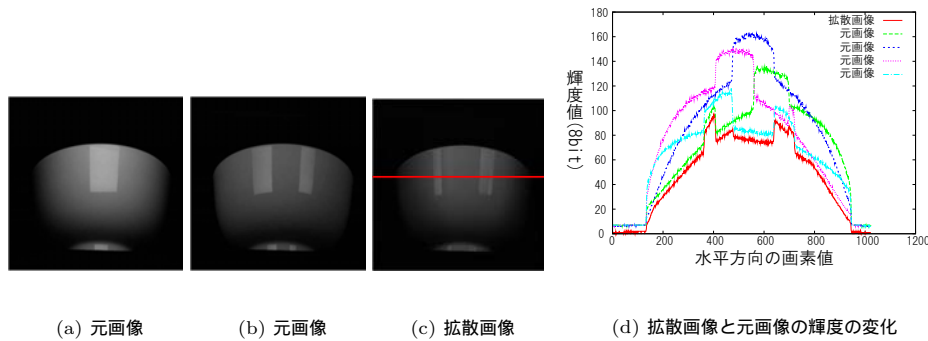


図 3 照明パターンの周期が大きすぎる場合

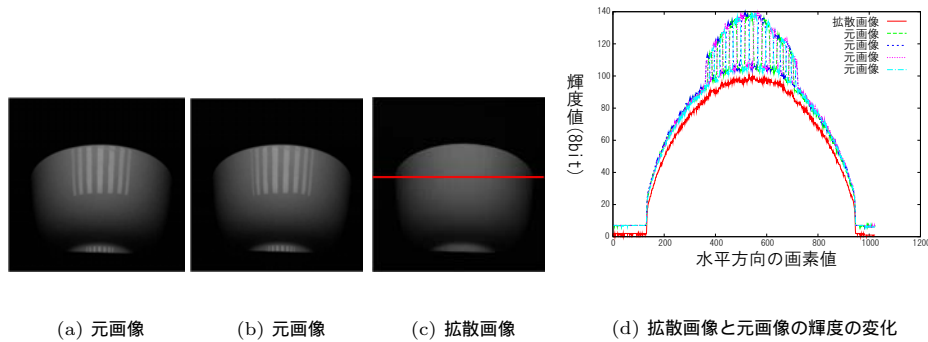


図 4 照明パターンの周期が適切な場合

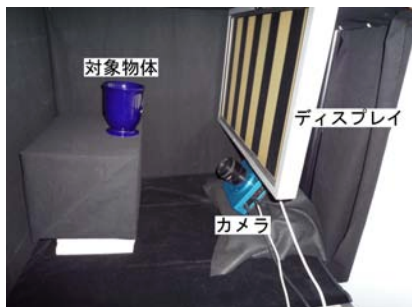


図 5 システム概観

### 2.3 シェーディングの影響

2.2 節にて、ディスプレイに表示する照明パターンの周期が大きすぎる場合はシェーディングの影響が大きくなると説明した。ここでは、シェーディング変化の理由について簡略的に説明する。図 6 において、物体の表面 B における法線ベクトルとベクトル BA のなす角は  $0[\text{rad}]$  であり、法線ベクトルとベクトル BC のなす角は  $\theta[\text{rad}]$  であるとする。このとき、ディスプレイの C の位置だけを光らせたときの表面 B の明るさは、ディスプレイの A の位置だけを光らせたときの表面 B の明るさの  $\cos^4 \theta$  倍となる。その原因を次にあげる。

- 光の減衰の法則

光源に対する照度は距離の 2 乗に反比例するという性質がある。距離 BC は距離 AB の  $1/\cos \theta$  倍であるため、明るさが  $\cos^2 \theta$  になる。

- ランバートの余弦則

ランバートの余弦則では、反射光の強さ  $I$  は次式のように表される。

$$I = \rho l_{in} \cos \theta \quad (5)$$

ここで  $\rho$  は物体表面の拡散反射率、 $l_{in}$  は入射光の強さ、 $\theta$  は表面法線方向と光源方向のなす角である。表面法線方向と光源方向のなす角が光源 A では  $0[\text{rad}]$  で光源 C では  $\theta[\text{rad}]$  なので、明るさが  $\cos \theta$  になる。

- 光源の立体角 (見かけの大きさ)

表面 B から見た光源 C の面の大きさは、表面 B から見た光源 A の面の大きさの  $\cos \theta$  倍になるので、明るさが  $\cos \theta$  になる。

これら 3 つの要素により、ディスプレイに表示する照明パターンの周期が大きくなると、シェーディングの影響が大きくなること分かる。また式 (5) より、対象物体の拡散反射率が高いほど、シェーディングの影響が大きくなることも分かる。

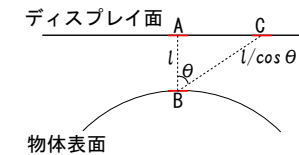


図 6 シェーディングの影響

### 3. 提案手法

シーンに応じて適切な照明パターン周期を自動的に求める手法を提案する。図5に示すシステムにおいて、ある周期の照明パターンをディスプレイに表示した際、カメラ画像上における照明パターンの間隔を決定するパラメータは以下の3つである。

1つめは、対象物体表面の曲率半径である。図7の左図上部の曲率半径が大きい部分では照明パターンの間隔が大きいが、左図下部の曲率半径が小さい部分では、中央図のように拡大しなければ分からないほど照明パターンの間隔が小さいことがわかる。

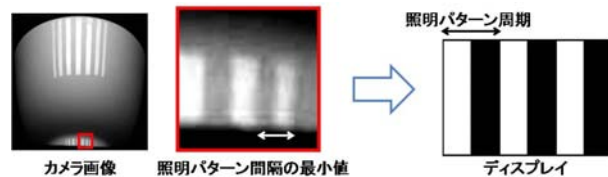


図7 照明パターンの周期を求める方法

2つめは、ディスプレイと対象物体の距離である。距離が近ければ照明パターンの間隔は大きくなり、距離が遠ければ間隔は小さくなる。

3つめは、カメラの焦点距離である。焦点距離が短いと画角が大きいので照明パターンの間隔は小さくなり、焦点距離が長いと画角が小さいので照明パターンの間隔は大きくなる。

これらのパラメータを考慮して適切な照明パターン周期を手動で決定することは容易ではない。そこで本稿では、鏡面反射のにじみが小さいという仮定の下で、グレイコードパターンを用いて鏡面反射を介したディスプレイ上の画素とカメラ画素の対応関係を求めることにより、これらのパラメータを考慮した適切な照明パターンの周期を自動的に求める手法を提案する。

図7の左図のように、ディスプレイ上に一定周期の照明パターンを表示した際、カメラ画像上の照明パターンの間隔は一定ではない。しかし、図2で述べたように、カメラ画像上における照明パターンの間隔が小さすぎると拡散画像から鏡面反射成分を除去することができない。そこで、カメラ画像上で観測される照明パターン間隔の最小値をあらかじめ設定しておき、図7の右図のように、その照明パターン間隔を実現することができる照明パターン周期を求めることにより、カメラ画像上で照明パターン間隔が小さくなりすぎてしまうこと

を防ぎ、鏡面・拡散反射成分の分離精度を向上させる。

ディスプレイに表示するパターンの周期を決定する手順は次のとおりである。

- (1) カメラ画像上で観測される照明パターン間隔の最小値を設定する
- (2) グレイコードパターンを用いて、ディスプレイ上の画素とカメラ画素の鏡面反射を介した対応関係を求める
- (3) 誤対応などによるノイズを除去する
- (4) 対応関係から、ディスプレイに表示する照明パターンの周期を求める

手順に沿って手法を詳しく述べる。まず(1)で、カメラ画像上で観測される水平方向と垂直方向の照明パターン間隔の最小値を  $X_M, Y_M$  [pixel] と定める。次に(2)(3)で、ノイズ領域を除去した対応関係を求める。図8(a)の対象物体を例に挙げると、水平方向と垂直方向の対応関係は図8(b)左上、8(c)左上のように得られる。それぞれの対応関係図の右側にある目盛りは、ディスプレイ上の水平・垂直方向の画素値である。最後に(4)でディスプレイに表示する水平方向と垂直方向の照明パターンの周期  $X_L, Y_L$  [pixel] を求める。このとき、図8(b)左上の赤線上の対応関係をプロットすると図8(b)左下のようになり、図8(c)左上の赤線上の対応関係をプロットすると図8(c)右上ようになる。図8(b)左下、8(c)右上においてカメラ画像のある水平方向と垂直方向の画素値を  $X_C, Y_C$  とおくと、その画素に対応するディスプレイ上の水平方向と垂直方向の画素値は  $f(X_C, h), g(Y_C, w)$  となる。ここで、グラフの曲線の傾きが急である(すなわち映り込む面積が大きい)箇所ほど、カメラ画像上で観測される照明パターンの間隔が小さくなるという性質を利用して、ディスプレイに表示する照明パターンの周期  $X_L, Y_L$  を次のように求める。

$$X_L = \max |f(X_C, h) - f(X_C + X_M, h)| * 2 \quad (X_C = 0, \dots, 1024, h = 0, \dots, 1024)$$

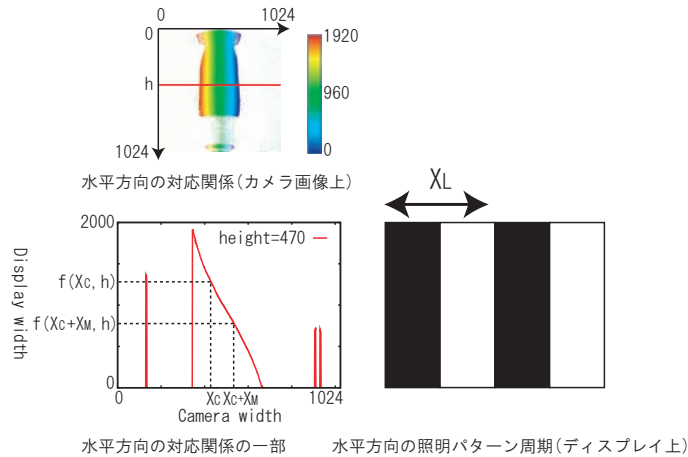
$$Y_L = \max |g(Y_C, w) - g(Y_C + Y_M, w)| * 2 \quad (Y_C = 0, \dots, 1024, w = 0, \dots, 1024)$$

$h$ : 水平方向の対応関係における垂直方向の画素値 (図8(b)左上参照)

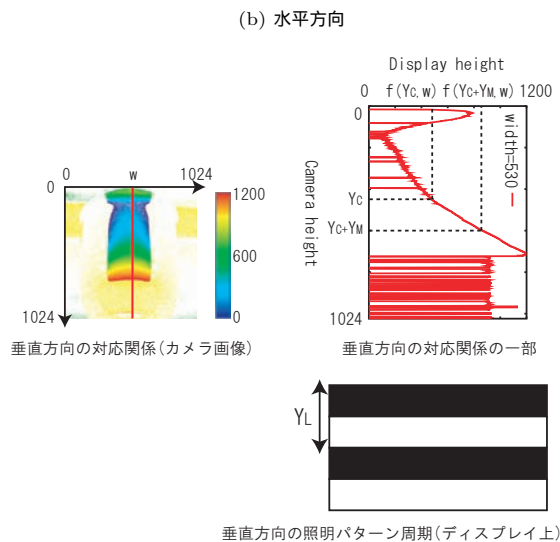
$w$ : 垂直方向の対応関係における水平方向の画素値 (図8(c)左上参照)

本手法は対応関係が単調でない場合でも利用することができる。





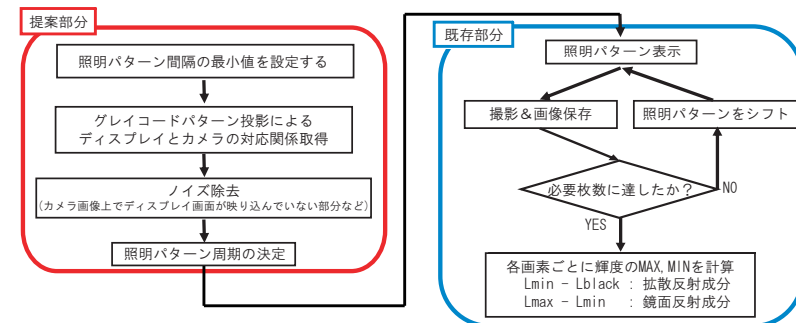
(a) 対象物体



(c) 垂直方向

図 8 照明パターン周期の算出

処理の流れを図 9 に示す。提案部分ではディスプレイに表示する照明パターンの周期を決定し、既存部分では反射成分の分離を行う。既存部分の分離手法は第 2 章で紹介した Lamondらの手法<sup>1)</sup>を参考にした。ディスプレイ上の画素の半分を白を、もう半分を黒を表示することにより、式 (1),(2) で用いる係数  $\alpha$  を 0.50 と設定することができる。したがって式 (1)-(4) より、 $L_{min} - L_{black}$  を計算することで拡散反射成分を、 $L_{max} - L_{min}$  を計算することで鏡面反射成分を求めることができる。ただし、 $L_{black}$  とはディスプレイの全面に黒を表示したときのバックライトによる輝度成分のことである。



\*注:  $L_{black}$ とは、ディスプレイ全面に黒を表示したときのバックライトによる輝度の成分のこと

図 9 鏡面・拡散反射成分分離の流れ

また、照明パターンをシフトした際に係数  $\alpha$  が変動することがないようにしなければならない。そのための対応策を 2 つ説明する。今回は後者の方法を採用した。

- 照明パターンの周期をディスプレイ解像度の約数に近似する

ディスプレイの解像度を  $(width, height)$  として考える。 $width/m (m = 1, 2, \dots, width/2)$ ,  $height/n (n = 1, 2, \dots, height/2)$  のなかで、算出した照明パターン周期と最も近い整数値を水平・垂直方向の照明パターン周期としてそれぞれ用いることで係数  $\alpha$  の変動を防ぐことができる。

- 仮想的にディスプレイの解像度を下げる

算出した照明パターン周期を  $X_L, Y_L$  とする。このとき水平方向に  $width/X_L$  周期分、垂直方向に  $height/Y_L$  周期分の範囲に照明パターンを表示し、残りの画素はすべて黒を表示することで係数  $\alpha$  の変動を防ぐことができる。

#### 4. 実験と結果

提案手法で求めた照明パターンの周期を用いて、鏡面・拡散反射成分を正しく分離することが出来るかを確認するために実験を行った。システム概観を図5, 実験機材を表1に示す。実験は暗室環境下で行った。図10の照明パターンを水平方向に1/8周期ずつシフトする度に、固定カメラでシーンを撮影した8枚の画像とディスプレイの全面に黒を表示して撮影した1枚の画像の計9枚の画像を用いて分離を行った。あらかじめ $X_M, Y_M$ の値を8[pixel]に設定している。分離結果を図11-15に示す。結果画像は輝度が小さいため一定値のレベル補正を行ってから表示している。

結果画像から、対象物体の形状等に応じてディスプレイに表示する照明パターンの周期を変化させることにより、鏡面・拡散反射成分を高精度に分離することが出来ることを確認した。ただし、対象物体表面の鏡面反射にじみが大きい場合や、半透明物体である場合には反射成分の分離精度が劣化してしまうことが確認できた。



図10 照明パターン

表1 実験機材

機材	仕様
カメラ	Apogee Alta U4000 解像度 2048 × 2048 pixel 16bit
レンズ	Nicon Ai AF Nikkor 35mm F2D
ディスプレイ	SAMSUNG SyncMaster 243T 解像度 1920 × 1200



図11 分離結果

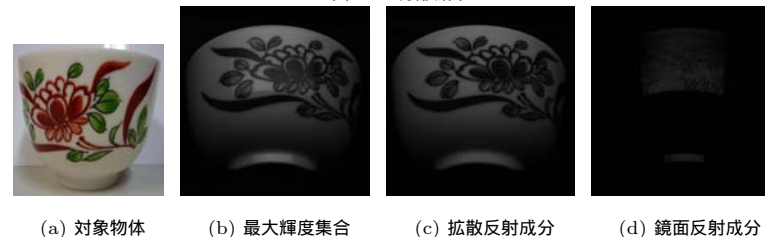


図12 分離結果

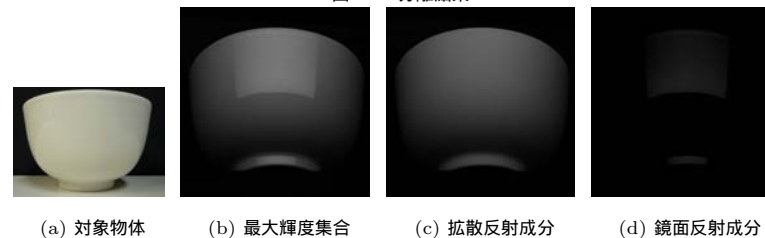


図13 分離結果

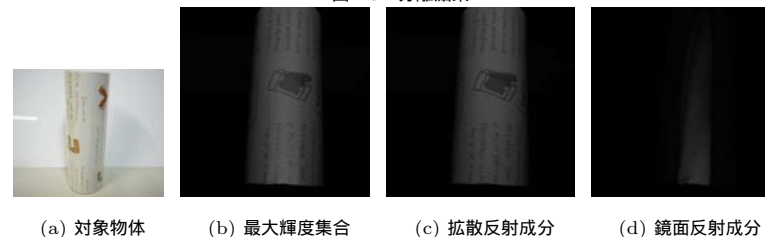


図14 分離結果



(a) 対象物体 (b) 最大輝度集合 (c) 拡散反射成分 (d) 鏡面反射成分

図 15 分離結果

### 5. 提案手法の評価

シーンに応じて適切な照明パターンの周期を設定できているかを確認するために評価を行った。評価方法としては、2.2 節で述べたように、ディスプレイに表示するパターンの周期が小さすぎる場合 (図 16 の①の範囲) や大きすぎる場合 (図 16 の③の範囲) は拡散画像から鏡面反射成分を精度良く除去することができないという知識を利用する。様々な照明パターン周期で反射成分の分離を行い、拡散画像上の画素での輝度変化をプロットすると図 16 の様になる。①の範囲では、拡散画像上に鏡面反射成分が残っているため輝度が高くなってしまふ。③の範囲では、シェーディングの影響により「拡散反射成分は照明パターンをシフトしても明暗変化が小さい」という仮定が崩れてしまうため、拡散反射成分の輝度が小さくなってしまったり、場合によっては鏡面反射が生じている時よりも拡散反射のみの時のほうが輝度が大きくなってしまふため、拡散画像上の輝度が上下してしまう。ただし②の範囲では、拡散画像上に拡散反射成分のみしか含まないため、照明パターン周期が多少変動しても輝度は大きく変化しないと考えることができる。そこで、提案手法で求めた照明パターンの周期が図 16 の②の範囲に含まれているかどうかで評価を行った。評価結果を図 17-21 に示す。図の (a) は図 16 と同様に、様々な照明パターン周期で反射成分の分離を行い、(b) に示す拡散画像上の各画素での輝度変化をプロットしたものである。各シーンの対して提案手法を用いて算出した照明パターン周期を (a) では周期算出結果 (赤い縦線部分) として示している。提案手法の照明パターン周期は  $X_M, Y_M$  を 8[pixel] として算出した。評価結果から、シーンに対して適切な照明パターンの周期を設定できていることを確認した。ただし、図 21 に示す評価結果では照明パターンの周期が①の範囲に含まれてしまった。これは、対象物体における鏡面反射のにじみが影響して対応関係のノイズが大きくなってしまったことが原因であると

考えられる。

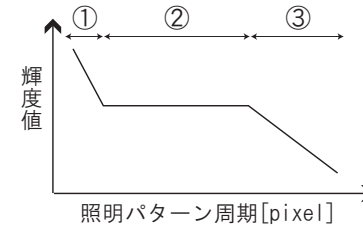
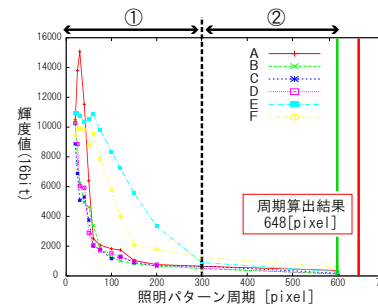
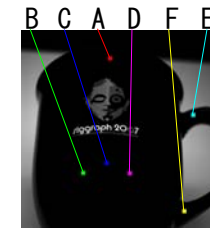


図 16 評価基準

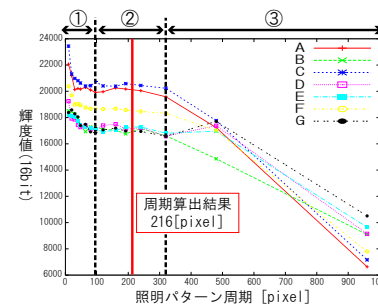


(a) 各画素での輝度変化と算出結果

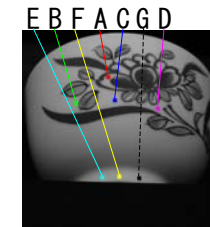


(b) 評価画素

図 17 評価結果

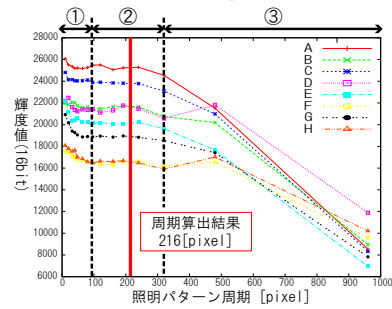


(a) 各画素での輝度変化と算出結果

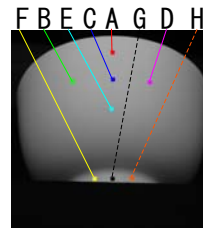


(b) 評価画素

図 18 評価結果

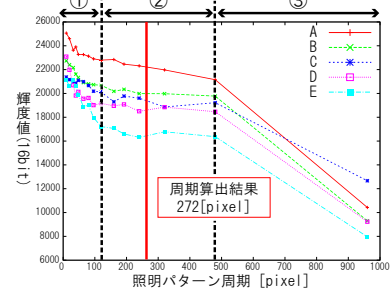


(a) 各画素での輝度変化と算出結果

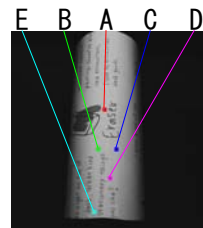


(b) 評価画素

図 19 評価結果

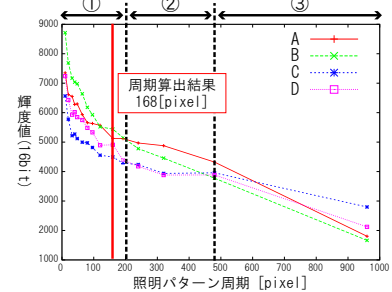


(a) 各画素での輝度変化と算出結果

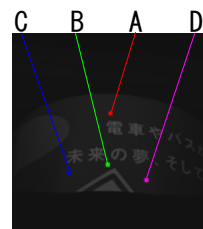


(b) 評価画素

図 20 評価結果



(a) 各画素での輝度変化と算出結果



(b) 評価画素

図 21 評価結果

## 6. 結 論

本稿では、空間周波数領域における高周波照明パターンを用いてシーンの鏡面反射成分と拡散反射成分を分離する技術において、カメラ画像上における照明パターンの間隔が分離の精度に大きく影響を与えることに注目した。そこで、鏡面反射のにじみが小さいという仮定の下で、グレイコードパターンを用いて鏡面反射を介したディスプレイ上の画素とカメラ画素との幾何的な対応関係を求めることにより、対象物体の形状や光源と対象物体の距離、カメラの焦点距離などのカメラ画像上における照明パターンの間隔を決定するパラメータを考慮した照明パターン周期を自動的に求める手法を提案した。また、実験により提案手法が分離精度向上に効果的であることを確認し、シーンに応じて適切な照明パターン周期を算出できていることも確認した。

今後の課題としては、鏡面反射のにじみに頑強な分離手法に発展させること、対応関係の取得精度を向上させるためにシェーディングの影響を補正する手法を導入すること、カメラ画像上で照明パターンの間隔が均等になるようにディスプレイ上に表示する照明パターンを作成するための計算手法を確立すること、より少ない枚数で反射成分を高精度に分離することができる照明パターンを見つけることなどが挙げられる。

## 参 考 文 献

- 1) B.Lamond, P.Peers and P.Debevec: Fast image-based separation of diffuse and specular reflections, *ACM SIGGRAPH 2007 sketches*, ACM, p.74 (2007).
- 2) S.K.Nayar, G.Krishnan, M.D.Grossberg and R.Raskar: Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination, *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, ACM, p.944 (2006).
- 3) S.A.Shafer: Using color to separate reflection components, *Color*, Vol.10, pp.210-218 (1985).
- 4) L.B.Wolff and T.E.Boult: Constraining object features using a polarization reflectance model, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp.635-657 (1991).
- 5) A.S.Georghiadis, D.J.Kriegman and P.N.Belhumeur: Illumination cones for recognition under variable lighting: Faces, *In Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (1998).
- 6) 向川康博, 宮木一, 三橋貞彦, 尺長健: Photometric Image-Based Rendering による仮想照明画像の生成, *情報処理学会 CVIM 論文誌*, Vol.41, pp.19-30 (2000).