

ジョイントバイラテラルフィルタを用いた多波長カラー照度差ステレオ法

宮崎 大輔^{1,a)} 石黒 健司^{†1} 河本 悠¹ 日浦 慎作¹

概要：照度差ステレオ法の問題点の一つに、異なる方向から光源を照射する必要があるため、複数回の計測が必要となる点が挙げられる。それを解決する方法として、異なる波長の光を同時に照射することでワンショット計測をおこなうカラー照度差ステレオ法がある。古典的なカラー照度差ステレオ法では白色物体しか計測することができず、複数色から構成される物体の法線推定は理論上不可能である。そのため、複数色から構成される物体の法線をカラー照度差ステレオ法の枠組みで推定するためには、何らかの制約条件をつける必要がある。本研究では、アルベドに対する制約条件としてジョイントバイラテラルフィルタを利用する。ジョイントバイラテラルフィルタを制約条件とすることで、近傍画素領域において同じアルベドは同じアルベドとして算出されるようになり、異なるアルベドは異なるアルベドとして算出されるようになる。アルベドの推定が安定化することにより、法線の推定性能も安定化する。3色を利用する古典的なカラー照度差ステレオ法ではなく、7色のカラー照度差ステレオ法を実現する計測装置を用いて本研究の有効性を示す。

1. はじめに

微細な表面形状を再現するためには法線情報が必要である。この法線情報を取得する手法として照度差ステレオ法がある。照度差ステレオ法は光源方位を変化させることで得られる複数枚の画像の明度の変化から法線を推定する手法である。そのため、照度差ステレオ法では複数回の撮影が必要となるため動きのある物体のモデリングは不向きである。そこで、動きのある物体の形状計測を行うために色のついた光源を複数使用して行うカラー照度差ステレオ法が開発された。カラー照度差ステレオ法は複数個所に設置した色の違う光源を同時に対象物体に照らして行う。そこで本研究ではカラー照度差ステレオ法を利用した多色物体の形状計測における精度の向上を目的とし、その手法としてアルベドの平滑化フィルタにジョイントバイラテラルフィルタを用いることを提案する。

2. 関連研究

光を物体に照射し、それによって物体表面上に生じる陰影を解析することで、物体表面の法線を推定する手法として照度差ステレオ法がある [24], [33]。照度差ステレオ法では、白色の平行光源（無限遠点光源）1つを物体に照射して1枚の画像を取得し、光源方向を変えてさらに2枚撮影したものを入力とする。すなわち、光源方向を変えて3枚の画像を撮影する必要があるため、動物体を計測することができない。その問題を解決する方法としてカラー照度差ステレオ法がある。カラー照度差ステレオ法では、赤色の光源と緑色の光源と青色の光源を異なる方向から同時に物体に照射し、RGBカラーカメラで画像を1枚撮影したものを入力とする。ワンショットで撮影できるため、動物体を計測することができる。

カラー照度差ステレオ法（または Shape-From-Color）は1990年代に発展した [8], [18], [29], [34]。その後、現在に至るまで様々な研究が継続的におこなわれている [1], [3], [4], [5], [6], [7], [10], [11], [12], [14], [16], [18], [19], [21], [22], [23], [25], [28], [31], [32]。カラー照度差ステレオ法には多くの問題があり、それを解決するためこれ

¹ 広島市立大学
Hiroshima City University, Hiroshima 731-3194, Japan

^{†1} 現在、スキップショット
Presently with Skip Shot, Hiroshima 730-0017, Japan

^{a)} miyazaki@hiroshima-cu.ac.jp

まで多くの研究がおこなわれており、また、今後もそれらの問題を解決するために継続的に研究がおこなわれるだろう。カラー照度差ステレオ法の代表的な問題点として、白色物体に対してしか適用できないというのがある。より正確には、色度（色相）が既知の単色物体にしか適用できないという問題である。異なる3つの有色光源を照射して法線を推定しようとする以上、避けられない問題である。

近年、複色色を有する物体にもカラー照度差ステレオ法を適用できる手法が提案されるようになってきた。Roubtsovaら[23]は、ヘルムホルツステレオ法をカラー照度差ステレオ法に組み込むことにより、任意のBRDFを持つ物体にもカラー照度差ステレオ法を適用できるようにした。しかし、ヘルムホルツステレオ法の原理の都合上、リアルタイム計測が出来ず、動物体を計測するためにはオプティカルフローを利用しなければいけないという問題点がある。Kimら[16]もオプティカルフローにより動物体を追跡し、時間の異なる複数の画像を利用することで物体表面形状を推定した。Fyffeら[10]は、6バンドカメラと、3色の異なる白色光源を用いたカラー照度差ステレオ法を提案した。彼らの手法で用意した3つの光源は、ヒトの目にはどれもほぼ白色に見えるが、それぞれスペクトル分布が異なる。また、彼らは様々な物体の反射率のデータベースを事前に計測しておき、4つの基底を算出した。彼らの手法において、未知数はアルベドに関して4つ（4つの基底の係数）と法線に関して2つ（3次元ベクトルを正規化しているため）であり、得られる方程式は6つであることから解析解を求めることができる。Andersonら[1]は多視点ステレオの法線を使うことで物体色を推定した。しかし、多視点ステレオの法線は精度が悪いため、物体は有限の種類の物体色から構成されているという仮定を置いて物体色の推定精度を向上させた。彼らの手法では、領域分割の枠組みを取り入れており、領域の種類数はベイズ情報量基準(BIC)に基づき、自動で決定している。Chakrabartiら[4]は、近傍領域のパッチ内の形状を多項式で近似し、物体色の候補を計算した。物体色の候補のヒストグラムを求め、投票数の多い有限個の物体色だけを選び、物体がそれらの有限個の物体色で構成されていると仮定して法線を推定した。Jiaoら[14]は、画像をスーパーピクセルに領域分割し、それぞれの領域内の物体色が同一であると仮定して法線を推定した。

本論文では、既存研究とは異なるアプローチでカラー照度差ステレオ法の問題点を解決する。提案手法では、入力画像から得られたガイド画像を用いて、ジョイントバイラテラルフィルタを物体色の制約条件として用いる。Kimら[16]およびRoubtsovaら[23]はオプティカルフローを利用しなければ動物体の計測が出来ないという問題点があり、理論面を考慮すると動物体の計測には適していない。Fyffeら[10]は事前に物体の反射率のデータベースが必要であ

るという問題点がある。提案手法は、Andersonら[1]のように多視点ステレオやレーザセンサなど、他のセンサから得られた形状を必要としない。提案手法は、Chakrabartiら[4]やJiaoら[14]のように物体領域の数を指定する必要がない。

これまでのカラー照度差ステレオ法では、RGBカラーカメラを利用する都合上、3色の光源で照射することしか出来なかった。本研究では、既存のカラー照度差ステレオ法と異なり、7バンドカメラを利用し、7色の光源を利用する。近年、一般の照度差ステレオ法に多波長カメラ（または多波長光源）を利用する研究が増えている[10], [13], [20], [27]。これらの論文では、一般の照度差ステレオ法に多波長の情報を使うことが有効であることが示されている。本論文では、多波長カメラと多波長光源がカラー照度差ステレオ法においても有効であることを示す。

3. 多波長カラー照度差ステレオ法

3.1 入力画像

独立な色光を用いた照度差ステレオ法はカラー照度差ステレオ法と呼ばれる。カラー照度差ステレオ法の特徴として一回の撮影で法線推定が可能であることが挙げられる。よく行われるカラー照度差ステレオ法は三種類の色光を用いて行われる。照度差ステレオ法では複数枚のグレースケール画像が手に入るのに対し、カラー照度差ステレオ法はマルチスペクトル画像が一枚手に入る。

カメラのスペクトル感度を $Q_c(\lambda)$ 、光源のスペクトル分布を $E(\lambda)$ 、物体のスペクトル分布を $S(\lambda)$ とする。また c はチャンネルを指す。このとき、カメラの各チャンネルで得られる輝度は式(1)で求められる。

$$I_c = \int_0^{\infty} Q_c(\lambda) E(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

各チャンネルが独立であるとする式(1)は以下のよう
に離散化できる。

$$I_c = A_c \max(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_c, 0) \quad (2)$$

このとき、 A_c をアルベドと呼ぶ。なお、カメラ感度と光源輝度は A_c に含まれるものとする。 \mathbf{n} は法線ベクトル、 \mathbf{l}_c はチャンネル c の光源方向ベクトルである。

図1で示すように、本研究では7チャンネルで多色物体の撮影を行う。この撮影によって得られた輝度は、 $c = 7$ であるので式(2)より以下ようになる。

$$\begin{aligned} I_0 &= A_0 \max(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_0, 0) \\ I_1 &= A_1 \max(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_1, 0) \\ &\vdots \\ I_6 &= A_6 \max(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_6, 0) \end{aligned} \quad (3)$$

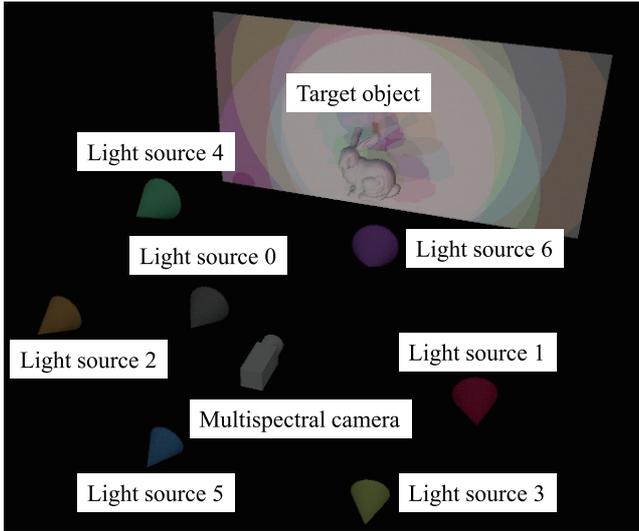


図 1 多波長カラー照度差ステレオ法

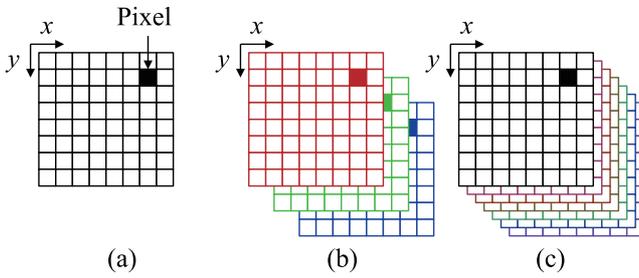


図 2 グレースケール画像とマルチスペクトル画像

提案手法は反復計算によって法線を推定する．反復計算において最小化するコスト関数を 3.2 節に示し，コスト関数のそれぞれの項を 3.3 節～3.6 節で説明する．反復計算において必要な初期値を 3.7 節で説明する．

3.2 コスト関数による法線とアルベドの最適化

コスト関数 $\int \int F dx dy$ を以下のように四つの項で表す．

$$F = \int \int_{(x,y) \in \mathcal{P} \setminus \partial \mathcal{P}} F_1(\mathbf{n}(x,y), \mathbf{A}(x,y), \mathbf{I}(x,y), \mathbf{L}) dx dy + K_1 \int \int_{(x,y) \in \mathcal{P} \setminus \partial \mathcal{P}} F_2(\mathbf{n}(x,y)) dx dy + K_2 \int \int_{(x,y) \in \mathcal{P} \setminus \partial \mathcal{P}} F_3(\mathbf{A}(x,y)) dx dy + \int \int_{(x,y) \in \partial \mathcal{P}} F_4(\mathbf{n}(x,y)) dx dy \quad (4)$$

ここで $\mathbf{A} = (A_0(x,y), A_1(x,y), \dots, A_6(x,y))^T$, $\mathbf{L} = (l_0, l_1, \dots, l_6)^T$,

$\mathbf{I} = (I_0(x,y), I_1(x,y), \dots, I_6(x,y))^T$ である．画像中で対象物体が観測された領域を \mathcal{P} とし，遮蔽境界を $\partial \mathcal{P}$ で表す． K_1, K_2 はラグランジュ未定乗数とする．

コスト関数四つの項は以下の通りである．

$$F_1 = \sum_{c=0}^6 (I_c(x,y) - A_c(x,y) \max(\mathbf{l}_c^T \mathbf{n}(x,y), 0))^2 \quad (5)$$

$$F_2 = \left\| \frac{\partial \mathbf{n}(x,y)}{\partial x} \right\|^2 + \left\| \frac{\partial \mathbf{n}(x,y)}{\partial y} \right\|^2 \quad (6)$$

$$F_3 = \left\| \frac{\partial \mathbf{A}(x,y)}{\partial x} \right\|^2 + \left\| \frac{\partial \mathbf{A}(x,y)}{\partial y} \right\|^2 \quad (7)$$

$$F_4 = \|\mathbf{n}(x,y) - \mathbf{n}^b(x,y)\|^2 \quad (8)$$

F_1 はランバート反射モデルと入力画像輝度の残差を表しており，3.3 節で説明する． F_2 は法線の平滑化項であり，3.4 節で説明する． F_3 はアルベドの平滑化項であり，3.5 節で説明する． F_4 は遮蔽境界における法線に対する制約条件であり，3.6 節で説明する．

3.3 法線とアルベドの更新

コスト関数の第一項 F_1 は以下のように表現される．

$$F_1 = \sum_{c=0}^6 (I_c(x,y) - A_c(x,y) (\mathbf{l}_c^T \mathbf{n}(x,y)))^2 \quad (9)$$

式 (9) を最小化して得られる解は式 (10) である．

$$I_c(x,y) = A_c(x,y) (\mathbf{l}_c^T \mathbf{n}(x,y)) \quad (10)$$

アルベド A_0, A_1, \dots, A_6 が既知のとき，行列 \mathbf{L} の擬似逆行列 \mathbf{L}^+ を計算することで法線 \mathbf{n} を式 (11) のように求めることができる．

$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{x0} & l_{y0} & l_{z0} \\ l_{x1} & l_{y1} & l_{z1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{x6} & l_{y6} & l_{z6} \end{pmatrix}^+ \begin{pmatrix} I_0(x,y)/(A_0(x,y) + \varepsilon_1) \\ I_1(x,y)/(A_1(x,y) + \varepsilon_1) \\ \vdots \\ I_6(x,y)/(A_6(x,y) + \varepsilon_1) \end{pmatrix} \quad (11)$$

ここで ε_1 は 0 による割り算を防ぐために導入した小さな正の定数である．法線 \mathbf{n} は単位ベクトルとして表現しているため，式 (11) を計算したのち，法線を正規化する．光源 \mathbf{l}_c を照射したとき，求められた法線 \mathbf{n} の内積 $\mathbf{l}_c^T \mathbf{n}$ の正負を確認することによって \mathbf{l}_c に照らされているか判別できる． $\mathbf{l}_c^T \mathbf{n} \leq 0$ となるとき，その光源に対して影となっているということがわかる．そのチャンネルにおいて式 (11) は成立しなくなるため，法線推定には利用できない．これを回避するために，影となっているチャンネル c に対して \mathbf{L} の c 行目を 0 にすることで \mathbf{n} を計算する．

法線が既知のとき，アルベドは式 (10) より式 (12) のように計算することができる．

$$A_c = \frac{I_c}{\mathbf{l}_c^T \mathbf{n}} \quad (12)$$

ここでも 0 による割り算を防ぐため、小さな正の定数 ε_2 に対して $I_c^T \mathbf{n} > \varepsilon_2$ となるときだけ式 (12) を計算する。

式 (10) において制約条件式の個数は 7 つあり、入力画像輝度 I_0, I_1, \dots, I_6 と光源方向を表す単位ベクトル $\mathbf{l}_0, \mathbf{l}_1, \dots, \mathbf{l}_6$ は既知である。未知パラメータはアルベド A_0, A_1, \dots, A_6 と法線ベクトル n_x, n_y, n_z であるが、法線ベクトルは 3 次元ベクトルであるものの、単位ベクトルであるという条件が付くため、パラメータとしての自由度は 2 である。よって未知数のパラメータはアルベドが 7 つと法線ベクトルが 2 つで計 9 つになる。このとき、方程式の数より未知数の数が多く、計算することができないため、法線の平滑化、アルベドの平滑化、遮蔽境界における法線に対する制約条件をコスト関数に導入する。

3.4 法線の平滑化

3.3 節で述べたように未知数が多いため、法線とアルベドの計算ができない。そのため制約条件として法線の平滑化を行う。法線の平滑化項を表すコスト関数 F の第二項 F_2 は式 (6) で表される。

式 (6) を離散化して解くと式 (13) になる。

$$\mathbf{n}(x, y) = \frac{1}{4} \{ \mathbf{n}(x+1, y) + \mathbf{n}(x-1, y) + \mathbf{n}(x, y+1) + \mathbf{n}(x, y-1) \} \quad (13)$$

式 (13) によって得られた法線を正規化し、単位法線ベクトルにする。 F_2 による制約条件を付加しても式 (10) の曖昧性を解くことは不可能である。しかし、4 近傍の法線が正しく、物体表面が滑らかと仮定したならば、注目画素 (x, y) の法線が求まり、その法線が平滑化によって伝播されることですべての画素の法線を求めることができる。式 (13) は 4 近傍平均であり、値の伝播が遅いため、より広範囲の要素をもとに平滑化するためにガウシアンフィルタを利用する。

3.5 アルベドの平滑化

3.4 節で述べた通り、制約条件が法線の平滑化のみだと不十分である。そのためアルベドの平滑化も行う。アルベドの平滑化項を表すコスト関数の第 3 項 F_3 は式 (7) で表される。

式 (7) を離散化して解くと式 (14) になる。

$$\mathbf{A}(x, y) = \text{median} \{ \mathbf{A}(x+1, y), \mathbf{A}(x-1, y), \mathbf{A}(x, y+1), \mathbf{A}(x, y-1) \} \quad (14)$$

ここで、median は中央値を求める関数とする。アルベドが滑らかであると仮定すると、式 (14) により、4 近傍のアルベドが正しければ、注目画素 (x, y) のアルベドを求めることができる。3.6 節で述べる通り、遮蔽境界では正し

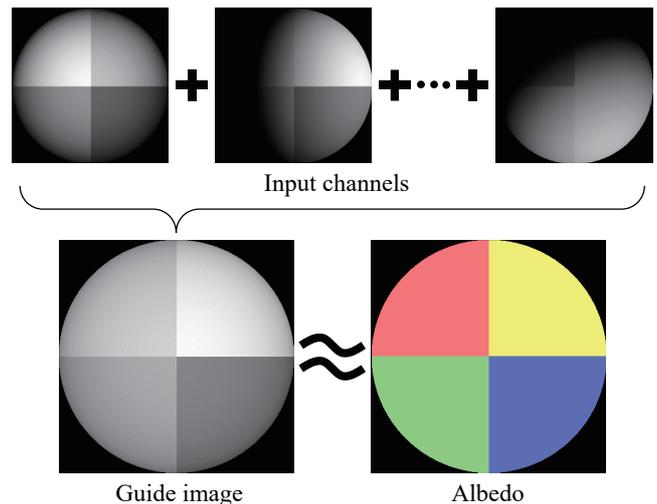


図 3 輝度の平均とアルベドの相関関係

い法線が求まる。式 (10) により、法線が既知ならば、方程式 7 個、未知数のアルベド 7 個により解くことができる。遮蔽境界で決まったアルベドが物体領域内で平滑化され伝播されることによって、全ての画像でのアルベドを求めることができる。しかし、アルベドのわずかな変化のある物体にも適用できるようにするため、アルベドを強制的に同じにするのではなく、 F_3 という平滑化項としてコスト関数に組み込んだ。

メディアンによるフィルタ処理はエッジ (隣接画素で値が大きく変化する部分) を保存して平滑化する処理である。同様のフィルタ処理としてバイラテラルフィルタがある。メディアンフィルタでは、4 近傍の画像しか考慮しないため伝播が遅い。そのためバイラテラルフィルタを使用したほうがよい。

バイラテラルフィルタによる平滑化処理を複数回行うと、処理を行うたび輝度値の重みが変わってしまう。その解決手段として本研究ではジョイントバイラテラルフィルタを用いる。

ジョイントバイラテラルフィルタを用いて平滑化処理を複数回行う場合は、ガイド画像の重みの情報は平滑化されずに不変であり続けるので、先ほど述べたような事態は起きなくなる。

ガイド画像について、アルベドの変化が滑らかな領域内の輝度値がすべて同じである画像が理想であるが、ガイド画像を手作業で作るのは非常に大変である。そこで、本研究では、入力画像の各チャンネルを足し合わせた結合画像 I_w^t をガイド画像とする。

$$I_w^t(x, y) = I_0(x, y) + I_1(x, y) + \dots + I_6(x, y) \quad (15)$$

図 3 で示すようにアルベドの真値と結合画像 I_w^t の輝度値が似ているのでガイド画像として用いることができる。

3.6 遮蔽境界における法線に対する制約条件

本研究では、滑らかで閉じた曲面の物体を対象としている。つまり、物体表面上の法線がちょうど裏側に回り込んで見えなくなるぎりぎりの境界が遮蔽境界である。遮蔽境界では視線方向ベクトルと法線のベクトルのなす角度が 90° 、または法線が物体領域の輪郭に直交するため正しい法線の推定ができる。これを F_4 としてコスト関数に組み込む。遮蔽境界での法線を n_b とすると、式 (8) のように表現できる。このとき、 F_4 が最小となる解は $n(x, y) = n^b(x, y)$ である。遮蔽境界において n_b を法線として設定する。



図 4 使用したカメラ

3.7 初期値とガイド画像

コスト関数を用いたループ処理を行うために法線とアルベドの初期値が必要であるため、初期値の設定について説明する。

まず、3.6 節で述べた方法により、遮蔽境界を利用した法線を計算する。それを物体領域内部まで伝搬させて平滑化した法線を法線 n の初期値とする。

アルベド A は入力画像輝度 I と相関が高いが、入力画像には影が存在する。そこでまず、入力画像の各チャンネルを足し合わせた結合画像 I_w を計算する。また、それぞれの画像において輝度の平均値を計算する。結合画像 I^t の輝度の平均がそれぞれのチャンネル輝度の平均と同じになるようにスケールされた画像をアルベドの初期値 $A_c(x, y)$ とする。また、結合画像 I^t は 3.5 節で示したジョイントバイラテラルフィルタのガイド画像として利用する。

これらの法線 n とアルベド A を初期値として指定回数だけ反復計算を繰り返す。反復計算が終了したときに得られた法線を積分することで高さマップ (ハイトフィールド) が得られる。

4. 実験

4.1 実験環境

使用したカメラは図 4 の株式会社アルゴの 3CCD マルチスペクトルカメラ FD-1665 である。二つのカラーセンサーと NIR 近赤外線センサーで構成されており、各カラーセンサーで 3 チャンネル、近赤外線センサーで 1 チャンネルの成分とそれぞれの波長のスペクトル感度を取得できる。使用したカメラを図 4、カメラのスペクトル分布を図 5 に示す。

図 5 に示されるように、カメラのそれぞれのチャンネルのスペクトル感度にはクロストークが発生している。そのため、撮影した入力画像に対し、チャンネルクロストークを除去し、それによって得られたデータを入力として提案手法を適用している。チャンネルクロストークを除去するためのスペクトル尖鋭化については紙面の都合上説明を省略する [2], [7], [9], [15], [17]。

今回使用した各光源のピーク波長と半値幅を表 1 に記す。

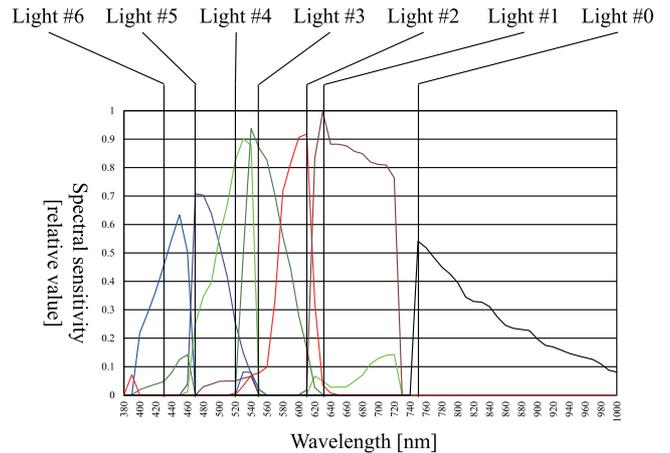


図 5 スペクトル分布

光源	ピーク波	半値幅
0	750nm	10nm
1	632nm	10nm
2	610nm	10nm
3	550nm	10nm
4	520nm	10nm
5	470nm	10nm
6	430nm	10nm

表 1 各光源のピーク波と半値幅

光源方向は鏡面球を事前に撮影することで求めておき、それ以降は光源とカメラの配置は変えないものとする。

実験は暗室で行う。反射する波長域が狭い物体でも補完情報を多くするために同じ色の光源は対称に設置した。近赤外線光源はカメラのすぐ隣に設置した。実験環境の様子を図 6 に示す。

照度差ステレオ法の問題において、光源が 6 つあると物体表面上の全ての点において必ず 3 つ以上の光源で照射されることが知られている [26]。しかし、鏡面反射が発生した場合、照度差ステレオ法に使用できる画像が 1 枚減少することになる。そこで、近赤外線光源をカメラの近くに配置することで、全ての点において必ず 4 つ以上の光源で照射されるようにした。

照度差ステレオ法では、光源間のなす角、すなわちベースラインを長くしたほうが、陰影の違いが大きくなるため

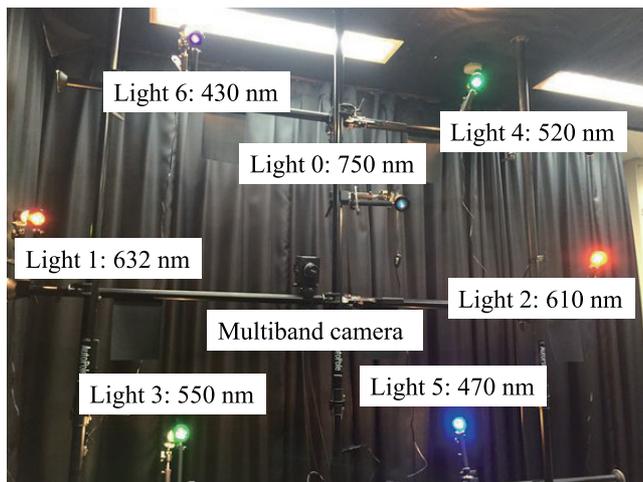


図 6 実験環境の図

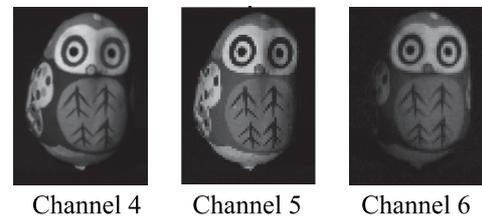
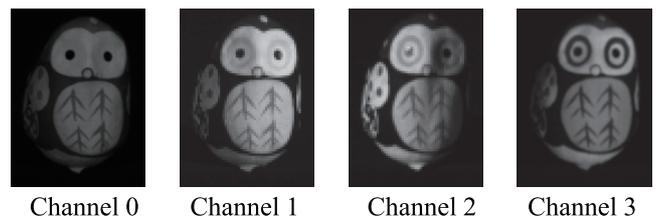


図 9 各チャンネルで取得した画像



図 7 計測物体



図 8 ガイド画像

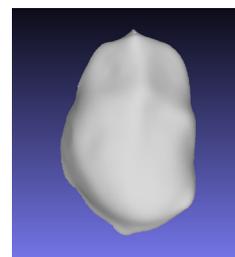


図 10 形状計測結果 (正面)

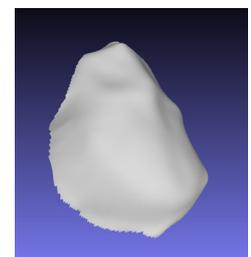


図 11 形状計測結果 (斜め)

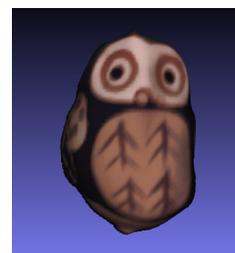


図 12 テクスチャマッピング
結果 (正面)



図 13 テクスチャマッピング
結果 (斜め)

精度が向上する。一方、ベースラインを長くすると、物体表面上において、照射される光源の数が少ない領域が増加する。すなわち、影の発生する面積が多くなってしまふ。そこで、ある立体角の範囲に光源の配置を限定する。ある円の中に点を7つ配置した際、お互いの距離が最も長くなる配置は、正六角形の頂点とその中心である。そのため、7つの光源を配置する照度差ステレオ法において、ある限定された範囲で配置する場合、正六角形の頂点とその中心に配置する方法が最適である。しかし、照度差ステレオ法において、ある3つの光源を選んだとき、それが同一直線上に載っている場合、より正確には、3つの光源方向が同一平面上に載っている場合、その3つの光源の組み合わせでは法線を推定することはできない。その3つの光源方向の組み合わせでは光源行列が縮退してしまうからである。そのため、正六角形の中心から少し位置をずらした場所に近赤外線光源を配置し、任意の3つの光源の組み合わせが同一直線上に載らないようにした。正六角形の中心にはカメラを設置した。

4.2 実験結果

計測物体はフクロウの置物(図7)を使用する。ガイド画像を図8に示す。得られた7チャンネル分の画像を図9に示す。提案手法によって得られた形状を図10~13に示す。



図 14 妖精の置物

また、他の多色物体でも同様に実験を行った。図14の物体を計測した結果を図15~18に示す。

図14の物体の右足付け根がうまく再現できていない理

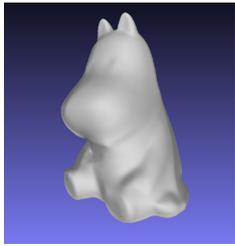


図 15 形状計測結果 (正面)



図 16 形状計測結果 (斜め)



図 17 テクスチャマッピング
結果 (正面)



図 18 テクスチャマッピング
結果 (斜め)

由は、影の影響があることや、法線が連続でなく急激に変化しているためである。テクスチャの首にあたる部分の色がうまく表現できていないことについては、影になっている範囲が広いことでアルベド推定がうまくいかなかったことが考えられる。

5. おわりに

本研究ではジョイントバイラテラルフィルタを用いた多波長カラー照度差ステレオ法により多色物体の三次元計測を行った。アルベドの平滑化部分のフィルタをジョイントバイラテラルフィルタを用いることで正しいアルベドと法線の値を得ることができた。今後の課題として、鏡面反射の影響と影の影響への対策が挙げられる。

Funding

This research was supported in part by MEXT KAKENHI Grant Number 15H05925, in part by MEXT KAKENHI Grant Number 15H02727, and in part by JSPS KAKENHI Grant Number 24700176.

参考文献

- [1] R. Anderson, B. Stenger, and R. Cipolla, "Color photometric stereo for multicolored surfaces," In *International Conference on Computer Vision*, pp. 2182-2189, 2011.
- [2] K. Barnard, F. Ciurea, and B. Funt, "Sensor sharpening for computational color constancy," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 18, no. 11, pp. 2728-2743, 2001.
- [3] G. J. Brostow, B. Stenger, G. Vogiatzis, C. Hernández, and R. Cipolla, "Video normals from colored lights," *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine In-*

- telligence*, vol. 33, no. 10, pp. 2104-2114, 2011.
- [4] A. Chakrabarti and K. Sunkavalli, "Single-image RGB photometric stereo with spatially-varying albedo," In *International Conference on 3D Vision*, pp. 258-266, 2016.
- [5] M. S. Drew, "Reduction of rank-reduced orientation-from-color problem with many unknown lights to two-image known-illuminant photometric stereo," In *Proceedings of International Symposium on Computer Vision*, pp. 419-424, 1995.
- [6] M. S. Drew, "Direct solution of orientation-from-color problem using a modification of Pentland's light source direction estimator," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 64, no. 2, pp. 286-299, 1996.
- [7] M. S. Drew and M. H. Brill, "Color from shape from color: a simple formalism with known light sources," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 17, no. 8, pp. 1371-1381, 2000.
- [8] M. Drew and L. Kontsevich, "Closed-form attitude determination under spectrally varying illumination," In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 985-990, 1994.
- [9] G. D. Finlayson, "Spectral sharpening: sensor transformations for improved color constancy," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 11, no. 5, pp. 1553-1563, 1994.
- [10] G. Fyffe, X. Yu, and P. Debevec, "Single-shot photometric stereo by spectral multiplexing," *IEEE International Conference on Computational Photography*, pp. 1-6, 2011.
- [11] 波部 齊, 白水 健介, 小林 俊彦, 松山 隆司, "多重光源画像を利用した三次元情報の画像計測," *電子情報通信学会論文誌 D*, vol. J89-D, no. 9, pp. 2065-2074, 2006. (in Japanese)
- [12] C. Hernandez, G. Vogiatzis, G. J. Brostow, B. Stenger, and R. Cipolla, "Non-rigid photometric stereo with colored lights," In *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 8, 2007.
- [13] K. Hirai, T. Tanimoto, K. Yamamoto, T. Horiuchi, and S. Tominaga, "An LED-based spectral imaging system for surface reflectance and normal estimation," In *International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems*, pp. 441-447, 2013.
- [14] H. Jiao, Y. Luo, N. Wang, L. Qi, J. Dong, and H. Lei, "Underwater multi-spectral photometric stereo reconstruction from a single RGBD image," In *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*, pp. 1-4, 2016.
- [15] R. Kawakami and K. Ikeuchi, "Color estimation from a single surface color," In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 635-642, 2009.
- [16] H. Kim, B. Wilburn, and M. Ben-Ezra, "Photometric stereo for dynamic surface orientations," In *European Conference on Computer Vision*, LNCS 6311, pp. 59-72, 2010.
- [17] 北川 克一, "3 波長ワンショット干渉計測におけるクロストーク係数推定," *計測自動制御学会産業文集*, vol. 10, no. 25, pp. 209-212, 2011. (in Japanese)
- [18] L. Kontsevich, A. Petrov, and I. Vergelskaya, "Reconstruction of shape from shading in color images," *Journal of Optical Society of America A*, vol. 11, pp. 1047-1052, 1994.
- [19] A. Landstrom, M. J. Thurley, and H. Jonsson, "Sub-millimeter crack detection in casted steel using color photometric stereo," In *International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications*, pp. 1-7, 2013.

- [20] G. Nam and M. H. Kim, “Multispectral photometric stereo for acquiring high-fidelity surface normals,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp. 57–68, 2014.
- [21] A. P. Petrov and L. L. Kontsevich, “Properties of color images of surfaces under multiple illuminants,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 11, no. 10, pp. 2745–2749, 1994.
- [22] S. Rahman, A. Lam, I. Sato, and A. Robles-Kelly, “Color photometric stereo using a rainbow light for non-Lambertian multicolored surfaces,” In *Asian Conference on Computer Vision*, pp. 335–350, 2015.
- [23] N. Roubtsova and J. Y. Guillemaut, “Colour Helmholtz stereopsis for reconstruction of complex dynamic scenes,” In *International Conference on 3D Vision*, pp. 251–258, 2014.
- [24] W. M. Silver, “Determining shape and reflectance using multiple images,” *Master’s thesis*, Massachusetts Institute of Technology, 1980.
- [25] 須田洋文, 岡見和樹, 前島謙宣, 森島繁生, “スキニングを用いた三色光源下における動的な三次元立体形状の再現,” In *Visual Computing / グラフィクスとCAD 合同シンポジウム*, article no. 21, pp. 7, 2012. (in Japanese)
- [26] J. Sun, M. Smith, L. Smith, S. Midha, J. Bamber, “Object surface recovery using a multi-light photometric stereo technique for non-Lambertian surfaces subject to shadows and specularities,” *Image and Vision Computing*, vol. 25, pp. 1050–1057, 2007.
- [27] 高谷剛志, 松下康之, StephenLin, 向川康弘, 八木康史, “多波長画像を用いた照度差ステレオ法の精度向上,” 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, vol. CVIM-183(12), pp. 1–8, 2012. (in Japanese)
- [28] 種田大地, 須田洋文, 前島謙宣, 森島繁生, “三色光源下における動物体の高精度かつ詳細な三次元形状再現,” In *画像の認識・理解シンポジウム*, pp. 1466–1472, 2011. (in Japanese)
- [29] Y. Tomita, S. Kaneko, T. Honda, “A Method for Shape Reconstruction of Solid Objects based on Color Photometric Stereo,” *SIG Technical Reports*, vol. 1992, no. 90 (1992-CVIM-080), pp. 115–120, 1992. (in Japanese)
- [30] 津田香林, 宮崎大輔, 古川亮, 日浦慎作, “マルチバンドカメラを用いたワンショット照度差ステレオ法,” *画像の認識・理解シンポジウム*, article no. PS2-44, 2 pages, 2016. (in Japanese)
- [31] G. Vogiatzis and C. Hernández, “Practical 3d reconstruction based on photometric stereo,” pp. 313–345. In: R. Cipolla, S. Battiato, and G. M. Farinella, “Computer Vision: Detection, Recognition and Reconstruction,” *Springer Berlin Heidelberg*, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [32] G. Vogiatzis and C. Hernandez, “Self-calibrated, multi-spectral photometric stereo for 3D face capture,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 97, pp. 91–103, 2012.
- [33] R. J. Woodham, “Photometric method for determining surface orientation from multiple images,” *Optical Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 139–144, 1980.
- [34] R. J. Woodham, “Gradient and curvature from photometric stereo including local confidence estimation,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 11, pp. 3050–3068, 1994.