Estimation of Surface Normal Vector Based on Majority Voting using Multi-Light Photometric Stereo

Hisao Fukumoto Member (Saga University, fukumoto@dna.ec.saga-u.ac.jp)

Hiroshi Terashima Non-member (Saga University, terasima@dna.ec.saga-u.ac.jp)

Masashi Ohchi Senior Member (Chiba Institute of Technology, masashi.ohchi@it-chiba.ac.jp)

Tatsuya Furukawa Member (Saga University, tach@ace.ec.saga-u.ac.jp)

Keywords: photometric stereo, specular reflection, linear least-squares, multi-light source

In this paper, we present an algorithm for estimating the surface normal vector of an object from images using multi-light source photometric stereo in the presence of highlights and shadows.

Woodham *et.al.* proposed the photometric stereo to determine the surface shape of an object using multiple images that was taken with the same viewpoint under the condition of different three or more light sources. The differences in the intensities of the images depend on the surface orientation of object. It is estimated surface normal vector by combining the intensities from all images.

Specularity and shadowing influence reconstructing object shape for the traditional three-light source photometric stereo because of its assumptions of a Lambertian surface and local shading. A number of methods have been developed to recover the shape of specular objects using multi-light source.

We propose strategy to eliminate the effects of specularity and shadowing using an algorithm of majority voting in the multi-light photometry. In this method, surface normal vectors are calculated by three-light photometric for every possible triplet combination using eight-light source without shadowing.

There are ${}_8C_3 = 56$ combinations of triplet illumination by using eight-light source. If the specular region is illuminated by only one light source, obtained ${}_7C_2 = 21$ of surface normal vectors are doubtful data. The 56 of surface normal vectors are voted in the azimuth–zenith space. The 21 of doubtful data of surface normal vectors are distributed in wide area of azimuth–zenith space as shown in Fig. 1. Therefore, remaining surface normal vectors, that are not affected by specularity, present a peak in the azimuth–zenith space. The surface normal vectors of the peak are recalculated by linear least-squares using light sources that are required by each three-light photometric stereo in these normal vectors.

We compared three methods, Method1; linear least-squares of eight intensity values under eight light sources, Method2; eliminating the highest and lowest intensity and

Fig. 1. Examples of distribution of normal vectors in the azimuth and zenith space at specular reflection points of sphere

Fig. 2. Distribution of zenith angle of estimated normal vector of sphere in simulation

Method3; our proposal method. The intensity values in a shadow area will tend to be very low. On the other hand, in a highlight area, the effect of specular reflection will tend to be very high intensity values. Figure 2 shows the distribution of zenith angle of estimated surface normal vectors of sphere in simulation. It is clear that the Method1 and Method2 failed to remove the effects of specularity. The experimental results using real ball agree approximately with these simulated results. The proposed method improves the accuracy of estimating surface normal vector.

多光源照度差ステレオ法における投票・多数決による 物体表面法線ベクトルの推定

正 員 福本 尚生* 非会員 寺島 広志*
上級会員 相知 政司** 正 員 古川 達也*

Estimation of Surface Normal Vector Based on Majority Voting using Multi-Light Photometric Stereo

Hisao Fukumoto*, Member, Hiroshi Terashima*, Non-member,
Masashi Ohchi**, Senior Member, Tatsuya Furukawa*, Member

In this paper, we present an algorithm for estimating surface normal vectors of object from images using multi-light source photometric stereo method in the presence of highlights and shadows. The conventional three-light photometric stereo can not deal with specularity and shadowing because of its simple assumption of a Lambertian surface and local shading. By high intensity or low intensity values, the specular reflection and shadowing will produce an incorrect surface normal in the traditional photometric stereo. We propose a new strategy to eliminate the effects of specularity and shadowing using an algorithm of majority voting in the multi-light source photometry.

キーワード：照度差ステレオ法，鏡面反射，最小二乗法，多光源

Keywords: photometric stereo, specular reflection, linear least-squares, multi-light source

1. はじめに

近年，物体形状の簡便な計測手法の要求が高まってきている。工業製品の開発，設計においても CAD データの利用が盛んに行われており，試作品や既成の製品形状から CAD データに変換することによって，物作りの効率化やコスト削減につながる。これまでに，物体形状を非接触で計測する様々な手法が提案されている⁽¹⁾。

物体にスリットビームや形が既知の光を照射し計測する方法では，一般的に光を照射する装置が複雑かつ高価である。複数台のカメラを用いたステレオ法では，2 台以上のカメラによって物体を撮影し，物体が撮影された画像上の位置から，三角測量の原理で物体までの距離を求める。この手法では，複数の画像における物体の対応関係を求める必要があるが，表面に模様のないテクスチャレスの物体に対しては，対応を求めることが困難であると共に，複数のカ

メラにより物体を撮影するために，一部の画像に映っている領域が他の画像では物体の影に隠れて映っていない場合には対応を求めることができない，オクルージョンの問題等がある。視体積交差法⁽²⁾と呼ばれる手法では，複数のカメラから得られるシルエットから物体の形状を求める。この方法では，テクスチャレスの物体に対しても，形状を求めることが可能ではあるが，原理上，物体の凸状の形状はシルエットとして観測されるが，凹面を計測することは難しい。

本研究で筆者らは，照度差ステレオ法に着目した。照度差ステレオ法とは，Woodham⁽³⁾らが提案した手法で，三つ以上の異なる光源を順次照明して得られる複数枚の画像によって，その画像の濃淡値を基に物体表面の法線ベクトルを求める手法である。表面法線ベクトルが求められると，積分等の処理を経て物体形状の復元が可能である。1 台のカメラによって画像を取得するため，ステレオ法のように画像間の対応を求める必要がなく，物体表面がテクスチャレスであっても形状を求めることが可能である。さらに，物体を照明する光源の方向を変えるだけであるので，レーザー光等を走査するような特別な機構も必要ない。

照度差ステレオ法における問題点として，影や表面の反射特性の問題がある。3 光源照度差ステレオによる精度の良い形状復元には，大きく異なる光源方向での配置が必要

* 佐賀大学理工学部電気電子工学科
〒 840-8502 佐賀市本庄町 1 番地
Faculty of Science and Engineering, Saga University
1, Honjo-machi, Saga 840-8502

** 千葉工業大学工学部電気電子情報工学科
〒 275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1
Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology
2-17-1, Tsudanuma, Narashino, Chiba, 275-0016

であるが、物体形状によっては影の領域が増加し、3 光源によって共通して照明される領域も減り、共通して照明される領域以外では、形状を正確に復元することができない。また、通常は Lambert の表面反射特性を仮定していることから、鏡面反射を起こすような物体の復元は不可能である⁽⁴⁾。そこで、多光源を用いる手法が提案されている。四つの光源を用いた手法⁽⁵⁾⁽⁶⁾では、4 光源のうちから、全ての三つの光源の組み合わせ（この場合 ${}_4C_3 = 4$ ）で照度差ステレオの計算を行い、得られた四つの表面反射率のうち、最も小さいものを選択する。これは、一つの光源による画像だけに鏡面反射成分が含まれていると仮定すると、鏡面反射の影響を受けない光源の組み合わせでは、最小の表面反射率を示すことを利用している。S.Barsky ら⁽⁷⁾は、最小二乗法により鏡面反射と影の影響を小さくする最も簡単な手法を提案している。

H.Rushmeier ら⁽⁸⁾は 5 光源による手法を提案している。五つの光源で照明された点の各輝度値を大きいものからソートし、最大値、最小値を除いた三つの輝度値を利用して照度差ステレオを解くという手法である。輝度の最大値は鏡面反射、輝度の最小値は影の影響の可能性があると排除している。6 光源による手法⁽⁹⁾も提案されているが、基本的な考え方は H.Rushmeier らの考え方と同じである。しかしながら、鏡面反射の影響が一つの光源に収まらない場合も考えられ、そのような場合には、これらの手法は最適とは言えない。また、多くの手法^{(5)~(7)(9)}で、実際には鏡面反射を区別するために、複数光源により得られた反射率の分散等を基にした閾値処理を行っており、閾値の設定によって結果が左右される。本研究では、鏡面反射や影の影響を除去する手法として、新たに投票・多数決による手法を提案する。本提案手法では、鏡面反射を判定する閾値を理論的には設定する必要がない。シミュレーションと実験結果から、H.Rushmeier らによって提案されている手法と比較しても本手法が有効であることを示す。

2. 照度差ステレオ法

物体表面が拡散反射だけを起こす拡散反射表面であると仮定し、その表面の反射率を k_d とおく。さらに、照明する光源は平行光源を仮定し、光源の単位方向ベクトルを $\mathbf{S}(s_x, s_y, s_z)^T$ とする。物体表面のある点の単位法線ベク

Fig. 1. Photometric stereo method.

トルを $\mathbf{n}(n_x, n_y, n_z)^T$ 、その点における物体の明るさを I_d とすると、

$$I_d = k_d \times (\mathbf{S} \cdot \mathbf{n}) = k_d \cos(\theta) \dots \dots \dots (1)$$

で表すことができる。ここで $\cdot$ は内積の演算を示す。照度差ステレオ法では、Fig.1 に示すように、三つ以上 ($m \geq 3$) の光源により物体を照明するために、光源方向ベクトル $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_m$ により構成される行列 $\mathbf{L} = (\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_m)^T$ が得られる。また、各光源より照明された時に計測される各画素点の明るさ I によるベクトル $\mathbf{I} = (I_1, I_2, \dots, I_m)^T$ を考えることができる。

(1) 式が、 m 個の光源および物体の明るさのそれぞれで成り立つので、それらを連立させた式は、

$$\mathbf{I} = k_d \times (\mathbf{L}\mathbf{n}) \dots \dots \dots (2)$$

のように書ける。これは、擬似逆行列 $\mathbf{L}^+$ ⁽¹⁰⁾ を用いて、

$$k_d \mathbf{n} = \mathbf{L}^+ \mathbf{I} = (\mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{I} \dots \dots \dots (3)$$

が得られ、 $|\mathbf{n}| = 1$ であるので、

$$k_d = |(\mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{I}| \dots \dots \dots (4)$$

$$\mathbf{n} = ((\mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{I}) / k_d \dots \dots \dots (5)$$

のように表面反射率と物体表面法線ベクトルを最小二乗法的に求めることができる⁽⁹⁾。

〈2・1〉 表面の反射 プラスチックに代表される物体の表面は二色性反射モデルがよく使用される。このモデルはコンピュータグラフィックスの分野等における Phong の反射モデルに対応する⁽¹¹⁾。物体から反射される光 $\mathbf{I}$ は二つの異なる成分による線形結合で記述可能であると仮定し、以下の式で表現する。

$$\mathbf{I} = I_d + I_s \dots \dots \dots (6)$$

Fig.2 に表面反射モデルの説明図を示す。拡散反射光成分 I_d は Lambert の法則によって定義される。(1) 式のように、物体から反射される光の明るさは、反射が起こる面の単位法線ベクトル $\mathbf{n}$ と、物体を照明する光源の単位方向ベクトル $\mathbf{S}$ の内積によって決定される。ここで k_d は物体固有の拡散反射率である。Phong の反射モデルでは、鏡面反射光成分 I_s は先に述べた、反射が起こる面の単位法線ベクトル $\mathbf{n}$ と、光源の単位方向ベクトル $\mathbf{S}$ に加えて、視点方

Fig. 2. Reflectance model.

向の単位ベクトル $\mathbf{E}$ が必要になる。光源方向の単位ベクトル $\mathbf{S}$ と視点方向の単位ベクトル $\mathbf{E}$ のなす角を二等分する単位ベクトル $\mathbf{R}$ を求める。このベクトル $\mathbf{R}$ と面の単位法線ベクトル $\mathbf{n}$ のなす角を δ とおくと、

$$I_s = k_s \times (\mathbf{R} \cdot \mathbf{n})^j = k_s \times \cos(\delta)^j \dots \dots \dots (7)$$

と書ける。ここで k_s は物体固有の鏡面反射率を示す。また、 j はべき乗の係数であり、物体表面の材質によって決定される鏡面反射の輝点の大きさを示し、光沢度である。

〈2・2〉鏡面反射及び影の影響の除去法 前節でも述べたように、照度差ステレオ法において表面の鏡面反射、影の問題が生じる。本研究では、投票・多数決による手法を新たに提案する。光源を多数使用する場合、光源の配置については考慮する必要があるが、光源の配置が大きく異なる場合には、鏡面反射を生じる光源（以下不適光源と称する）は少数の光源に限られる。また、多くの光源を使用することにより、全く光が照射されない領域が減り、影の影響も抑えることができる。

本手法では、使用する全ての光源の中から、それぞれ三つの組み合わせを選択し照度差ステレオの計算を行い、表面法線ベクトルを求める。八つの光源を使用した場合は

$8C_3 = 56$ 個の組み合わせが考えられる。また、影の影響を抑えるために、画像において輝度値が著しく低い光源は組み合わせから除外している。照度差ステレオ法により求めた表面法線ベクトルから、その天頂角、方位角を求め、天頂角、方位角からなる空間（パラメータ空間）上に表面法線ベクトルを投票することを考える。

Fig. 3 に得られた表面法線ベクトルをパラメータ空間上に投票した例を示す（パラメータ空間は 90° （天頂角） $\times 360^\circ$ （方位角））。図では、光源数 8 個の場合における、影の影響のある点 (a)、拡散反射だけからなる点 (b)、鏡面反射の影響のある点 (c) の三つについて示している。

(a) の場合、影となっている光源を除いているために、全体の投票数は少なくなっているが、影の影響なく一つのピークを形成している。(b) の場合、鏡面反射、影の影響がなければ、パラメータ空間中の一点にピークをつくる。(c) の場合、不適光源を 1 個と仮定すると $7C_2 = 21$ 個の表面法線ベクトルは鏡面反射の影響を受けていると考えられる。それら 21 個の表面法線ベクトルは空間上に広くばらばらに分布し、他の $56 - 21 = 35$ 個の表面法線ベクトルは鏡面反射の影響がないため、パラメータ空間上の一点に集中することになる。従って、全ての光源の組み合わせにより得られた表面法線ベクトルが投票されたパラメータ空間上で、多数を示すものを選択する。選択された一点に所属するそれぞれの表面法線ベクトルについて、これらを求める際に利用した光源の全てを用いて、再度、最小二乗法的に法線ベクトルを求める。このようにすることによって、外乱の影響を抑えることができる。

以下では、本提案手法と従来の手法（最小二乗法だけ、最大値・最小値を除く手法）との比較を行った。

3. シミュレーション

〈3・1〉撮影条件 実験及びシミュレーションにおける撮影条件を Fig. 4 に示す。光源からの光は平行光を仮定し、光源の配置は Fig. 4 の座標系における、天頂角 α 、方位角 β で表記する。物体としては、理論的な法線方向が求められる球を対象物体とした。シミュレーションでは、仮想的な球を生成し、照射する光源位置を変化させて画像を作成

Fig. 3. Examples of distribution of normal vectors in the azimuth and zenith space at each point of surface.

Fig. 4. Experimental condition.

Fig. 5. Light position of each light source number.

した。物体表面の反射モデルについては Phong のモデルを用い、鏡面反射のある場合について検討を行った。この時、Phong のモデル、(1)、(6)、(7) 式のパラメータとして、実験結果の画像を参考に拡散反射成分を $k_d = 120$ とし、鏡面反射成分は $k_s = 200$ とした。また、物体の材質によって決まる鏡面反射の輝点の大きさを決定する係数を $j = 300$ とした。

光源の配置については、光源の天頂角を $\alpha = 30[\text{deg}]$ と固定し、方位角 β を、使用する光源数に応じて Fig. 5 のように設定した。上記パラメータにおいて、8 光源の場合の各画像を Fig. 6 に示す。後述する実験により撮影された球の画像を参考に、球の半径を $115[\text{pixel}]$ とし、明るさが 256 段階の 8bit の画像を作成した。

〈3・2〉 評価方法 照度差ステレオ法により物体表面法線ベクトルを推定する際に、前述した最小二乗法だけを用いた場合 (手法 1)、最大輝度値と最小輝度値を除いて最小二乗法を行う手法 (手法 2)、本研究で提案する手法 (手法 3) の三つを用いて推定結果の比較を行った。推定誤差については、各手法により推定された法線ベクトル $\mathbf{n}_e$ と、理論的に求められた法線ベクトル $\mathbf{n}_t$ の内積で評価した。球内部における内積の平均を求め以下の式で誤差を定義した。

Fig. 6. Pictures of sphere provided specular surface with different light source direction in simulation.

Fig. 7. Distribution of zenith angle of estimated normal vector in simulation.

Fig. 8. Distribution of estimated object reflectance in simulation.

$$err = \frac{1}{N} \sum \cos^{-1}(\mathbf{n}_e \cdot \mathbf{n}_t) [\text{deg}] \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 N は球領域内画素数である。

〈3・3〉 結 果 それぞれの手法で推定された物体表面の法線ベクトルから、天頂角を求めその分布を Fig. 7 に、表面の反射率を推定したものを Fig. 8 に示す。Fig. 7、Fig. 8 の黒い線は等高線を示している。また、表面の反射率は一定の値を取ることが望ましい。Fig. 8 より、最小二乗法だけを用いた手法 1 では、鏡面反射部分の表面反射率が他よりも高く推定されていることが分かる。したがって、Fig. 7 において、鏡面反射部分で誤差が生じている。手法 2 においては、各輝度値が最大値、最小値を示す光源を除いて計算しているにもかかわらず、鏡面反射の影響が一つの光源で収まっていないために、推定結果に鏡面反射の影響

Fig. 9. Relation between mean error and number of light sources with each method in simulation.

が現れている。一方、提案手法では多少の誤差は見られるが、手法2に比べても十分誤差が小さいことが確認できる。

また、光源数と誤差の関係を Fig. 9 に示す。光源数を3から9個まで増やした場合の、各手法における誤差を示している。手法2は光源数が5個以上でないと適用できないアルゴリズムであるので、光源数が5個以上で検討した。

手法1(Method1)の最小二乗法だけを用いた手法では、不適光源が一つと考えれば、光源数が増えるにつれて鏡面反射の影響が少なくなると期待されるが、実際は光源数が増えるにつれて不適光源数も増加することになり、誤差はそれほど小さくならない。手法2(Method2)の最大値、最小値を除く手法でも、上記の理由と同じで、光源数が増加するにつれて誤差が増えている。しかし、提案手法(Method3)では、6光源以上で顕著に誤差が小さくなっている。5光源以下では、どの光源においても影になってしまう領域が多く存在し、提案手法では、影の部分(著しく輝度値が低い)の法線を求められず、逆に誤差が大きくなっている。

以上のことより、本提案手法では、光源数6個以上において、他の手法よりも十分小さい誤差で法線ベクトルの推定が可能であることが分る。

4. 実験

〈4・1〉撮影条件 実験における撮影条件は前述の Fig. 4 と同様である。物体としては、半径 44[mm] のソフトビニール製の緑色ボールを対象とし理想的な球と仮定した。光源数は8光源とし、照度差ステレオ法では光源からの光は平行光を仮定しているため、物体に対して十分離れた位置に光源を配置した。物体から各光源までの距離は約 1.6[m] とし、光源の配置は Fig. 5(e) の8光源における配置とした。光源としては、60W のレフランプを使用し、それぞれの画像のヒストグラムより、球の領域がほぼ同じ明るさになるように、距離を微調整した。

物体の画像は、カメラに対して平行射影を仮定しているため、カメラの位置もできる限り物体から遠い位置とし、0.6[m] の位置に固定した。カメラにはデジタルカメラ

Fig. 10. Pictures of sphere provided specular surface with different light source direction in experiment.

Fig. 11. Distribution of zenith angle of estimated normal vector in experiment.

Fig. 12. Distribution of angles between estimated normal vector and ideal normal vector in experiment.

OLYMPUS CAMEDIA C-3040を使用した。撮影された画像サイズは 640x480[Pixel] である。シミュレーションの場合と同様に、最小二乗法だけ(手法1)、最大と最小輝度値を除く手法(手法2)、提案手法(手法3)の各手法で法線ベクトルの推定結果を比較した。また、提案手法でのパラメータ空間は天頂角(0~90deg)を2度毎に45段階、方位角(0~360deg)を10度毎に36段階の45×36の空間とし投票を行った。多数決により選択された一点に所属する法線ベクトルについて、再度、光源情報を使用した最小二乗法によって法線ベクトルを求めた。

〈4・2〉実験結果 Fig. 10 に、実験で撮影された8光

Table 1. Comparison of mean error and processing time.

	Mean error [deg]	processing time[s]	processing time ratio
Method1	8.676	0.125	1.000
Method2	8.272	1.391	11.128
Method3	7.044	2.765	22.120

CPU: Intel CoreDuo 1.6GHz OS: Windows XP RAM: 1GB

源による画像を示す。図に示すように鏡面反射を示す物体を対象とした。各手法により推定された物体表面の法線ベクトルから天頂角を求め、その分布を示したものを Fig. 11 に、推定された法線ベクトルと理論的に求められた法線ベクトルのなす角度の分布を Fig. 12 に示す。シミュレーションの結果と比べると若干誤差が大きいものの、ほぼ同等の結果が得られている。Fig. 11 より、手法 1 では、鏡面反射の部分で誤差が大きいことが見てとれる。また、手法 2 と手法 3 は、Fig. 11 では、両者の違いがはっきりしないが、Fig. 12 のように、内積の分布を見ると、本論文で提案した手法 3 は手法 2 に比べて、特に球の周辺部分、つまり影を生じる部分において、誤差が改善されていることがわかる。Table 1 に各手法での平均誤差及び、表面法線ベクトルを求めるまでの計算時間を示す。実験においては、光源方向の誤差、光源の照明強度の不均一性、環境光、カメラのノイズ等の影響が考えられ、平均誤差はかなり大きな結果となっている。しかし、各手法の平均誤差を比較しても、提案手法が誤差を低く抑えることができることが分る。

Table 1 において、各手法における、表面法線ベクトルを求めるまでの演算時間の比較も示している。手法 1 では、あらかじめ全ての光源方向ベクトルから逆行列の演算をしており、各点の輝度値を基に計算を行っている。手法 2 では、使用する光源の組合せが変化することから、各画素の輝度値毎に逆行列の演算も含めて計算を行っている。使用する光源の組合せ全てにおいて、あらかじめ逆行列を求めておくことも可能であるが、今回は毎回逆行列の演算を行っている。手法 3 では、使用する光源全ての組合せにおいて法線ベクトルを求め、天頂角、方位角の空間に射影しピークを求め、さらにピークを示した法線ベクトルを得た時の光源の組み合わせ全てを利用して、再度、最小二乗法で法線ベクトルを求める演算を行っている。手法 1 の演算時間を 1 とすると、提案手法は約 22 倍の演算量になるが、誤差を十分小さく抑えることが可能であり、計測に光走査を必要とするレンジセンサ等を使用した手法や、対応点探索演算やオクルージョン問題を含む、複数台のカメラを用いた受動型ステレオ法等、他の一般的な三次元形状計測手法と比較しても、十分高速な計測が可能であると考えられる。したがって、本提案手法は有効かつ有用な手法といえる。

5. むすび

本研究では、照度差ステレオ法により物体表面法線ベクトルを求める際に、鏡面反射や影の影響を抑えるために、

多数（6 個以上）の光源を用い投票・多数決のアルゴリズムに基づく新たな手法を提案した。鏡面反射の影響を受けた表面法線ベクトルは、影響のないものと比べてその方向が大きく異なることから、天頂角、方位角のパラメータ空間に投票した場合に、空間上に広く分布する。鏡面反射の影響を受けない表面法線ベクトルは、空間上の 1 点に集約される。したがって、空間上で最も得票数の多い表面法線ベクトルは鏡面反射の影響を受けていないとみなせる。本提案手法により、計算コストは増えるものの、従来の手法よりも誤差を低く抑えることに成功した。シミュレーションや実験による検討によって、本手法が従来手法に比べて有効であることを確認した。なお、本提案手法は、光源位置が既知であり各光源の明るさも一定であると仮定している。しかしながら、実験においては、光源の位置、物体、カメラ位置等を正確に調整することは実質上難しく、これらの位置の誤差の影響は避けられない。光源位置に誤差が含まれていると、パラメータ空間の一点に投票が集まらない可能性がある。これは、各光源の明るさの違いでも同様なことが起こると考えられる。したがって、ノイズの影響を受けやすい手法であると思われる、ノイズに対するロバスト性の向上が重要な課題である。この課題に対しては、パラメータ空間の分割領域を広げる等の対応が考えられる。実験においても行っているが、パラメータ空間の分割数を小さくし、鏡面反射の影響によって大きくベクトルが異なるものだけを排除して、鏡面反射の影響の少ない光源だけを使用し、最小二乗法的に法線ベクトルを求めることで対応している。また、光源位置の校正手法や、光源方向を未知として、画像から光源位置を推定する手法の導入等の対策が考えられる。

（平成 20 年 4 月 16 日受付，平成 20 年 7 月 8 日再受付）

文 献

- (1) S. Iguchim and K. Sato: "3D Imaging techniques for measurement", SHOKODO. Co., Ltd (1990) (in Japanese) 井口征士・佐藤宏介:「三次元画像計測」, 昭晃堂 (1990)
- (2) W.N. Martin and J.K. Aggarwal: "Volumetric descriptions of objects from multiple views", *IEEE Trans. PAMI*, Vol.5, No.2, pp.150-158 (1983)
- (3) R.J. Woodham: "Photometric method for determining surface orientation from multiple images", *Optical Engineering*, Vol.19, No.1, pp139-144 (1980)
- (4) S. Fukui, Y. Iwahori, R.J. Woodham, and A. Iwata: "Classification of surface curvature from shading images using neural network and illumination planning", *Trance. IEICE*, Vol.J83-D-II, No.2, pp.610-622 (2000) (in Japanese) 福井真二・岩堀祐之・ロバート J. ウッドハム・岩田彰:「ニューラルネットワークとイルミネーションプランニングを用いた濃淡画像からの曲面の分類」, 信学論, **J83-D-II**, 2, pp.610-622 (2000)
- (5) E.N. Coleman and R. Jain: "Obtaining 3-dimensional shape of textured and specular surfaces using four-source photometry", *Computer Graphic and Image Processing*, Vol.18, pp.309-328 (1982)
- (6) F. Solomon and K. Ikeuchi: "Extracting the shape and roughness of specular lobe objects using four light photometric stereo", *IEEE Trans. PAMI*, Vol.18, No.4, pp.449-454 (1996)
- (7) S. Barsky and M. Petrou: "The 4-source photometric stereo technique for three-dimensional surfaces in the presence of

highlights and shadows”, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.25, No.10, pp.1239–1252 (2003)

- (8) H. Rushmeier, G. Taubin, and A. Guezic: “Applying shape from lighting variation to bump map capture”, *Eurographics Rendering Workshop*, pp.35–44 (1997)
- (9) J. Sun, M. Smith, L. Smith, S. Midha, and J. Bamber: “Object surface recovery using a multi-light photometric stereo technique for non-lambertian surfaces subject to shadow and specularities”, *Image and Vision Computing*, Vol.25, No.7, pp.1050–1057 (2007)
- (10) 徐 剛・辻 三郎:「3次元ビジョン」, 共立出版 (1998)
- (11) S. Tominaga and S. Ohhashi: “A color reflection model for object surfaces”, *Trans. IPS, Japan*, Vol.33, No.1, pp.37–45 (1992) (in Japanese)
富永昌治・大橋伸一郎:「物体のカラー反射モデル」, 情処学論, **33**, 1, pp.37–45 (1992)

福本 尚生 (正員) 1973年11月5日生。2002年3月佐賀大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。同年4月佐賀大学大学院工学系研究科生体機能システム制御工学専攻助手。2007年4月同助教。現在に至る。旧姓は徳島。細胞計測システム, コンピュータビジョン, 生体信号処理に関する研究に従事。博士(工学)。計測自動制御学会, 電子情報通信学会, 日本生体医工学会, 日本サイトメトリ学会各会員。

寺島 広志 (非会員) 1985年2月20日生。2007年3月佐賀大学理工学部電気電子工学科卒業。同年4月佐賀大学大学院工学系研究科博士前期課程生体機能システム制御工学専攻入学。現在に至る。照度差ステレオ法による物体形状復元の研究に従事。

相知 政司 (上級会員) 1964年12月8日生。1989年3月長崎大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月NTTに入社。1991年4月佐賀大学理工学部助手。1993年4月同電子工学科助手へ配置替。2000年4月同講師。2002年1月同助教授。2008年4月千葉工業大学工学部電気電子情報工学科教授。現在に至る。数値電界解析を応用した分布誘電率推定に関する研究並びに計算機応用工学に関する研究に従事。博士(工学)。計測自動制御学会, 電子情報通信学会, 日本シミュレーション学会会員。

古川 達也 (正員) 1956年6月21日生。1984年3月九州大学大学院工学研究科博士後期課程単位取得退学。同年4月長崎大学工学部助手。1986年佐賀大学理工学部電気工学科講師。1987年同助教授。1993年4月同電子工学科助教授へ配置替。2001年4月電気電子工学科教授。現在に至る。数値解析, 計算機応用工学に関する研究に従事。工学博士。計測自動制御学会, 日本シミュレーション学会, 日本AEM学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会会員。