

## チンダル現象を利用した物体表面の三次元位置及び法線推定

小山 亮<sup>†</sup> 船富 卓哉<sup>††</sup> 飯山 将晃<sup>†††</sup> 角所 考<sup>††††</sup> 美濃 導彦<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 京都大学大学院情報学研究科

〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

<sup>††</sup> 京都大学学術情報メディアセンター

〒 606-8501 京都市左京区吉田二本松町

<sup>†††</sup> 京都大学経済学研究科

〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

<sup>††††</sup> 関西学院大学理工学部

〒 669-1337 兵庫県三田市学園 2 丁目 1 番地

E-mail: †{koyama,funatomi,iiyama,minoh}@mm.media.kyoto-u.ac.jp, ††kakusho@kakusho-lab.org

あらまし 映画や VR 装置の合成映像への利用を目的として多種多様な実物体の形状を獲得する需要が増えている。そこで本研究では物体について写実性の高い三次元モデルを獲得するため、実物体平面の三次元位置とその点での法線方向を推定することを目的とする。本手法ではチンダル現象を利用してこの問題に対処する。チンダル現象とは、微粒子で満たされた媒介中を通過する光の道筋が観測される現象である。この現象により観測される入射光の道筋に基づいて物体表面での到達位置を推定し三次元形状を計測する。また同時に鏡面反射光を観測することで物体表面の法線方向も推定する。

キーワード チンダル現象, 三次元形状, 法線方向, 鏡面反射

## Estimation the Direction of Specular Reflection to Acquire Reflection Characteristics by Using Tyndall Effect

Akira KOYAMA<sup>†</sup>, Takuya FUNATOMI<sup>††</sup>, Masaaki IYAMA<sup>†††</sup>, Koh KAKUSHO<sup>††††</sup>, and Michihiko MINOH<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Engineering, Kyoto Univ.

Honmachi, Yoshida, Sakyou-ku, Kyoto-Shi, Kyoto, 606-8501 Japan

<sup>††</sup> Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto Univ.

Nihonmatsu-chou, Yoshida, Sakyou-ku, Kyoto-Shi, Kyoto, 606-8501 Japan

<sup>†††</sup> Graduate School of Economics, Kyoto Univ.

Honmachi, Yoshida, Sakyou-ku, Kyoto-Shi, Kyoto, 606-8501 Japan

<sup>††††</sup> Graduate School of Science and Technology, Kwansei Gakuin Univ. 1-banchi, gakuen-2-tyoume, Sanda-Shi, Hyogo, 669-1337 Japan

E-mail: †{koyama,funatomi,iiyama,minoh}@mm.media.kyoto-u.ac.jp, ††kakusho@kakusho-lab.org

**Abstract** There is an increasing demand for acquiring the shapes of objects for 3D models in CG/VR fields, and laser rangefinder have been estimated the shape. However, there are some objects whose shapes laser rangefinder can not estimate. To overcome this insufficiency, we use Tyndall effect and observe the behavior of the incident light and reflected light, and estimate the shapes. In this study, we estimate the surface position and the normal direction there from the incident light and reflect light. We evaluated the effectiveness of the proposed method, and we checked that we were able to estimate the shape by it.

**Key words** Tyndall Effect, 3D Shape, Direction of Normal, Specular Reflection

## 1. はじめに

映画やVR(Virtual Reality)装置に用いられる合成映像への利用を目的として多種多様な実物体の三次元形状を獲得する需要が増えている。多種多様な実物体の三次元形状を推定することで、より写実性の高い三次元モデルの獲得を目指したい。

本研究では物体表面の三次元位置とその点での法線方向を推定することを目標とする。従来は高精度な形状獲得手法としてレーザレンジファインダが用いられていた[1][2]。この装置を用いて、物体表面にレーザ光を照射し、その拡散反射光を観測することで物体の形状を獲得していた。しかし、金属や黒色物体など拡散反射が生じない物体に対してはこの装置で形状計測を行うのは困難である。この理由として、金属に関しては拡散反射ではなく鏡面反射が発生し、これは場所によっては反射光が観測できないという性質を持ち、黒色物体に関して入射光が吸収され反射光が観測できないという性質を持つことが挙げられる。

そこで本研究ではチンダル現象を利用して入射光や反射光の散乱光を観測することで入射光や鏡面反射を含む反射光の振る舞いをカメラに直接入らないものも含めて直接観測し、その画像を用いて反射位置と法線方向を求める。チンダル現象とは、不規則に運動する無数の粒子が存在する媒介中を強い光が通過する際、粒子が光を散乱させるために光の通る道筋が光って見える光学現象である。

2節では、光の反射やそれを近似する反射モデルについて説明し、反射モデルを利用して反射特性を推定した従来研究について述べる。3節では、チンダル現象を用いて三次元空間での入射光方向とSpecular Spike方向を推定する方法について述べる。4節では、実際に様々な物体に提案手法を適用した結果を示す。また、それについて評価を行い、考察を行う。5節では、本研究のまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 光の反射現象

本節では、光の反射現象について説明する。光の反射は拡散反射(図1)と鏡面反射(図2)の二つに大別できる。拡散反射とは、物体表面に入射した光が物体表面上で乱反射する現象で、反射光の強度は全方向に均一である。そのため、どの方向から見ても反射光の強度は変わらない。鏡面反射は、物体表面に入射した光が特定の方向に反射するという現象で、正反射方向の強い反射(Specular Spike)と正反射方向近辺に広がった反射(Specular Lobe)の二つの反射からなる。そのため、見る方向によって強度が変わる。本研究では入射光方向とSpecular Spike方向を二等分する方向が法線方向であることを利用して法線方向を推定する。

Torrance-Sparrow [3] や Phong [4] の反射モデルによる

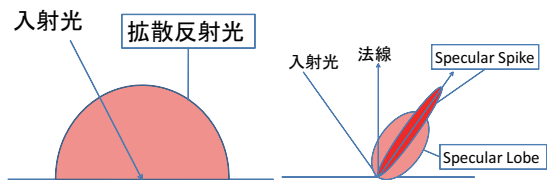


図1 拡散反射

図2 鏡面反射

と入射光方向とSpecular Spike方向を二等分した方向が物体表面の法線方向となるので、本稿ではこのモデルを採用し推定した入射光方向とSpecular Spike方向から法線方向を求める。

## 3. チンダル現象を利用した三次元形状・入射光方向・Specular Spike方向推定

本節ではチンダル現象を利用して物体表面の三次元位置・入射光方向・Specular Spike方向を推定する方法について述べる。

### 3.1 チンダル現象

チンダル現象とは、不規則に運動する無数の粒子が存在する媒介中を強い光が通過する際粒子が光を散乱させるために光の通る道筋が光って見える光学現象である。図3はチンダル現象が発生している様子を現した図である。通常空気中を通過する光は観測できないが、微粒子が無数に存在している空間を通過する光の道筋は観測できる。このように、チンダル現象下では物体表面で反射した光を直接観測できるだけでなく、入射光が媒介中を通る道筋と反射光の広がりまで観測できる。

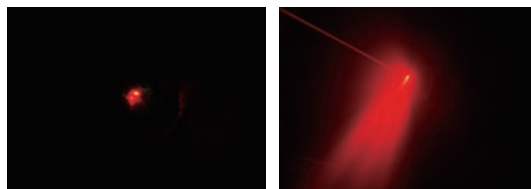


図3 チンダル現象：物体に赤色レーザを当てた場合の観測画像(左)煙なし(右)煙あり

本稿では以下のような環境で撮影を行い、その画像を解析する。チンダル現象下で入射光と反射光を観測するために、密閉した空間に煙を充満させてその中に物体を置き暗室で赤色レーザポインタを物体に照射し、その様子を複数台のカメラで観測する。観測画像の例を図4に示す。入射光および鏡面反射・拡散反射光が煙の中を通る様子が同時に観測されていることが確認できる。ここからレーザ光の反射位置・入射光方向・Specular Spikeを推定する。ここで、カメラの外部パラメータやレンズ歪みを含む内部パラメータはあらかじめ較正されているものとする。

### 3.2 画像上でのレーザ光反射位置及び入射光方向推定

画像上でのレーザ光の反射位置と入射光方向を推定する．観測画像の歪みをカメラ内部パラメータを用いて補正したのに対し，画像上で入射光の道筋に相当する線分と反射位置に相当する点を抽出する．赤色レーザ光の口径を  $d(\text{mm})$  としレーザ光が指向性を持つとすると，このレーザ光により三次元空間中の直径  $d(\text{mm})$  の円筒領域でチンダル現象による発光が生じる．これが入射光となる．この様子をカメラで観測すると，この発生現象は画像上で幅が  $W$  ピクセル以下の太さの直線状の赤色領域として観測される．これを次の画像処理によって抽出する．

#### 画像上での入射光方向推定

まず画像（図4左上）から赤成分の強い領域を二値化によって抽出し，これを領域 A とする（図4右上）．この領域 A を  $W/2$  回収縮させた後， $W/2$  回膨張させる．こうすることで太さが  $W$  より大きい部分だけが残る．これを領域 B とする．領域 B を領域 A から除去することで，ノイズだけでなく反射位置付近の広範囲にわたる反射光や写り込みの部分を除くことができる．以上の処理を行った結果を図4左下に示す．これをさらに細線化することで線分を抽出し，それを画像上での入射光の道筋とする．

#### 画像上での反射位置推定

次に画像上での反射位置を推定する．その手掛かりとして，反射位置が入射光の道筋に相当する線分上あるいはその延長線上にあることに注目する．入射光の強度を  $L$  とすると煙中でチンダル現象によって散乱する光の強度は  $\alpha L (\alpha \ll 1)$  となる．その一方で入射光が物体表面で反射しカメラに直接入ってくる反射光の強度は反射係数  $\beta$  を用いて  $\beta L$  となる．光を完全に吸収する，つまりは  $\beta = 0$  となるような物体でない限り  $\alpha \ll \beta$  であり，このことを用いると，画像内では反射位置に相当する部分が最も明るくなる．そこで抽出した線分を含む直線上で最も画素値が大きい点を反射位置とする．反射位置と入射光の抽出結果を図4右下に示す．水色の線分が入射光に相当する線分で，その片端の円が反射位置に相当する点である．

### 3.3 画像内での Specular Spike 方向推定

3.2 節では画像内での入射光方向を推定した．本節では観測画像から Specular Spike 方向を推定する方法について述べる．

#### 3.3.1 画素値による比較とその問題

反射位置で生じる反射光は，最も鏡面反射の強い方向すなわち Specular Spike 方向において最も強度が大きい．このため，画像上で反射位置から等距離にある画素の画素値を比較すると，入射光方向及び強い鏡面反射が生じる方向に位置する画素の画素値が大きくなり，それ

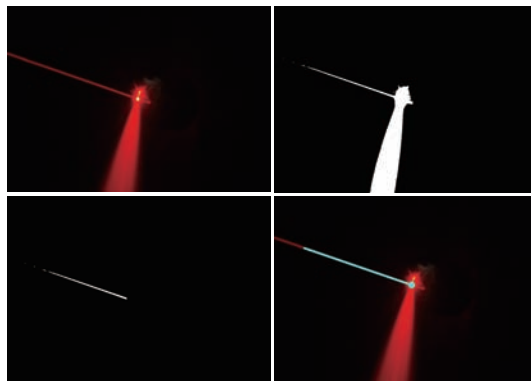


図4 画像処理過程 左上:観測画像, 右上:二値化画像, 左下:太さ  $d(=15)$  以上の部分を除いた画像, 右下:入射光および反射位置検出結果

以外の画素の画素値は小さくなるはずである．その様子を示したのが図5である．拡散反射と鏡面反射が同時に起こる場合，任意の画素の画素値  $I$  は，拡散反射のみが生じた場合に観測される場合の画素値  $I_d$  と鏡面反射のみが生じた場合に観測される場合の画素値  $I_s$ ，さらに入射光のみが観測される場合の画素値  $I_{in}$  から構成され，次のように表せる．

$$I_{in} + I_d + I_s = I \quad (1)$$

$I_d$  は反射位置からの距離によって変化し，どの方向でも変わらず， $I_{in}, I_s$  は方向によって強度が変わるので，鏡面反射が起こる方向の画素はそれ以外の方向の画素より画素値が大きくなる．拡散反射が全方向に均等に反射し，鏡面反射が特定の方向とその方向付近に強く反射するとき，反射位置から等距離にある画素の画素値が，反射位置からの方向に応じてどのように変化するかを示したものを図6に示す．入射光方向では  $I_{in}$  が大きくなり，Specular Spike 方向では  $I_s$  が大きくなるため，基本的にピークは二つできるものと考えられる．従って，画像上での反射位置から等距離にある画素の中で入射光方向以外で画素値が極大となる画素が位置する方向のうち最大のものが Specular Spike 方向となる．

しかし，図6に示すような関係にならないことがある．なぜなら入射光や反射光の散乱光が物体表面で再度反射して写り込み，入射光方向でも Specular Spike 方向でもない方向の画素値の方が Specular Spike 方向の画素値より大きくなることがあるからである．図7に写り込みの激しい画像の例を示す．反射位置を中心として赤い領域が広がっている．拡散反射の影響に加え，物体がある領域では入射光や反射光の散乱光の写り込みが生じるため周囲より明るくなっており，Specular Spike 方向推定の妨げとなっている．Specular Spike 方向を正確に推定するためには，このような散乱光の再反射を考慮する必要がある．

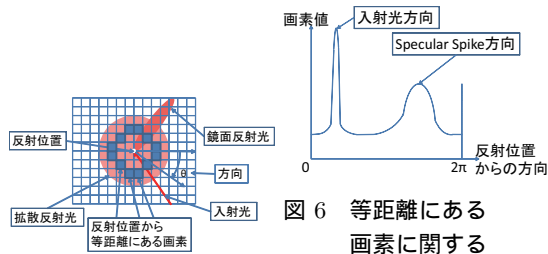


図5 画素値分布

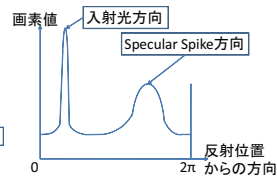


図6 等距離にある画素に関する方向と画素値の関係

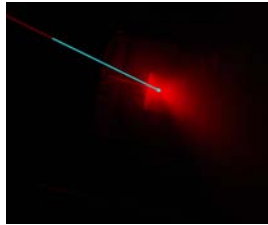


図7 写り込みの激しい画像

### 3.3.2 画像内での反射位置からの距離と画素値の関係に関する仮定

写り込みの影響を受けないようにするためには、反射光の強さのみを反映している画素だけを用いて反射光の強度を推定する必要がある。反射光以外の要素の影響を受けている画素を除外するために、まず写り込みがなかった場合の画素値  $I$  と画像内での反射位置からの距離  $x$  の関係をモデル化することを考える。

図8のような平行投影で近似して考える。すると、注目画素 ( $A'$ ) に到達する光は、反射位置 ( $O$ ) で反射した後  $A_0, A_1, A_2, \dots$  の粒子で散乱された光である。ここで散乱の度合いは一定であるとする。つまり、粒子  $A$  に光量  $I_A$  の光が入射した際に散乱される光量を  $\alpha I_A$  とする。

$O$  から粒子  $A_m (m = 0, 1, 2, \dots)$  までの距離を  $r_m$ 、画像上での反射位置 ( $O'$ ) と注目画素 ( $A'$ ) の距離を  $x$ 、粒子  $A_m$  から注目画素までの距離を  $R_m$  とする。以下では簡単のため反射光が拡散反射光のみである状況をまず考える。ケプラーの法則より、三次元空間においては、点光源から空間上で  $r$  離れた位置にある微小領域に到達する光の総量 ( $E$  とする) は  $r$  の二乗に反比例する。つまり点光源から照射される光の総量を  $L$  とすると  $\rho$  を定数として  $E = L\rho/r^2$  と表せる。

この法則を利用して  $A'$  に到達する光の総量を求める。粒子  $A_m$  に到達する光の総量は  $L\rho/r_m^2$  となり、粒子  $A_m$  で散乱する光の総量は  $\alpha L\rho/r_m^2$  となる。このうち  $A'$  まで到達する光の総量は  $R_m$  の二乗に反比例して  $\sigma$  を定数として  $\alpha L\rho\sigma/r_m^2 R_m^2$  となる。よって  $A_m$  から  $A'$  に到達する光の総量は  $r_m$  の二乗と  $R_m$  の二乗に反比例する。ここで  $R_i \gg |R_i - R_j| (i \neq j)$  であるとする。つまり、図8の注目画素に散乱光を照射する粒子点はカメラから十分離れた位置にあるとする。このとき、 $1/R_i^2 \approx 1/R_j^2$  とみなすことができ、 $A_m$  から  $A'$  に到達する光の総量は  $R_k$  によらず  $r_k$  の二乗のみに反比例するとみなせる。

これを利用し、図9で画像上での反射位置 ( $O'$ ) と ( $A'$ ) の距離を  $x$ 、( $A'$ ) に散乱光を照射する粒子  $A$  と三次元空間での反射位置 ( $O$ ) との距離を  $r$ 、 $O$  から直線  $AA'$  におろした垂線の足 ( $H$ ) と粒子  $A$  の距離を  $a$  とする。このとき  $A$  で散乱し、 $A'$  に到達する光の総量は  $k$  を定数として  $k/r^2$  と表せる。これを定数  $l$  を用いて有界区間 ( $-l \leq a \leq l$ ) において  $a$  に関して積分したものが ( $A'$ ) に到達する光の総量つまり画素値  $I$  となり、それは式(2)のように計算でき定数  $k$  を用いると画素値  $I = k/x$  となる。

式(2)は拡散反射のみが生じる場合にのみ有効であり、鏡面反射のように指向性を持つ反射の場合はこの式は成立しない。鏡面反射の場合次のような性質を有する。全方向に均等に反射する拡散反射光と違い、鏡面反射光は Specular Spike 方向付近に集中するため拡散反射ほど減衰しない。よって拡散反射光と鏡面反射光の総量が同じ場合でも、反射位置から遠ざかるにつれて拡散反射光のほうが弱くなっていく。つまり、拡散反射光と鏡面反射光の総量が両方  $L$  であるとする、画像上で反射位置から  $x$  離れた点の拡散反射光による画素値は  $I_d = Lk/x$  となるが、鏡面反射光による画素値は  $I_s > Lk/x$  となる。この性質を用い、 $k = Ix$  として  $k$  を求めていくと、拡散反射のみの場合は反射位置からの距離にかかわらず  $k$  が一定となるが、鏡面反射を含む場合は距離が離れるにつれて正しい値より大きくなってしまふ。

そのため  $I = k/x$  を使うと鏡面反射が強い方向ほど得られる  $k$  が正しい値より大きくなる。これを利用して Specular Spike 方向を推定する。

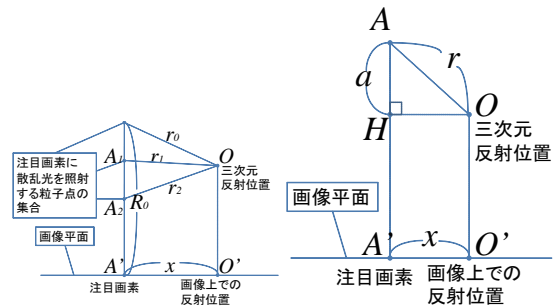


図8 散乱のモデル化 図9 減衰法則のモデル化

$$\begin{aligned}
 I(x) &= \int_{-l}^l \frac{k}{r^2} da \\
 &= \int_{-l}^l \frac{k}{a^2 + x^2} da \\
 &= \int_{-\beta}^{\beta} \frac{k}{x^2(1 + \tan^2 \delta)} \frac{x}{\cos^2 \delta} d\delta \quad (\sin \beta = \frac{l}{r}) \\
 &= \int_{-\beta}^{\beta} \frac{k}{x} d\delta \\
 &= \frac{2k\beta}{x}
 \end{aligned} \tag{2}$$



### 3.3.3 画像内での Specular Spike 方向推定

前節でモデル化した減衰法則を用いて画像内での Specular Spike の方向を推定する．ここで，入射光の反射位置を始点とし任意の方向  $\theta$  に向かう半直線上に位置する画素に注目する． $\theta$  方向への反射光の強度を  $k_\theta$  として，これを半直線上に位置する画素値から計算する．理想的には半直線上にある画素それぞれから得られる  $k_\theta$  の値は等しくなるはずであるが，実際には写り込みの影響がある部分や画素値が上限・下限付近の値をとる部分といった減衰法則に従わない部分があり，これを計算に含めると  $k_\theta$  が誤差を含んでしまう．そこで減衰法則に従う部分のみをロバスト推定を用いて抽出することを考える．

反射位置に近すぎる部分は，画素値の上限値をオーバーしてしまうほど明るくなってしまつたため減衰法則に従わなくなる．同様に，反射位置から離れすぎた部分は，画素値が画像観測時のノイズに埋もれるほど小さくなってしまつたため減衰法則に従わなくなる．

そこで，方向  $\theta$  にある全ての画素に対してそれぞれ  $k_\theta$  を計算して  $k_\theta$  の候補を得，それらの中央値をとる．こうすることで上記の外れ値の影響を受けずに本来の光の強度  $k_\theta$  が推定できる．

しかし，この  $k_\theta$  は拡散反射のみが生じる場合は正しく推定できるが，鏡面反射が生じる方向  $\theta$  では 3.3.2 で示したように  $k_\theta$  の値が大きくなってしまふ．よつて入射光方向を除いて  $k_\theta$  が極大になる方向のうち， $k_\theta$  が最大となる方向  $\theta$  を画像内での Specular Spike の方向とする．

## 3.4 推定結果のステレオ視

### 3.4.1 三次元空間での入射光の反射位置・入射光方向・Specular Spike 方向候補の獲得

複数カメラから得られた各画像上での入射光の反射位置・入射光方向・Specular Spike 方向をもとに，ステレオ視を用いて三次元空間での入射光の反射位置・入射光方向・Specular Spike 方向を推定する．ステレオ視を用いると，二方向から撮影した画像からそれらを推定することができる．従つて  $n$  台のカメラを用いると  ${}_nC_2$  通りの推定を行うことができる．各々の推定値には誤差が含まれるため，これら  ${}_nC_2$  個の推定値から最も誤差が小さいとみなせるものを抽出する．本節では  ${}_nC_2$  通りの推定値を得る手法について述べ，3.4.2 節でその中から最も誤差が小さいものを抽出する処理を述べる．

反射位置のステレオ視により，三次元空間での入射光の反射位置候補を獲得する．その求め方は以下の通りである．

カメラ  $N_1$  の画像上での反射位置に相当する点  $(x_{n_1}, y_{n_1})$  に対し，この点に対応するカメラ  $N_2$  上でのエピポーラ線と，3.2 節で得た入射光に相当する直線との交点を  $(x_{n_2}, y_{n_2})$  とする． $n = n_1, n_2$ ， $\lambda_N$  をカメラ  $N = N_1, N_2$  の実数パラメータ， $P_N$  をカメラ  $N$  の射影行列とし，式 (3) が成り立つような空間座標  $(X, Y, Z)$  を

$(x_{n_1}, y_{n_1})$  と  $(x_{n_2}, y_{n_2})$  の三次元空間上の位置として求められる．ここで， $XYZ$  座標系は外部キャリブレーションにより設定している

$$\lambda_N \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{pmatrix} = P_N \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

また，反射位置候補に加えて，三次元空間での入射光方向と Specular Spike 方向の候補も同様に獲得する．まず，カメラ  $N_1$  の画像上での入射光に相当する線分上のある一点に対し，カメラ  $N_2$  での画像上におけるその点の対応点をエピポーラ拘束を用いて獲得しステレオ視によってその点の三次元位置を求める．この三次元位置と先程得られた三次元反射位置を結ぶ線分を求めることで入射光方向の候補を獲得する．三次元空間上での Specular Spike 方向の候補も同様に獲得する．

### 3.4.2 三次元空間での入射光の反射位置・入射光方向・Specular Spike 方向推定

3.4.1 節で二枚の画像から得られた三次元空間での入射光の反射位置・入射光方向・Specular Spike 方向の候補を一組と考え，これらの中から最も正解に近い候補を選び，これを三次元空間での入射光の反射位置・入射光方向・Specular Spike 方向とする．まず  $n$  枚の画像から三枚の画像を選ぶ ( ${}_nC_3$  通り)．この三枚からは  ${}_3C_2$  通りの候補が得られる．その三枚の画像上で反射位置・入射光方向・Specular Spike が正しく推定できていれば，その  ${}_3C_2$  通りの候補が一致するはずである． ${}_3C_2$  通りの候補がどの程度一致しているから以下のようにして計算される．

${}_3C_2$  通りの反射位置・入射光方向・Specular Spike 方向を得る． ${}_3C_2$  通りの反射位置の中で最も離れた 2 点間の距離を  $d$ ，入射光方向の中で最も角度の差が大きい二方向間のなす角を  $\alpha_{in}$ ，Specular Spike 方向の中で最も角度の差が大きい二方向間のなす角を  $\alpha_{re}$  とすると，一致度は  $\max(\alpha_{in}, \alpha_{re})$  によって与えられる．なお， $d$  が閾値  $T$  より大きい，もしくは  $\alpha_{in}, \alpha_{re}$  のどちらかが  $T_\alpha$  より大きい場合は一致していないと見なす． ${}_nC_3$  通りの画像の選び方のうち，一致度が最も小さくなる三枚の画像を抽出する．

抽出された三枚の画像から得られる  ${}_3C_2$  通りの中の入射光方向，Specular Spike 方向の平均をそれぞれ  $ave_{in}, ave_{re}$  とし， ${}_3C_2$  通りの推定結果の中で  ${}_3C_2$  通りの平均から最も近いものを入射光方向と Specular Spike 方向の推定結果とする．入射光方向の平均との差，Specular Spike 方向の平均との差を計算する．入射光方向の平均との差および Specular Spike 方向の平均との差のうち，大きい方を評価値として，評価値が最小となるものを  ${}_3C_2$  通りの中から選ぶ．これを入射光方向と Specular Spike 方向の推定結果とする．

## 4. 実験

鏡面反射特性を持つ物体に対して提案手法を用いて三次元空間での反射位置・入射光方向・Specular Spike 方向を推定する実験を行い、結果を評価した。形状や法線が既知であり光の反射が Torrance-Sparrow の反射モデルに従う物体を用い、推定した三次元空間での入射光方向と Specular Spike 方向の精度を評価した。

### 4.1 実験環境

チンダル現象下で入射光と反射光を観測するために、密閉した空間に煙を充満させその中に物体を置き、暗室で赤色のレーザーポインタを当てた様子を4台のカメラで撮影した。カメラは解像度 2000\*3008 の一眼レフカメラを4台使用した。実験環境を図10, 11に示す。なお、実験装置を覆っているのはアクリル板であり、装置の寸法は 81cm\*81cm\*81cm である。

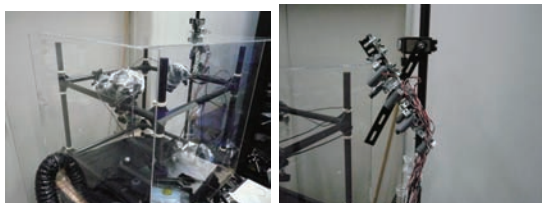


図10 撮影環境 図11 レーザ照射装置

使用物体は、形状がシンプルな図12に示すスチールトレイの裏(平面, 59mm\*63mmの長方形)を用いる。



図12 スチールトレイの裏

### 4.2 評価方法

本研究の評価のために鏡面反射の性質を用いる。今回用いる物体においては、物体表面への入射光方向と Specular Spike 方向の二等分線がその反射位置での法線方向となるモデルが適用できると考えられるので図12のスチールトレイの裏を利用する。また、手法の比較対象として、推定した反射位置群に関して距離クラスタリングを行った点群に対し、三角形パッチモデルを生成し、各点を頂点として含むパッチの法線の平均を用いる(以下パッチ手法と呼ぶ)。提案手法により推定した入射光方向、Specular Spike 方向から計算される法線、パッチ手法により計算される法線が既知の法線と比較してどの程度近いかによって精度を評価する。

### 4.3 結果

4.2の評価基準によりスチールトレイの裏において提案手法及びパッチ手法で推定される三次元位置及び法線方向の精度を評価する。

#### 反射位置推定

提案手法を用いてスチールトレイの裏の三次元形状を推定した。4台のカメラで合計120フレーム撮影し、116点の反射位置を獲得した。残りの4フレームについては画像が全体的に暗かったり、明るくなりすぎたりして入射光方向や反射位置がうまく推定できなかった。既知の形状に獲得した三次元位置の集合をプロットし、二方向から見た図が図13(a),(b)である。図の中で青色の点が獲得した三次元位置で、赤色の点の集合が正解の形状である。

また、獲得した点がどれだけ正解のスチールトレイの裏の表面に近いかを示す尺度としてスチールトレイの裏の平面からの距離を用いる。推定した三次元位置と正解のスチールトレイの裏との距離を  $d$  とし、それぞれの三次元位置について  $d$  を計算して評価する。それぞれのヒストグラムを図14に示す。

図13にあるように、提案手法により獲得した点群により大まかな球体の形状を獲得できた。図14にあるように、獲得した三次元位置と正解の平面との距離(誤差)は概ね3mm以内に収まっており誤差の平均は0.982mmであった。今回実験に用いた装置において、1mmの誤差は画像上では3~5ピクセルに相当する。画像上でこのような誤差が生じた原因としては、レーザー光が太い・鏡面反射光が強いなどの理由で画素値が最大となる領域が広がったことや、キャリブレーション誤差によるものが挙げられる。

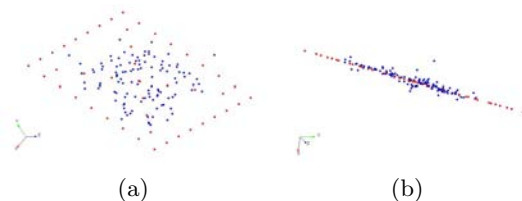


図13 スチールトレイの裏における形状の推定結果

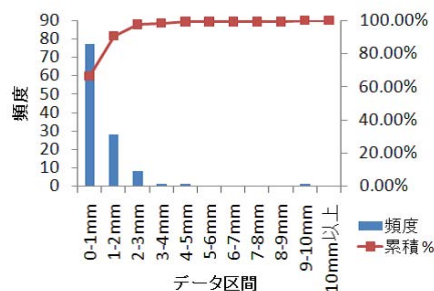


図14 スチールトレイの裏における反射位置の誤差  $d$  のヒストグラム

## 法線方向推定

スチールトレイの裏においては、黒い紙や布で覆われていない長方形の部分の四隅の三次元位置を手動で求めることにより法線方向を算出した。これを既知の法線方向ベクトルとし、以下ではこれと推定した結果から得られる法線方向、パッチ手法による法線方向の間の角度をそれぞれ評価に用いる。また今回は画像上での Specular Spike 方向を求める際方向  $\theta$  について全方向を 360 分割して調べた。すなわち  $\theta$  は  $1^\circ$  刻みである。

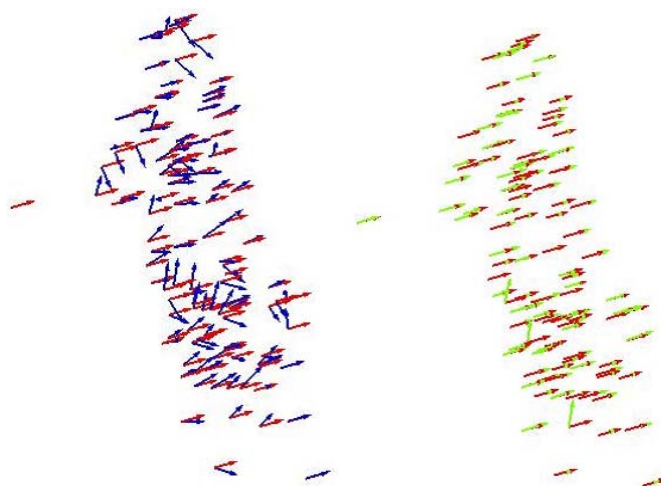
提案手法を用いて先ほど獲得した反射位置ごとに三次元空間での入射光方向と Specular Spike 方向を求めその二等分線を提案手法による法線とした。パッチ手法による法線と既知の法線の分布、提案手法による法線と既知の法線の分布をそれぞれ図 15(a)(b) に示す。図の中で緑色のベクトルが提案手法による法線、青色のベクトルがパッチ手法による法線、赤色のベクトルが既知の法線である。

また、推定した結果から得られた法線方向がどれだけ既知の法線方向に近いかを示す尺度として両ベクトルの間の角度を用いる。提案手法による法線と既知の法線の角度を  $\omega_1$  とし、パッチ手法による法線方向と既知の法線方向の間の角度を  $\omega_2$  とし、それぞれの法線方向について  $\omega_1, \omega_2$  を計算して評価する。そのヒストグラムをそれぞれ図 16, 17 に示す。

これらの図にあるように、提案手法による法線と既知の法線の間の角度(誤差)は9割以上が  $3^\circ$  以内に収まっている。また誤差の平均は  $2.763^\circ$  であった。ちなみに、パッチ手法による法線は既知の法線と比べてほとんどが  $10^\circ$  以上ずれていた。パッチ手法でこのような誤差が生じた原因としては、三次元位置推定誤差によるものが考えられる。また、今回はフレーム数は少なめだが、これを多くすればするほど、三次元位置推定誤差による法線の誤差が大きくなる。それに比べて、提案手法では光の道筋を直接観測することによって法線が正しく推定できていることが確認できる。また、今回は割愛したが、半径 24mm 程の金属球に対しても同様の実験を行った結果、提案手法の方がパッチ手法より精度が高いということが確認できた。

## 5. おわりに

本研究ではチンダル現象を用いて通常環境では反射光を観測しづらい物体の三次元形状・法線方向を、反射光の画素値分布から推定する手法を提案した。写り込みの影響が出ないように方向ごとに反射光の強度を推定することで Specular Spike 方向が推定できた。推定した入射光方向と Specular Spike 方向から法線方向が推定できた。提案手法とパッチによる法線推定手法を比較することで提案手法の精度のよさが確認できた。今後の課題として、入射光の強度と反射光の強度分布を観測しそこから拡散反射・鏡面反射の反射特性を推定することがあげ



(a): パッチ手法による法線 (b) 提案手法による法線 (緑) (青)と既知の法線(赤)の分布 と既知の法線(赤)の分布

図 15 スチールトレイの裏における法線分布の推定結果

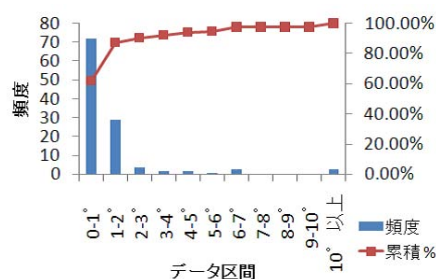


図 16 スチールトレイの裏における提案手法による法線の誤差  $\omega_1$  のヒストグラム

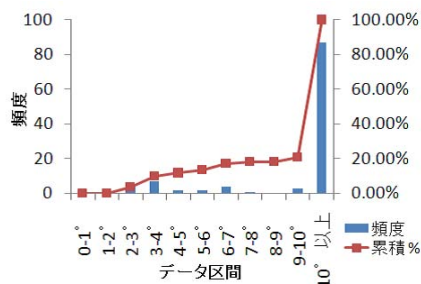


図 17 スチールトレイの裏におけるパッチ手法による法線の誤差  $\omega_2$  のヒストグラム

られる。

## 文 献

- [1] 川崎 洋, 古川 亮. 複数レーザ平面の自己校正による三次元再構成. 電子情報通信学会論文誌. Vol. J90-D No.8, pp.1848-1857, 2007.
- [2] 山下 淳, 樋口 裕和, 金子 透. 光切断法による水中物体の三次元計測. 精密工学会誌. Vol.73 No.2, pp.265-269, 2007.
- [3] K. E. Torrance and E. M. Sparrow. *Theory of off-specular reflection from roughened surfaces*. Journal of the Optical Society of America. 57, pp.1104-1114, 1967.
- [4] B.T. Phong. *Illumination for computer generated picture*. Communications of the ACM. vol.18, no.6,

