

チンダル現象を用いた三次元形状及び反射特性推定

小山 亮[†] 飯山 将晃^{††} 船富 卓哉^{†††} 美濃 導彦^{†††}

[†] 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

^{††} 京都大学大学院経済学研究科, 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

^{†††} 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

E-mail: ^{†††}iiyama@econ.kyoto-u.ac.jp, ^{††††}{funatomi,minoh}@mm.media.kyoto-u.ac.jp

あらまし 反射光がカメラで観測できないために従来手法では計測が困難であった対象に対し、チンダル現象という光学現象を利用し、その三次元形状と反射特性を同時に計測する手法を提案する。提案手法では、物体表面にレーザ光を照射し、それを複数カメラで撮影した画像を用いて計測を行う。多数の微粒子で構成される媒体中ではチンダル現象による散乱が発生し、入射光及び反射光が媒体中を通過する様子が観測できる。これにより通常環境では観測ができなかった物体表面での反射光をカメラで観測し、形状と反射特性の計測を行う。金属物体と黒色物体を計測対象とした実験により提案手法の有効性を評価した。

キーワード 形状計測, 反射特性推定, チンダル現象, Torrance-Sparrow

1. はじめに

近年、映画、アニメーションなどで実物体の見えを忠実に再現した写実的な CG が頻繁に用いられるようになった。しかし、写実的な CG の生成には多大な人的コストがかかるため、これを自動で生成するという要求が高まってきており、実物体の写実的な CG を自動で生成するのに必要な三次元形状及び表面反射特性を実物体より計測することが求められている。

実物体の三次元形状を推定する手法については、従来より物体表面にパターン光を照射しその反射光をカメラで観測した画像から光の反射位置を推定する手法が多く提案されている [1]。しかし、このような手法全般に共通する問題点として、反射光がカメラで観測できない物体の場合は三次元形状を推定することができないという問題がある。例えば、反射光が特定の方向でしか観測できない金属物体や、反射光がほとんど観測できない黒色物体にはこれらの手法は適用できない。

一方、反射特性については、物体表面に光を照射し、様々な方向からの入射光に対する反射光を、様々な方向から観測することで推定する手法が提案されている [2] [3] [4]。しかしながらこれらの手法では、物体の三次元形状が既知である必要があり、また、物体表面上のある一点の反射特性を推定することを目的としているため計測対象が平面の切片である必要があるなどの制約がある。

また、三次元形状と反射特性を同時に計測する手法がいくつか提案されている [5] もの、三次元形状推定における問題点である反射光がカメラで観測できないような物体には対応できていない。

これらの従来研究に対して我々は、これまで反射光が

カメラで観測できないために計測が困難であった金属物体や黒色物体についても形状や反射特性を推定することが可能な手法を提案する。

我々は、反射光がカメラで観測できないという問題に対処するために、チンダル現象という光学現象に着目する。チンダル現象とは光が多数の微粒子で構成される媒体中を通過する際、その微粒子で光が散乱し光の道筋が見えるようになる現象である。

チンダル現象の例として、図 1、図 2 にそれぞれ水に洗剤を混ぜた混合物、暗室に煙を充満させた空間に設置した金属物体へレーザを照射した様子を示す。チンダル現象が生じない場合では光の道筋は観測できないが、洗剤や煙といった多数の微粒子で構成される媒体中ではチンダル現象による散乱が発生し、入射光及び反射光が媒体中を通過する様子が観測できる。これにより、通常環境では観測ができなかった物体表面での反射光についても散乱によりカメラで観測できるようになる。また、入射光が媒体中を通過する様子を観測することによって光の反射位置、つまり物体表面の位置を知ることができるため、黒色物体のように光をほとんど反射しないような物体に対しても形状計測が可能となる。さらに、(オクルージョンが無ければ) 物体表面で反射したあらゆる方向への反射光がカメラで一度に観測される。本研究ではこれを利用して反射特性を推定する。

光の散乱を利用した関連研究として、Hullin ら [6] は散乱媒体で満たされた液体中に設置した計測対象にスリットレーザ光を照射した画像より、半透明物体の形状を計測する手法を提案している。この手法では対象が強い鏡面反射をする場合レーザ光の反射位置を正しく推定できないという問題があったのに対し、我々の手法では鏡面反射物体にも適用可能であり、また形状と同時に反

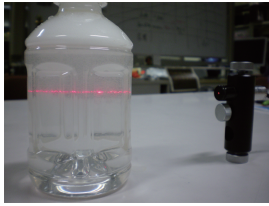


図 1 水と洗剤の混合物

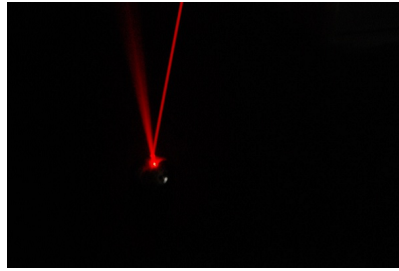


図 2 煙が充満した空間

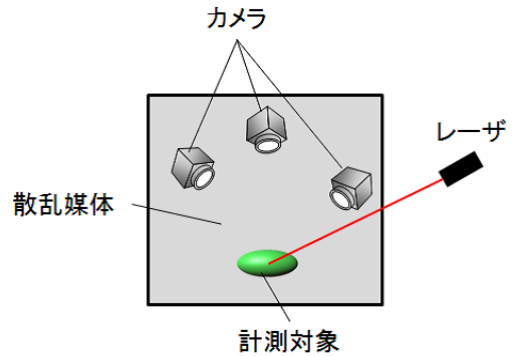


図 3 計測装置

射特性も計測可能であるという利点がある。また、馬場ら[7]は、入射光と反射光が散乱媒体によって散乱することによる見かけの反射特性が変化するという問題に対し、散乱媒体の散乱特性と物体表面の反射特性とを別々に推定する手法を提案している。馬場ら[7]の手法では散乱現象を双方向透過率分布関数で表現し、散乱物体の厚みに対しては考慮されていないのに対し、我々の手法では散乱媒体中を光が通過する際の光の減衰も考慮している点が異なる。

以降、2節では三次元形状推定方法について述べ、3節で反射特性を推定する方法について述べる。4節では提案手法の有効性を検証するための実験及びその結果・考察を述べる。5節で本研究のまとめと今後の課題について述べる。

2. チンダル現象下での三次元形状推定

2.1 観測方法

散乱媒体で満たされている空間に計測対象・複数台のカメラ・レーザ光照射装置を設置した環境(図3)において観測を行う。観測時において、散乱媒体の密度は空間内で均一であるとする。その空間において、静止した計測対象の物体表面上の一点にポインティングレーザを照射する。このとき、レーザ光とレーザ光の反射光、および反射光がチンダル現象によって散乱した光以外の光は観測されないものとする。これを K 台のカメラで複数方向から観測する。各カメラの位置や画角等のカメラパラメータは既知であるものとする。

なお、現実には一度散乱した光が媒体中で再び散乱する多重散乱現象が発生する。これについては、画像中で多重散乱がほとんど観測されない程度に散乱媒体の濃度やカメラのシャッター開放時間の調整を行う。ある程度散乱媒体の濃度を低くすれば、一次散乱光に比べて多重散乱光の光量は少なくなるためこのような観測が実現可能である。以降の議論では多重散乱光を無視し一次散乱光のみを扱う。

2.2 三次元形状推定

チンダル現象下での三次元形状の推定は、筆者等の手法[8]を用いて行う。ここでは、[8]について概略を述べる。

チンダル現象下で入射光及び反射光の散乱光を観測すると入射光および反射光の道筋が輝度値の高い領域として得られる。例として、チンダル現象下で物体表面上に赤色レーザ光を照射した様子を図4に示す。画像中で右上から照射したレーザ光が画像中央の物体表面で反射し、拡散反射と画像左上方向への鏡面反射が生じていることが確認できる。全てのカメラでこのような観測画像を撮影し、それらの画像を用いて三次元空間での反射位置を推定することにより物体表面の一点の3次元位置を獲得する。また、これと同時に反射特性の推定に必要なレーザ光の入射方向も同時に推定する。

まず画像から入射方向に相当する直線を推定することを考える。画像中で輝度値が高い領域は、入射光および反射光の散乱が生じている場所に限られるため、観測画像に対して二値化処理を施すことにより入射光と反射光に相当する領域を抽出する(図5)。また、光源としてポインティングレーザを用いているため、入射光の幅はほぼ一定であり、レーザ光の口径が既知で、レーザ光照射位置とカメラとの間のおおよその距離を知ることができれば、画像中で入射光がどの程度の太さの直線として投影されるかを見積もることができるため、見積もられた太さに相当する回数だけ膨張収縮処理を行えば入射光の領域を得ることができる。例えば図5の二値画像に収縮処理をかけた後、それと同じ回数だけ膨張処理をかけると図6のように入射光の領域のみが消えた二値画像が得られる。この2つの画像の差分をとれば、入射光の領域だけを残した二値画像(図7)を生成することができる。このようにして得られた入射光の領域に対し、Hough変換を適用して反射位置を端点とする半直線を獲得し、これを入射光に相当する半直線とする。

さらに反射位置は今求めた入射光に相当する半直線上で最も明るい点、すなわち輝度値が最も大きい点とする。図4の画像から以上の情報を推定した結果を図8に示す。

以上の処理を各カメラでの観測画像について行う。

三次元空間上での反射位置は、各画像で得られた反射位置とカメラパラメータを用いてステレオにより獲得する。また、三次元空間上での入射方向については、(1)あ

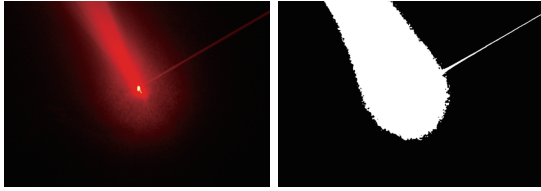


図 4 観測画像

図 5 二値化処理後



図 6 収縮膨張処理後

図 7 入射光領域

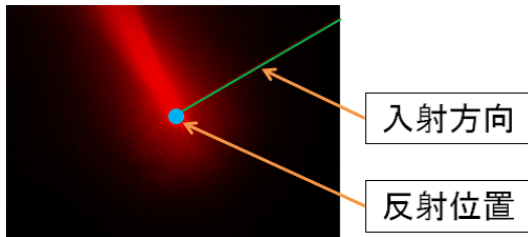


図 8 入射方向、反射位置推定結果

る画像上での入射光を表す半直線上の点のうち、反射位置から一定距離離れた点の一つを選択し、(2)別の画像上でこの点に対応する点を、エピポーラ線と入射光を表す半直線との交点を計算することにより獲得し、(3)画像上のこれら2点の対応付けからステレオにより3次元位置を計算し、(4)反射位置からこの点へ向かうベクトルを入射方向とする、という手順により決定する。

3. チンダル現象下での反射特性推定

3.1 チンダル現象下での反射特性推定手法の概要

画像で観測される輝度値は、カメラに直接入る反射光の他に、チンダル現象による散乱光の影響を受けており、輝度値から直接反射特性を推定するためには、反射特性と同時に散乱現象の影響も推定しなければならない。

本研究では各反射方向への反射率及び散乱現象をパラメータ探索によって同時に推定する。具体的には、反射特性と散乱現象をパラメトリックに表現したモデルを用い、2節で推定した入射光に関する情報と、与えられた反射特性パラメータ及び散乱パラメータとを用いて、各カメラで観測され得る画像を合成する(以降、これをシミュレート画像と呼ぶ)。実際の観測画像とシミュレート画像の誤差を表す誤差評価関数を定義し、その値が最小となるような各反射方向への反射パラメータ及び散乱パラメータを求める。

3.2 散乱現象

3.1節で述べた散乱パラメータは一般に3種類あると

言われており、媒体の濃度に依存するパラメータ2種類と媒体の種類に依存するパラメータ1種類に大別される[10]。そのうち濃度に依存するパラメータには散乱係数と吸収係数がある。散乱係数とは散乱媒体中をある光量の光が単位距離を通過する際にその光量のうち散乱する光量の割合であり、吸収係数とは媒体中をある光量の光が単位距離を通過する際に媒体中で吸収される光量の割合である。散乱係数 β 、吸収係数 μ とおくとこれらは濃度により $0 \leq \beta \leq 1; 0 \leq \mu \leq 1$ の範囲で変化する。図9のように光量 L の光が単位距離を通過するとき、散乱する光の光量 L_s 、微粒子に吸収される光量 L_a は式(1),(2)のように表される。

$$L_s = \beta L \quad (1)$$

$$L_a = \mu L \quad (2)$$

結果、散乱も吸収も起こらず直進する光量 L_t は式(3)のように表される。

$$L_t = (1 - \beta - \mu)L \quad (3)$$

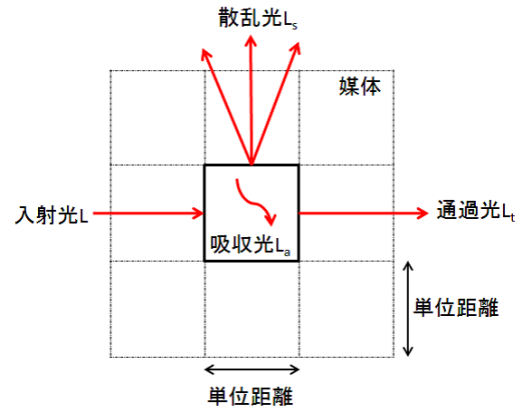


図 9 散乱媒体による散乱現象

散乱光 L_s の散乱方向に関する分布は、入射光 L の進行方向と散乱方向のなす角 θ と媒体の種類に依存し、パラメータ g によって式(4)に示すフェーズ関数によって与えられる。

$$p(g, \theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g\cos\theta)^{3/2}} \quad (4)$$

これを用いると、入射光との角度が θ となるある方向に散乱する光の光量 $L_s(\theta)$ は式(5)のように表される。

g の値によって散乱の振る舞いは変化する。 $g = 0$ のときは全ての方向に同じ光量の散乱光が発生する等方散乱となり、 $g > 0$ のときは元々の光の進行方向と同じ方向付近で散乱光の光量が多くなる前方散乱となり、 $g < 0$ のときは元々の光の進行方向と逆の方向付近で散乱光の光量が多くなる後方散乱となる。図10に示すように、 g の値が大きくなると進行方向付近の散乱光の割合が大きくなる。

$$L_s(\theta) = \beta p(g, \theta)L \quad (5)$$

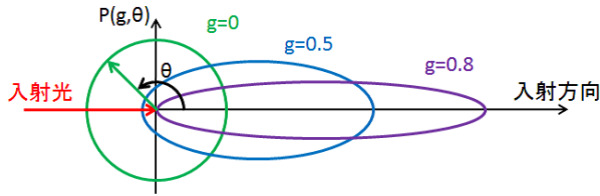


図 10 散乱関数パラメータ g の散乱光分布への影響

3.3 反射特性

反射モデルとして式 (6) で示される Lambert モデルと Torrance-Sparrow モデルを利用する。このモデルでは拡散反射係数 k_d 、鏡面反射係数 k_s 、表面粗さ係数 σ 、屈折率 n の 4 つのパラメータによって反射特性を表している。なお、 N は法線方向を表す単位ベクトル、 L が光の入射方向（物体表面から光源へ向かう単位ベクトル）、 V が光の反射方向を表す単位ベクトル、 H は L と V とを二等分するベクトル、 α は N と H とのなす角度である。この式を用いると、入射光の光量 L_{in} に対する V 方向への反射光の強さは $f_r(V)L_{in}$ で表すことができる。

$$f_r(V) = k_d(N \cdot L) + \frac{k_s}{N \cdot V} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \cdot G \cdot F \quad (6)$$

$$G = \min\left\{1, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{V \cdot H}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{V \cdot H}\right\}$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{(g - L \cdot N)^2}{(g + L \cdot N)^2} \left\{1 + \frac{[L \cdot N(g + L \cdot N) - 1]^2}{[L \cdot N(g - L \cdot N) + 1]^2}\right\}$$

$$g = \sqrt{n^2 + (L \cdot N)^2 - 1}$$

3.4 シミュレート画像生成

3.4.1 光線追跡

散乱媒体中でカメラの画像平面上のある画素 m に一次散乱光が到達する様子を図 11 に示す。この図において画素 m に到達する散乱光の光量は、カメラ中心と画素 m とを結ぶ視線上の点で散乱してカメラに届く光の光量を全て足しあわせたものとなる。

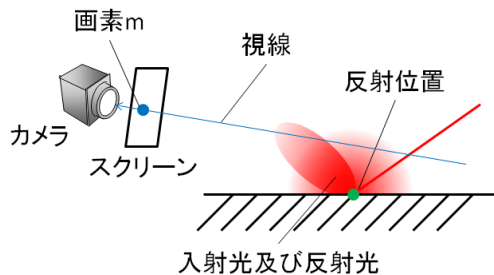


図 11 ある画素に届く散乱光

シミュレート画像の各画素に到達する光の光量を計算するためには、三次元空間の各点における散乱光の光量

を計算する必要がある。そのために三次元空間を単位空間に分割し、入射光および反射光が各単位空間を通過する際に吸収される光の光量、散乱される光の光量、通過する光の光量をそれぞれ計算する。

本研究では反射位置を原点とした球座標系の空間分割を用いてこれを計算する。入射光及び反射光は原点である反射位置を通るため、図 12 に示した球座標系の空間分割の断面図において、入射光や反射光がどの単位空間を通過する際も光が進む距離が一定となる。

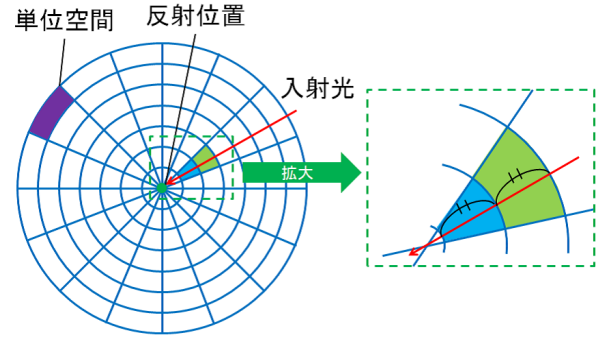


図 12 球座標系の空間分割

レーザ光が反射位置に到達するまで散乱媒体中を距離 R だけ進んだとすると、反射位置に到達するレーザ光の光量 L_{in} は、レーザ光から照射される光の光量を L_0 として、

$$L_{in} = L_0(1 - \beta - \mu)^R \quad (7)$$

となる。また、物体表面上から V 方向へ向かう反射光は $f_r(V)L_{in}$ であり、球座標系で V 方向に反射位置から r 離れた単位空間に到達する光量は、 $d\Omega$ を単位空間が占める立体角として、

$$L_{out}(V, r) = f_r(V)L_{in}(1 - \beta - \mu)^r d\Omega \quad (8)$$

となる。 $L_{out}(V, r)$ のうちカメラへ向かう光量は $L_{out}(V, r)\beta p(g, \theta)$ である。これをカメラ中心と画素とを結ぶ視線に対して全て足し合わせることで、各画素の値を計算する。

3.5 評価関数

観測画像 I_{obs}^k とシミュレート画像 I_{sim}^k との差を各画素同士の輝度値の差の絶対値を足しあわせた式 (9) E^k で表し、 K 枚の画像それぞれについて計算された E^k の総和を誤差関数 E とする。

$$E^k = \sum_{u=1}^W \sum_{v=1}^H |i_{sim}^k(u, v) - i_{obs}^k(u, v)| \quad (9)$$

$$E = \sum_{k=1}^K E^k \quad (10)$$

ここで、 $i_{sim}^k(u, v)$ はカメラ k のシミュレート画像上の

(u, v) 座標の輝度値, $i_{obs}^k(u, v)$ はカメラ k の観測画像の輝度値とする. なお, 撮像素子に入る放射輝度とそこから最終的に出力される輝度値とのスケールの違いに対応するため, シミュレート画像の各画素の輝度値を正規化する. 具体的には, 正規化によって観測画像とシミュレート画像の各画素の輝度値の和が同じになるようにする. ただし, 観測画像において強い光が観測される部分はいわゆる白飛び現象 (輝度値が 255 となる現象) が生じることがあるため, 単純にシミュレート画像の各画素を定数倍するのではなく, 観測画像で輝度値 255 に対応するシミュレート画像の輝度値 i_{std}^k を決定し, シミュレート画像においてそれ以上の輝度値を持つ画素は 255 に丸めるという正規化補正を行う.

その処理手順を述べる. まず, 観測画像の各画素の輝度値の和 Sum_{obs}^k を式 (11) のように計算する.

$$Sum_{obs}^k = \sum_{u=1}^W \sum_{v=1}^H i_{obs}^k(u, v) \quad (11)$$

次に, i_{std}^k をもとにシミュレート画像の各画素の輝度値を式 (12) に従って補正する.

$$i_{sim}^k(u, v) = \min\left(\frac{255 \cdot i_{sim}^k(u, v)}{i_{std}^k}, 255\right) \quad (12)$$

こうして補正したシミュレート画像の各画素の輝度値の和 Sum_{sim}^k を式 (13) のように計算し, 式 (14) で計算される Sum_{obs}^k と Sum_{sim}^k の差 Sub^k が最小となる i_{std}^k を求める.

$$Sum_{sim}^k = \sum_{u=1}^W \sum_{v=1}^H i_{sim}^k(u, v) \quad (13)$$

$$Sub^k = |Sum_{sim}^k - Sum_{obs}^k| \quad (14)$$

求めた i_{std}^k を用いてシミュレート画像のすべての輝度値を補正し, その画像 I_{sim}^k を得る. I_{sim}^k と I_{obs}^k の各画素の輝度値の差を足しあわせることで E^k を求める.

誤差評価関数 E を最小とする各反射方向への反射率及び散乱パラメータを Downhill Simplex Method [11] を用いて獲得することにより反射特性を推定する.

4. 実 験

提案手法の有効性を検証するため, 金属物体を計測対象として実験を行った. 2 節で述べた観測環境として以下に述べる計測装置を構築した. 今回の実験では, 図 13 に示すようなアクリル板で囲まれた 80cm 立方の密閉された空間を用い, その中にカメラ 5 台を固定し, 密閉空間内の散乱媒体の濃度を均一に保つためのファンを設置し, 底面の中央に計測対象を設置した. 散乱媒体としてスモークマシンから発生させた煙を密閉空間内に充満させたのち, 赤色レーザーポインタ (出力 0.1mW, レーザ口

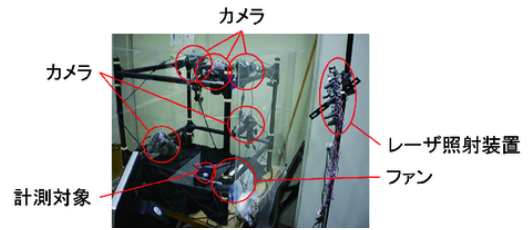


図 13 計測装置

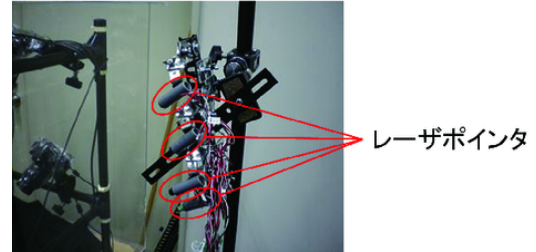


図 14 レーザ照射装置

径 1mm) を取り付けしたレーザ照射装置 (図 14) を入射光として用いて計測を行った. 撮影に使用したカメラはデジタル一眼レフカメラ Nikon D40 であり, 撮影画像の解像度は 3008×2000 である.

図 15, 16 に示す金属球を撮影対象として用いた. 金属球の大きさは直径 50mm である. この物体にチンダル現象下で赤色レーザーポインタを照射した様子を 5 台のカメラで観測した画像を図 17 に示す. これらの画像に対して提案手法による入射光, 反射位置推定及びパラメータ推定を行った.



図 15 金 属 球 図 16 装置内に設置した金属球

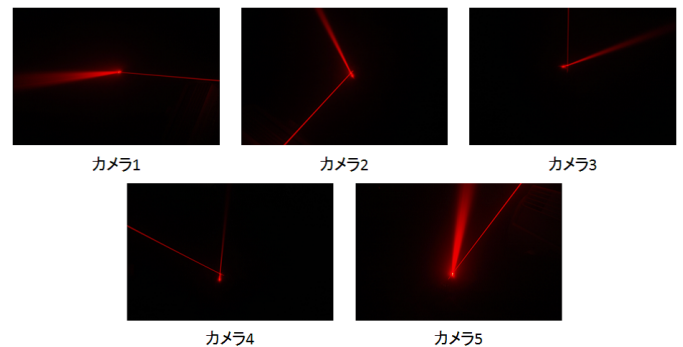


図 17 観 測 画 像

a) 三次元形状推定

図 17 の各観測画像から入射方向及び反射位置を推定した結果を図 18 に示す。この図では入射方向を緑の線分で、反射位置を緑の円で示す。この図から、提案手法によりそれぞれ正確に推定できていることが分かる。その後三次元空間での入射方向及び反射位置をステレオ視により計算した。

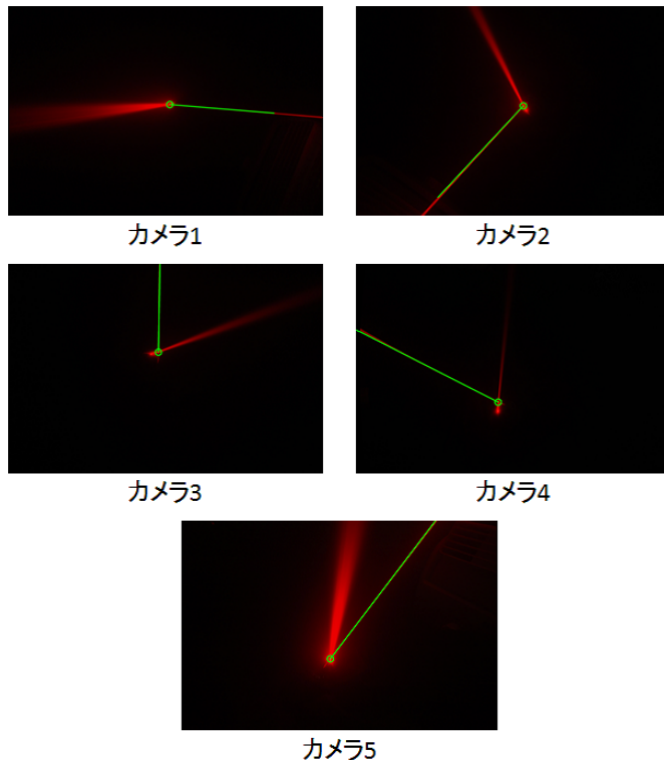


図 18 入射方向及び反射位置推定結果

獲得された金属球面上の 253 点の反射位置と直径 50mm の球とを位置合わせした結果を図 19(a) に、図 19(b) に図 19(a) を別方向から表示したものを示す。図の中で青色の点が獲得した三次元位置で、赤色の点の集合が直径 50mm の球の形状である。

獲得した点がどれだけ正解の金属球の表面に近いを示す尺度として、金属球の中心からの距離を用いる。金属球の半径を r 、推定した三次元位置の金属球の中心からの距離を r' とし、それぞれの三次元位置について $|r - r'|$ を計算して評価する。その度数分布を図 20 に示す。

図 19 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。また、図 20 にあるように、獲得した三次元位置と正解の球の表面との距離(誤差)は概ね 3mm 以内に収まっている。また誤差の平均は 1.078mm であった。今回用いた撮影環境において、画像上で反射位置の推定に 3 ピクセルの誤差があると、結果として三次元位置の推定に約 1mm の誤差が生じる。レーザ光の太さに起因する画像上での反射位置推定の誤差により、三次元位置の推定に 1mm 程度の誤差が生じてしまったと考えられる。

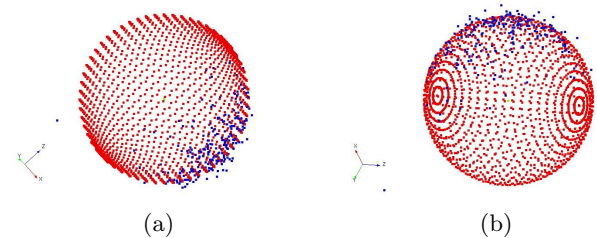


図 19 金属球における形状の推定結果

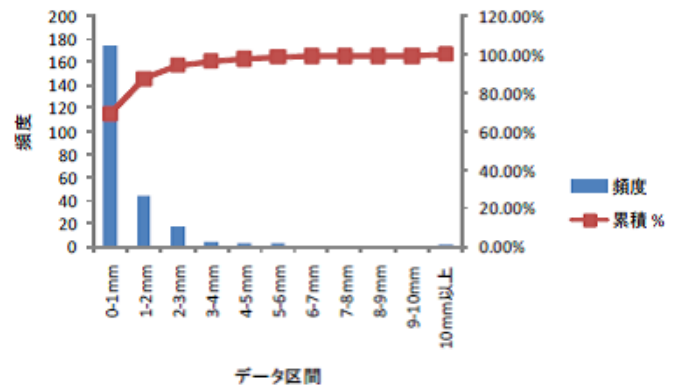


図 20 反射位置の推定誤差

b) 各反射方向への反射率及び散乱パラメータ推定

図 18 の結果を元に観測画像から各反射方向への反射率及び散乱パラメータをパラメータ探索により推定した。

まず 7 種類のパラメータの初期値を決める。今回は誤差評価関数の値が小さい初期値を使うことで探索時間を削減することを考え、予め 7 種類のパラメータをランダムに変化させながらそれぞれの誤差評価関数の値を計算したデータを多数取得した。その中で誤差評価関数の値が低いパラメータをいくつか選び、それらを初期値としてパラメータ探索を開始した。その結果を表 1 に示す。表 1 は各パラメータの初期値を par_s とした場合の探索終了時のパラメータ par_e をまとめたものである。便宜上、それぞれの初期値に探索 ID を割り振る。

表 1 に注目すると、様々な初期値から探索を行った結果、必ずしも同じパラメータに収束するわけではなく、初期値に依存した局所解にそれぞれ収束していることがわかる。ここで、探索 ID1 の par_e でのシミュレート画像及び探索 ID2 の par_e でのシミュレート画像をそれぞれ図 21、図 22 に示す。これらの画像について、いずれも観測画像に見られる強く鋭い鏡面反射をほぼ再現できた画像となっている。

ここで、ID1 と ID2 のシミュレート画像を比較すると類似した画像となっている。このように異なるパラメータで同様のシミュレート画像が生成される原因として、入射光の画像上での輝度値が輝度値の上限 (255) に達してしまっていることが挙げられる。その様子は図 24 に示す水色で囲んだ部分などで確認することができる。この場合、拡散反射係数 k_d と鏡面反射係数 k_s との比は得

表 1 探索開始時と終了時の各パラメータの値

探索 ID		$\beta(10^{-3})$	$\mu(10^{-3})$	$g(10^{-1})$	$k_d(10^{-3})$	$k_s(10^{-1})$	$\sigma(10^{-2})$	n
1	par_s	0.42	8.25	6.90	0.57	2.27	4.45	2.20
	par_e	2.59	18.85	3.52	3.11	6.79	2.20	4.99
2	par_s	0.99	8.77	6.97	2.19	3.20	2.60	1.84
	par_e	19.44	1.13	3.77	4.25	9.22	2.24	5.00
3	par_s	0.66	8.76	7.24	0.88	2.19	5.87	2.29
	par_e	15.16	0.00	5.75	2.27	4.09	2.50	5.00
4	par_s	0.36	8.47	7.13	0.65	7.20	2.48	2.13
	par_e	0.00	20.46	4.03	4.10	9.18	2.21	4.90

ることができるが、 k_d と k_s の絶対的な値を得ることはできない。これが、 k_d と k_s の推定に影響を与えていると考えられる。これを解決するためには、入射光の画像上での輝度値が上限に達さないよう画像のダイナミックレンジを広くし、現状の 8bit 画像ではなく 16bit 画像などのさらに階調の多い画像を用いるなどの工夫が必要となる。

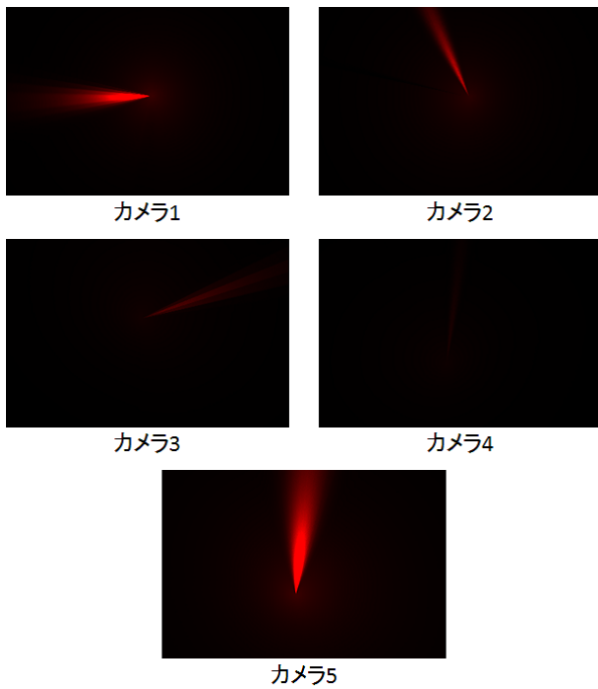


図 21 探索 ID1 の par_e でのシミュレート画像

また、ID1～ID4 において推定した Lambert モデル及び Torrance-Sparrow モデルのパラメータを用いてレンダリングを行った。その結果を図 23 に示す。上で述べたとおり拡散反射係数 k_d と鏡面反射係数 k_s の絶対的な値は得ることができていないため、ID1～ID4 でレンダリング結果が異なるものの、計測対象である金属球において推定したパラメータにおける鏡面反射係数 k_s が拡散反射係数 k_d に比べてかなり大きいことや、表面粗さ係数が小さいという特徴を反映した、滑らかで金属光沢のある表面反射特性を再現することができていることが確認できる。

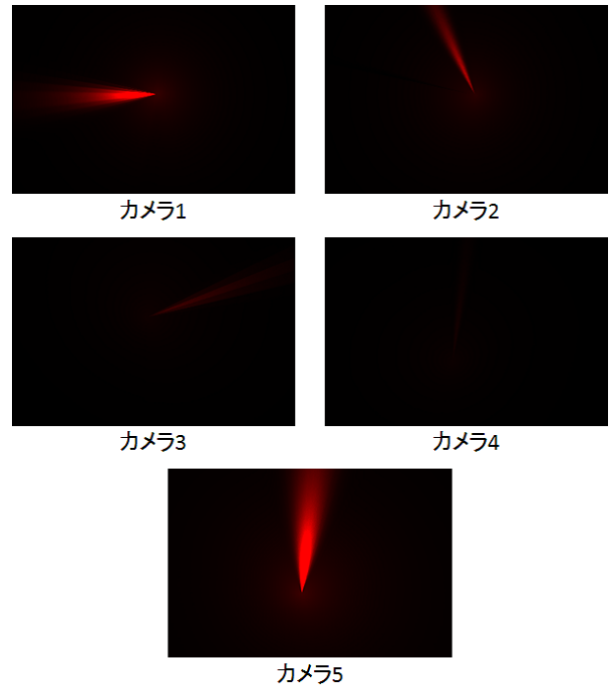


図 22 探索 ID2 の par_e でのシミュレート画像

ただし、今回の実験により推定できた反射特性は、赤色レーザーポイントから出力される赤色光 (650nm) に対応するものであり、他の波長における反射特性は得られていないことに注意する必要がある。反射特性推定に関する従来研究の多くは赤・緑・青の三原色に対する反射特性を推定している。本研究においても緑・青の波長光を照射すれば同様に反射特性を推定することが可能であり、今後実験を進めていく必要がある。

5. おわりに

本研究ではチンダル現象下で実物体にレーザーポイントを照射した様子を観測することで、これまで反射光がカメラで観測できないために計測が困難であった物体の形状と反射特性を推定する手法を提案した。入射光が媒体中を通過する様子を画像から検出することによって物体表面の位置と入射光の方向を推定し、また、観測画像と同等の画像を出力する散乱パラメータ・反射パラメータを推定することにより反射特性を得た。

今後の課題としては、さまざまな形状・反射特性の物体

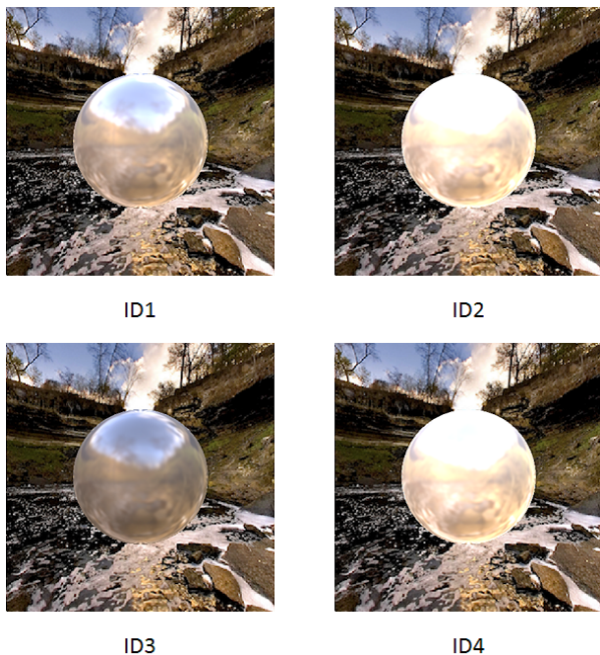


図 23 レンダリング結果

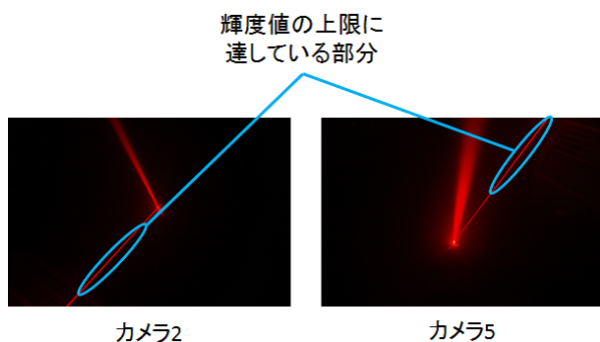


図 24 観測画像中で輝度値の上限に達した明るい部分の例

に対する評価実験を行うと同時に，HDR(High Dynamic Range) 画像の利用による精度の向上を検討することが挙げられる．

文 献

- [1] 大田 雄也, 川崎俊央, 佐川 立昌, 古川 亮, 川崎 洋, 八木 康史. デブルーイン系列と *Belief-Propagation* を用いた高密度ラインパターン検出による高速動体の 3 次元計測手法. 第 12 回画像の理解・認識シンポジウム (MIRU2009) 論文集, pp.222-229, Jul 2009.
- [2] 町田 隆, 竹村 治雄, 横矢 直和. インバースレンダリングによる物体表面反射特性の推定. 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.SIG 9, pp.69-86, Jun 2006.
- [3] Hongsong Li, Sing-Choong Foo, Kenneth E. Torrance, Stephen H. Westin. *Automated three-axis gonioreflectometer for computer graphics applications*. Proc. SPIE, Vol.5878, pp.221-231, 2005.
- [4] Yasuhiro Mukaigawa, Kohei Sumino, Yasushi Yagi. *Rapid BRDF Measurement Using an Ellipsoidal Mirror and a Projector*. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications. Vol 1, pp.21-32, Jan 2009.
- [5] 小俣 和子, 斎藤 英雄, 小沢 慎治. 光源の相対的回転による物体形状と表面反射特性の推定. 電子情報通信学会論文誌, Vol.J83-D2, No.3, pp.927-937, Mar 2000.
- [6] Matthias B. Hullin, Martin Fuchs, Ivo Ihrke, Hans-Peter Seidel, Hendrik P. A. Lensch. *Fluorescent Immersion Range Scanning*. ACM Trans. on Graphics, Vol.27, No.3, pp.87:1-87:10, 2008.
- [7] 馬場葉子, 向川康博, 八木康史. 照明光と反射光の散乱を考慮した反射特性の推定. 信学技報 Vol.110 No.381 PP.237-244, 2011.
- [8] 小山 亮, 船富 卓哉, 飯山 将晃, 角所 考, 美濃 導彦. 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第 12 回画像の理解・認識シンポジウム (MIRU2009), PP.1156-1163, 2009.
- [9] K. E. Torrance, E. M. Sparrow. *Theory of off-specular reflection from roughened surfaces*. Journal of the Optical Society of America. 57, pp.1104-1114, 1967.
- [10] Srinivasa G. Narasimhan, Mohit Gupta, Craig Donner, Ravi Ramamoorthi, Shree K. Nayar, Henrik Wann Jensen. *Acquiring scattering properties of participating media by dilution*. ACM Trans. on Graphics, Vol.25, No.3, pp.1003-1012, 2006.
- [11] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery. *Numerical Recipes the Art of Scientific Computing Third Edition*.