

特別研究報告書

チンダル現象を利用した反射特性推定のため
の鏡面反射方向の推定

指導教員 美濃 導彦 教授

京都大学工学部情報学科

小山 亮

平成 21 年 2 月 2 日

チンダル現象を利用した反射特性推定のための鏡面反射方向の推定

小山 亮

内容梗概

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を三次元モデルとしてデジタル化する需要が増えている．写実性の高い三次元モデルを獲得するには，物体の反射特性，具体的には任意の入射光の強さ・方向に対する物体表面上での反射光の振る舞い，すなわち拡散反射や鏡面反射の強度分布を推定する必要がある．

反射光の強度分布を定式化したものとして，Torranace-Sparrow や Phong といった反射モデルがあり，従来はこのような定式化された反射モデルの係数(パラメータ)を求めることで反射特性を推定していた．しかし実際には定式化された反射モデルに従わない物体も存在し，そのような物体に対しては従来の反射モデルを用いて反射特性をうまく推定することができない．

そこで本研究では反射特性を特定の定式化されたモデルのパラメータを推定することで獲得するのではなく，事例ベースで反射特性を獲得することを目指す．具体的には，入射光に対する反射光を拡散反射・鏡面反射に分離し，任意の方向に対する拡散反射や鏡面反射の強度分布を推定することを目指す．本報告書では特に反射特性推定に必要な反射位置に対応する三次元空間での入射光方向と鏡面反射光が最も強い方向 (Specular Spike 方向と呼ぶ) を推定することを目的とする．

物体表面で生じる反射光をカメラで観測しそこから反射特性を推定するという従来のアプローチを用いた場合，カメラに直接入る反射光しか観測できないため任意の方向に対する反射光の強度分布を得ることはできなかった．これに対し我々は，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に対する反射光の振る舞いをカメラに直接入らない光も含めて直接観測し，それを用いて反射特性を求める．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体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．

入射光方向と Specular Spike 方向を推定するためには物体表面の入射光の反射位置を推定する必要がある．ピッチャヤガンはチンダル現象下で物体にレー

ザ光を照射した様子をカメラで撮影し、その画像で観測される入射光の道筋から線分を検出することで、観測画像から入射光に相当する線分を抽出しその途切れた位置を画像上での反射位置とした。それを複数カメラでステレオ視することで三次元空間での反射位置を推定し、複数フレームの撮影により物体の三次元形状を復元した。本研究ではこの手法を用いて反射位置を推定する。

Specular Spike 方向は反射位置の周りの画素の画素値を解析することで推定する。写り込みがない場合、反射位置から任意の方向に向かう画素の画素値を調べるとその画素値は反射位置から離れるに従って一定の法則で減衰する。この法則に基づいて、画像上での入射光の反射位置を始点とし任意の方向 θ について反射光の強度 k_θ 及びこれが最大となる方向 θ を推定し、これを Specular Spike 方向とする。チンダル現象による入射光や反射光の散乱光が物体表面で再度反射する可能性があり減衰法則に従わない部分があるため Specular Spike 方向は必ずしも正確に得られないが、減衰法則に従う部分をロバスト推定を用いて抽出することで減衰法則に従わない部分の影響を除き様々な角度に対する反射光の強度分布を得、そこから Specular Spike 方向を推定する。

本研究では提案手法の有効性を確かめるために鏡面反射が生じる物体で形状が単純な物体(金属球, スチールトレイの裏)を用意し、4台のカメラ, レーザ光照射装置, スモークマシンで構成される実験装置の中に物体を置き計測を行った。実験の結果により三次元空間での入射光方向と Specular Spike 方向の誤差は金属球で平均 6.052° , スチールトレイの裏では 2.753° となり、提案手法により入射光方向と Specular Spike 方向を正確に推定できることが確認できた。

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

Akira KOYAMA

Abstract

There is an increasing demand for digitizing various objects as 3D models in CG/VR fields. Such fields require photorealistic 3D models; models with accurate shape and color. Reflection characteristics, which are models of reflected light, are one of the important components of 3D models. The reflection characteristic describes the strength distribution of diffuse reflection and specular reflection.

Torrance-Sparrow and Phong are well-known reflection models which formulate the strength distribution of reflected light. Several model based methods which acquire reflection characteristics have been proposed. For example, Machida et al. estimated reflection characteristics by finding coefficients of a formulated reflection model. However, there are objects which do not conform to the formulated reflection models. The reflection characteristics of such objects can not be correctly estimated with these methods.

In this study, we propose an appearance based approach for acquiring reflection characteristics. Our approach uses no formulated reflection models, and can estimate reflection characteristics of objects which do not conform to any formulated model. Instead of using formulated models, our method estimates nonparametric strength distribution of the diffuse and the specular reflection. In this report, we focus on a approach for estimating a 3D direction of an incident light and a direction of Specular Spike, where the strongest specular reflection exists. They are needed to estimate the reflection characteristics.

Most of the conventional methods observed lights reflected on a surface of objects with cameras, and estimated reflection characteristics from the captured images. In these approaches, the cameras observe only reflected lights which directly enter the cameras. Such lights are insufficient to acquire the strength distribution of the reflected light. To overcome this insufficiency, we use Tyndall effect. Under Tyndall effect, we can observe the behavior of the reflected light

and estimate the reflection characteristics. Tyndall effect is an effect that the route of strong light can be brightly observed when the strong light passes through the space where minute innumerable particles move irregularly. It is caused because the particles let the light scatter.

A reflection point of the incident light is necessary for estimating the direction of incident light and Specular Spike. Pitchayagan proposed a method to estimate a reflection point in the 3D space. The procedures of this method are as follows: First, radiating a laser beam to objects under Tyndall effect, the laser beam is observed with cameras and a segment of line from the route of the laser beam on the image is detected. Secondly, a segment of line equivalent to the laser beam is extracted and the point where the line broke off is detected as a reflection point on the image. Finally, by using stereo vision with two cameras, a reflection point in 3D space is acquired.

We estimate the direction of Specular Spike by analyzing pixel values of pixels around the reflection point. We model a value of the pixel along an arbitrary direction from the reflection point. If no multi-reflection occurs, the pixel value decreases according to a certain law: Based on this law, we set the strength of the reflected light on direction θ as k_θ , and estimate the direction θ where the k_θ become the strongest. We detect this direction as the direction of Specular Spike. A scattered light of the incident light and a reflected light under Tyndall effect may reflect on the surface of the object. There is the part where the pixel values do not conform to the attenuation law by the multi-reflection. In such case, the direction of Specular Spike is not always provided accurately. We extract the part where the pixel values conform to the attenuation law, and except the influence from the part where they don't conform to the attenuation law. We acquire the strength distribution of reflected light for various angles and estimate the direction of Specular Spike from it.

We evaluated the effectiveness of the proposed method. Two objects which produce the specular reflection and whose shapes are simple are used for the evaluation. We measured the objects, and as the result of the experiment, we checked that we were able to estimate the direction of incident light and Specular Spike in 3D space accurately by the proposed method.

チンダル現象を利用した反射特性推定のための鏡面反射方向の推定

目次

第1章	はじめに	1
第2章	反射特性推定の従来研究	3
2.1	光の反射	3
2.2	反射モデルとそれを利用した従来研究	3
第3章	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	5
3.1	チンダル現象	5
3.2	観測環境	5
3.3	画像上でのレーザ光反射位置及び入射光方向推定	6
3.4	画像内での Specular Spike 方向推定	7
3.4.1	画素値による比較とその問題	9
3.4.2	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	9
3.4.3	画像内での Specular Spike 方向推定	13
3.5	推定結果のステレオ視	14
3.5.1	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	14
3.5.2	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	15
第4章	実験	18
4.1	実験環境	18
4.2	評価方法	19
4.3	結果	19
4.3.1	球体の表面での入射光方向・Specular Spike 方向推定	19
4.3.2	平面の表面での入射光方向・Specular Spike 方向推定	22
4.4	考察	23

第5章	おわりに	26
	謝辞	26
	参考文献	26

第1章 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を三次元モデルとしてデジタル化する需要が増えている。多種多様な実物体の形状や反射特性を推定することで、より写実性の高い三次元モデルの獲得を目指したい。

反射特性とはある入射光の強さ・方向に対する物体表面上での反射光の振る舞い、具体的には拡散反射や鏡面反射の強度分布のことである。拡散反射光や鏡面反射光の強度分布を定式化したものとして Torrance-Sparrow[1] や Phong[2] の反射モデルがある。

町田ら [3] による反射特性推定の研究では、レーザレンジファインダを用いてあらかじめ獲得した物体の形状と実写画像を用いて、Torrance-Sparrow の反射モデルをもとに反射特性を求めていた。町田らに限らず、従来はある特定の定式化された反射モデルを用いて反射特性を推定していた。しかし実際には定式化された反射モデルに従わない物体も存在し、そのような物体に対しては従来手法では反射特性をうまく推定することができなかった。

そこで本研究では特定の定式化されたモデルのパラメータを推定することで反射特性を獲得するのではなく、事例ベースで反射特性を獲得することを目指す。具体的には、入射光に対する反射光を拡散反射・鏡面反射に分離し、任意の反射方向に対する拡散反射や鏡面反射の強度分布を推定することを目指す。本論文では特に反射特性推定に必要な反射位置に対応する三次元空間での入射光方向と鏡面反射光が最も強い方向 (Specular Spike 方向と呼ぶ) を推定することを目的とする。

物体の反射光をカメラで観測しそこから反射特性を推定するという従来のアプローチを用いた場合、カメラに直接入る反射光しか観測できないため任意の反射方向に対する反射光の強度分布を得ることはできなかった。

これに対し我々は、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に対する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、それを用いて反射特性を求める。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。

入射光方向と Specular Spike 方向を推定するためには物体表面の入射光の反

射位置を推定する必要がある．ピッチャヤガン [4] は，チンダル現象下で物体にレーザ光を照射した様子をカメラで撮影し，その画像で観測される入射光の道筋から線分を検出することで，観測画像から入射光に相当する線分を抽出しその途切れた位置を画像上での反射位置とした．それを複数カメラでステレオ視することで三次元空間での反射位置を推定し，複数フレームの撮影により物体の三次元形状を復元した．本研究ではこの手法を用いて反射位置を推定する．

Specular Spike 方向は反射位置の周りの画素の画素値を解析することで推定する．写り込みがない場合，反射位置から任意の方向に向かう画素の画素値を調べるとその画素値は反射位置から離れるに従って一定の法則で減衰する．この法則に基づいて，画像上での入射光の反射位置を始点とし任意の方向 θ について反射光の強度 k_θ 及びこれが最大となる方向 θ を推定し，これを Specular Spike 方向とする．チンダル現象による入射光や反射光の散乱が物体表面で再度反射する可能性があり減衰法則に従わない部分があるため Specular Spike 方向は必ずしも正確に得られないと考えられる．そこで，減衰法則に従う部分をロバースト推定を用いて抽出することで減衰法則に従わない部分の影響を除き様々な角度に対する反射光の強度分布を得，そこから Specular Spike 方向を推定する．

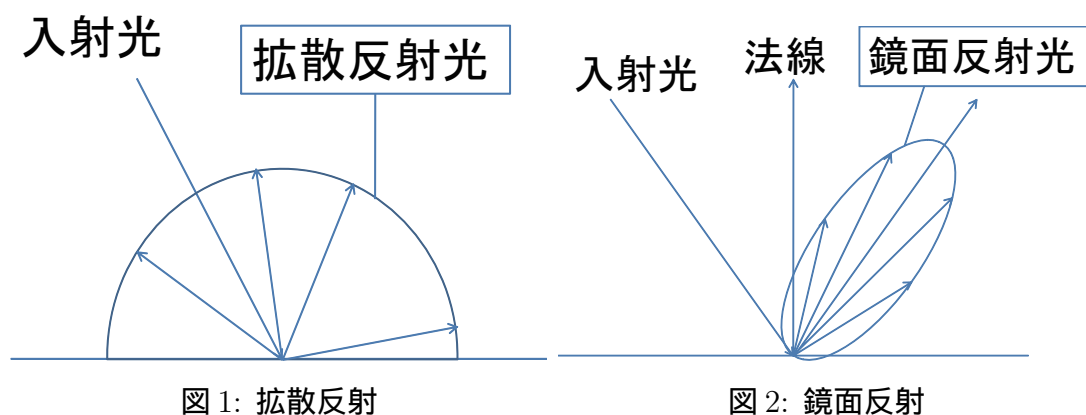
2章では，光の反射やそれを近似する反射モデルについて説明し，反射モデルを利用して反射特性を推定した従来研究について述べる．3章では，チンダル現象を用いて三次元空間での入射光方向と Specular Spike 方向を推定する方法について述べる．4章では，実際に様々な物体に提案手法を適用した結果を示す．また，それについて評価を行い，考察を行う．5章では，本研究のまとめと今後の課題を述べる．

第2章 反射特性推定の従来研究

本章では，2.1 節で光の反射現象について説明し，2.2 節で反射モデルやそれに基づいた従来研究について述べ，その問題点を指摘する．

2.1 光の反射

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明るさは変わらない．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，見る方向によって明るさが変わる．



2.2 反射モデルとそれを利用した従来研究

任意の方向に対する反射光の強さを光の反射を定式化したものに，Torrance-Sparrow[1] や Phong[2] といった反射モデルがある．

Torrance-Sparrow の反射モデルによると反射特性を表わすパラメータとして，入射光に対する拡散反射光の強度を表す拡散反射係数，入射光に対する Specular Lobe の強さを表す鏡面反射係数と表面粗さ係数の計 3 つがある．これらを求めるために入射光方向，法線方向，入射光の強度，反射光の強度分布を推定する必要がある．拡散反射光，鏡面反射光の強度 (それぞれ I_d , I_s と表す) はそれぞれ

れ式 (1), (2) で表わされる .

$$I_d = I k_d \cos \theta \quad (1)$$

$$I_s = I \frac{k_s}{\cos \theta_v} \exp\left(-\frac{\theta_r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

ここで, I は入射光の強度, k_d は拡散反射係数, θ は入射光方向と物体表面の法線のなす角, k_s は鏡面反射係数, θ_v は視線方向と法線のなす角, θ_r は入射光方向と視線の二等分方向と法線のなす角, σ は表面粗さ係数である .

このような定式化された反射モデルを利用して反射特性を推定した研究については様々なものがある . 例えば町田ら [3] は, 実写画像, 環境, あらかじめ獲得した物体の形状から Torrance-Sparrow の反射モデルに基づき各パラメータを推定した .

しかし, 従来提案されてきた反射モデルは現実物体の反射特性を近似したものに過ぎず, その反射モデルに従わない物体も存在する . 具体的には再帰性反射材を使用している物体などがある . そのような物体に対しては, 定式化された反射モデルを適用させて反射特性を求めることはできない .

第3章 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

本章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。

ピッチャヤガン [4] はチンダル現象下で物体に入射する光の道筋をカメラで観測し、その反射位置を推定することで物体の三次元形状を推定する手法を提案しており、本研究でもこの手法をベースにして反射位置と入射光方向を推定するが、これに加え、反射特性を推定するために重要な三次元空間での入射光方向とそれに対する Specular Spike 方向も推定する。

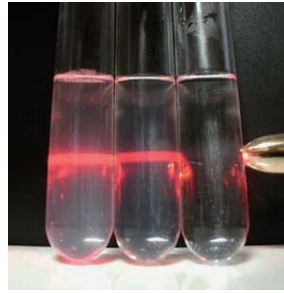
まず 3.1 節ではチンダル現象について説明する。次に 3.2 節では本研究での観測環境について説明する。3.3 節では画像上での反射位置及び入射光方向を推定する方法について述べる。この手法は、ピッチャヤガンによるチンダル現象を利用した三次元空間での反射位置推定手法に基づいている。3.4 節では画像上での反射位置をもとに Specular Spike 方向を推定する方法について述べる。3.5 節では推定結果をステレオ視することにより、三次元空間での反射位置・入射光方向・Specular Spike 方向を推定する方法について述べる。

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。ただの水の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洗剤や石鹼水の中を通過する光の道筋は観測できる。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。

3.2 観測環境

本研究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。また、カメラの外部パラ



左:石鹼水
中:家庭用油汚れ洗剤
右:水

図 3: チンダル現象

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キャリブレーションされているものとする。

3.3 画像上でのレーザー光反射位置及び入射光方向推定

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ものに対し，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．赤色レーザー光の口径が $d(\text{mm})$ でレーザー光が指向性を持つので，このレーザー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．

ピッチャヤガンの手法による入射光に相当する線分検出 ピッチャヤガンの手法では，まず画像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 を二値化した画像が図 5 である．画像上での入射光の道筋に相当する領域は領域 A に含まれるが，同時に細かいノイズ，反射光，写り込みも領域 A に含まれる．そのため領域 A を収縮処理することによりノイズを除去した後繰り返し細線化を行い，入射光に相当する線分を検出する．

しかし三次元空間で入射光や反射光の散乱光が物体表面で再度反射して画像に写り込んだ領域については，ピッチャヤガンが行った収縮処理を行っても領域 A に含まれたままであり，入射光の道筋に相当する領域を正しく特定することができなくなってしまう．

本研究における入射光に相当する線分検出の手法 そこで本研究ではまず領域 A を $W/2$ 回収縮させた後， $W/2$ 回膨張させた．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

部分を除去することができる。以上の処理を行った結果を図6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。ここで複数の領域が入射光の道筋の候補になることがあるが、その場合は最も長い領域を入射光の道筋とする。

ここで、鏡などの物体では物体表面で生じる鏡面反射光が広がりを持たず一本の光となり、線分検出により Specular Spike を入射光として誤検出してしまう場合がある。この問題を解決するために、画像上での入射光方向がある程度既知であることを用いる。具体的には、レーザ光照射装置を少しずつ動かしながら計測するため、同じカメラで撮影した画像における入射光方向には大差がないことを用いる。そこで各カメラで撮影された画像を人力で数枚チェックし、反射位置からの入射光の角度の範囲を 360° の内 $50 \sim 70^\circ$ 程度に絞ることで誤認識率を減らす。それでも三次元空間での入射光方向と Specular Spike 方向が近く、多数のカメラで入射光だけでなく Specular Spike 方向もその範囲に入ってしまう場合は誤認識を生じてしまうが、これについては今後改善していくつもりである。

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。当然反射位置付近の画素値が高く、反射位置が領域 B に含まれている場合は収縮膨張処理によって除去されてしまうため、反射位置は入射光に相当する線分の延長線上にある。その反射位置に相当する画素では、物体表面上での拡散反射光が直接入っている。カメラに直接入ってくる反射光の強度を L とすると、散乱光の強度は $\alpha L (\alpha \ll 1)$ となる。よって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7に示す。水色の線分が入射光に相当する線分で、その片端の円の中心が反射位置に相当する点である。

3.4 画像内での Specular Spike 方向推定

3.3 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。



図 4: 観測画像

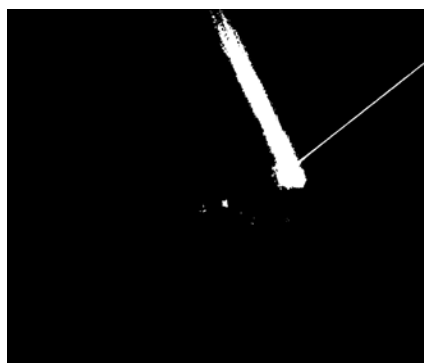


図 5: 二値化画像

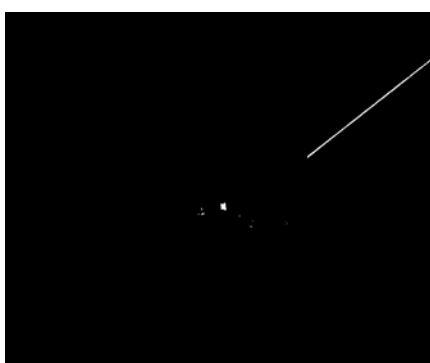


図 6: 太さ $d(= 15)$ 以上の部分を除いた画像

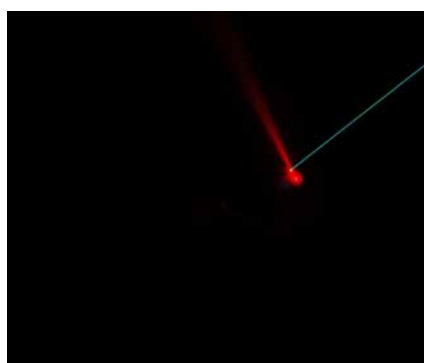


図 7: 入射光および反射位置検出結果

3.4.1 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く観測される。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 8 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。

$$I_{in} + I_d + I_s = I \quad (3)$$

I_d はどの方向でも変わらないので、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の等距離にある画素の画像上での方向と画素値の関係を図 9 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 9 の通りの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可能性があるからである。図 10 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 方向推定に妨げとなっている。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。

3.4.2 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

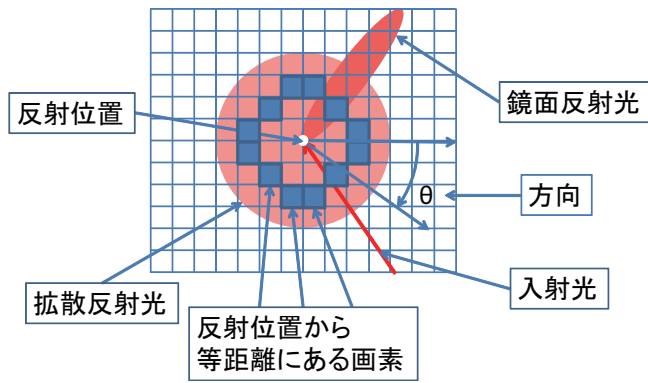


図 8: 画素値分布

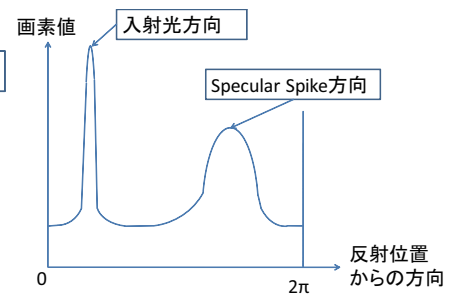


図 9: 等距離にある画素に関する方向と画素値の関係

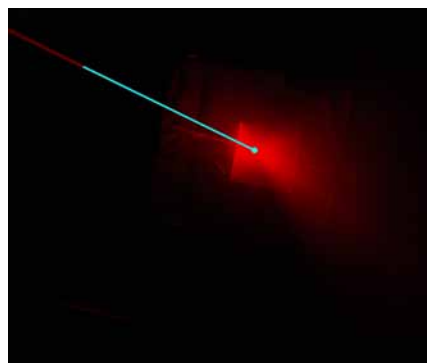


図 10: 写り込みの激しい画像

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 11 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 ($x = 0$) となる画素以外では、入射光の一次反射光が直接観測されることはない。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 αI_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 ρ 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 σ 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 11 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、 $1/R_i^2 \simeq 1/R_j^2$ 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 12 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 (4) 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 (4) 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。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

$$\begin{aligned}
I(x) &= \int_{-l}^l \frac{k}{r^2} da \\
&= \int_{-l}^l \frac{k}{a^2 + x^2} da \\
&= \int_{-\beta}^{\beta} \frac{k}{x^2(1 + \tan^2 \delta)} \frac{x}{\cos^2 \delta} d\delta \quad (\sin \beta = \frac{l}{r}) \\
&= \int_{-\beta}^{\beta} \frac{k}{x} d\delta \\
&= \frac{2k\beta}{x}
\end{aligned} \tag{4}$$

3.4.3 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 θ に向かう半直線上に位置する画素に注目する． θ 方向への反射光の強度を k_θ 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_θ 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_θ 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いう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いうため減衰法則に従わなくなる．また，写り込みがある部分では k_θ の値が大きくなりすぎてしまい，これも減衰法則に従わなくなる．上記のような部分から計算される k_θ は，その方向 θ にある他の部分から計算される k_θ と比較したとき外れ値として振る舞うことになる．

そこで，方向 θ にある全ての画素に対してそれぞれ k_θ を計算して k_θ 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_θ が推定できる．

しかし，この k_θ 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 θ では k_θ の値が大きくなってしまふ．よって入射光方向を除いて k_θ が極大になる方向のうち， k_θ が最大となる方向 θ を画像内での Specular Spike の方向とする．図 13 に図 10 での Specular Spike 方向の検出結果を示す．

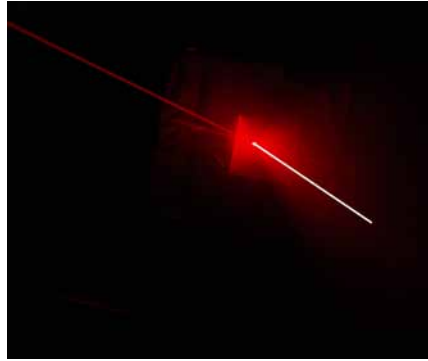


図 13: Specular Spike 方向検出結果

3.5 推定結果のステレオ視

3.5.1 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．従って 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，3.5.2 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．

また 3.3 節で述べたように，Specular Spike 方向を入射光方向と誤認識してしまう可能性もある．それが二枚以下ならば以下に述べる手順でその誤認識を無視できるが，三枚以上で Specular Spike 方向を入射光方向と誤認識してしまった場合は入射光方向と Specular Spike 方向を逆に推定してしまう場合がある．この問題については今後改善していくつもりである．

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のエピポーラ線をカメラ N_2 ($\neq N_1$) の画像上で引いた場合，カメラ N_2 の画像上の入射光に相当する半直線とカメラ N_1 の画像上での反射位置 (x_{n_1}, y_{n_1}) のエピポーラ線の交点 (x_{n_2}, y_{n_2}) を， (x_{n_1}, y_{n_1}) のカメラ N_2 の画像上の対応点にし，この交点とカメラ N_1 の画像上での反射位置からステレオ視で，三次元位置を求める．

$$\lambda_N \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{pmatrix} = P_N \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$n = n_1, n_2$ ， λ_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 (5) 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． $P_N, (x_n, y_n)$ が既知であれば (X, Y, Z) が式 (6) から得られる．また P^+ を P の擬似逆行列とすると，式 (6) から三次元空間での反射位置が求まる．

$$\lambda_N \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{N_1} \\ P_{N_2} \end{pmatrix}^+ \begin{pmatrix} \lambda_{N_1} x_{n_1} \\ \lambda_{N_1} y_{n_1} \\ \lambda_{N_1} \\ \lambda_{N_2} x_{n_2} \\ \lambda_{N_2} y_{n_2} \\ \lambda_{N_2} \end{pmatrix} \quad (6)$$

また，反射位置候補に加えて，その反射位置候補の獲得に用いた二枚の画像でそれぞれ抽出した入射光と Specular Spike に相当する線分から三次元空間での入射光方向と Specular Spike 方向の候補を獲得する．まず，一方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，他方のカメラ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．

3.5.2 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

3.5.1 節で任意の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る．これらの中から最も正確

な候補を選び，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．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，その三個の候補が一致するはずである．そこで三つの候補が最も近くなる三枚の画像の組み合わせを求め，三つの候補の中からそれらの平均に最も近い候補を正しい結果とみなす．つまり三枚以上の画像で正しく推定できていれば高精度な結果が得られる．以下にその求め方を述べる．

1. 三個の候補の反射位置の距離が離れていると入射光方向や Specular Spike 方向は正しく推定できないとみなせる．そこで，カメラ i と j で推定した三次元空間での反射位置を $p_{i,j}$ ，カメラ i_0 と j_0 で推定した入射光方向とカメラ i_1 と j_1 で推定した入射光方向のなす角を $\alpha_{i_0,j_0-i_1,j_1-in}$ ，Specular Spike 方向についても同様になす角を $\alpha_{i_0,j_0-i_1,j_1-re}$ として，表面位置誤差の閾値を T とする．また， $\alpha_{i_0,j_0-i_1,j_1-in}$ と $\alpha_{i_0,j_0-i_1,j_1-re}$ についても閾値を設定する必要があるため，それぞれ閾値を T_{in}, T_{re} とすると，三つのカメラとして n_0, n_1, n_2 が選ばれたとして，

$$\| \mathbf{p}_{n_0,n_1} - \mathbf{p}_{n_0,n_2} \|^2, \| \mathbf{p}_{n_1,n_2} - \mathbf{p}_{n_1,n_0} \|^2, \| \mathbf{p}_{n_2,n_0} - \mathbf{p}_{n_2,n_1} \|^2 < T \quad (7)$$

$$\alpha_{n_0,n_1-n_0,n_2-in}, \alpha_{n_1,n_2-n_1,n_0-in}, \alpha_{n_2,n_0-n_2,n_1-in} < T_{in} \quad (8)$$

$$\alpha_{n_0,n_1-n_0,n_2-re}, \alpha_{n_1,n_2-n_1,n_0-re}, \alpha_{n_2,n_0-n_2,n_1-re} < T_{re} \quad (9)$$

を満たさないものを除外する．つまり三個の候補の反射位置間の距離，入射光方向や Specular Spike 方向の角度のいずれかがある閾値以上の場合はその三個の候補の獲得に用いた三枚の組み合わせを不適であるとみなし除外する．

2. 1. で全て閾値以下となる場合，三個の候補の入射光方向間の角度，Specular Spike 方向間の角度を計算する． ${}_n C_3$ 通りの組み合わせのうち，その角度の最大値が最も小さくなる三枚の画像の組み合わせを最も正しい結果とみなす．

$$\min_{n_0,n_1,n_2} \left(\max(\alpha_{n_0,n_1-n_0,n_2-in}, \alpha_{n_1,n_2-n_1,n_0-in}, \alpha_{n_2,n_0-n_2,n_1-in}, \alpha_{n_0,n_1-n_0,n_2-re}, \alpha_{n_1,n_2-n_1,n_0-re}, \alpha_{n_2,n_0-n_2,n_1-re}) \right) \quad (10)$$

よって、 ${}_nC_3$ 通りの組み合わせから式 (7), (8), (9) を満たし式 (10) を最小にする n_0, n_1, n_2 の組み合わせを求め、その三枚の画像から推定した三通りの推定結果から以下の方法で一つを選ぶ。

ここでその三個の入射光方向、Specular Spike 方向を平均したものに最も近い推定結果が最も誤差が少ないとみなすことができる。そこでその三個の入射光方向、Specular Spike 方向の平均を求める。カメラ n_0, n_1, n_2 から求めた平均の入射光方向とカメラ n_{i_0}, n_{i_1} から推定した入射光方向候補の間の角度を $\alpha_{n_0, n_1, n_2 - n_{i_0}, n_{i_1} - in}$ とする。Specular Spike 方向についても同様に $\alpha_{n_0, n_1, n_2 - n_{i_0}, n_{i_1} - re}$ とする。これを用いて式 (11) を最小にする二台のカメラで撮影した画像から得られる候補を三次元空間での反射位置・入射光方向・Specular Spike 方向とする。

$$\begin{aligned} & \min(\max(\alpha_{n_0, n_1, n_2 - n_0, n_1 - in}, \alpha_{n_0, n_1, n_2 - n_0, n_1 - re}), \\ & \quad \max(\alpha_{n_0, n_1, n_2 - n_1, n_2 - in}, \alpha_{n_0, n_1, n_2 - n_1, n_2 - re}), \\ & \quad \max(\alpha_{n_0, n_1, n_2 - n_2, n_0 - in}, \alpha_{n_0, n_1, n_2 - n_2, n_0 - re})) \end{aligned} \quad (11)$$

第4章 実験

様々な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 方向から法線を計算し既知の形状や法線との類似性を評価基準とした．また今回は画像上での Specular Spike 方向を求める際方向 θ について全方向を 360 度分割して調べた．すなわち θ は 1° 刻みである．

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填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 台のカメラで撮影する．カメラは解像度 2000*3008 の一眼レフカメラを 4 台使用し，赤色のレーザーポインタを 8 個使用した．実験環境を図 14，15 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．レーザーはプログラムで自動的に切り換えられるようにしてあり，一度に照射されるレーザーポインタは 1 個である．事前にカメラ毎にチェスボードを用いて内部キャリブレーションを行い，点光源を用いて外部キャリブレーションを行った．

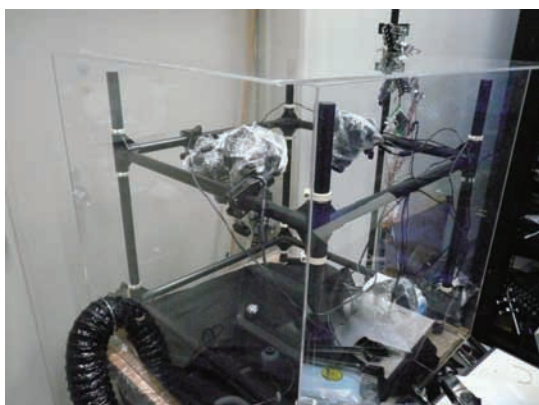


図 14: 撮影環境



図 15: レーザ照射装置

使用物体は，形状がシンプルな図 16 に示す金属球 (球体，半径 24mm) 及び図

17 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 16: 金属球



図 17: 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 , 理論上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のでこれを利用する . 本研究では既知の法線と提案手法により推定した入射光方向 , Specular Spike 方向からこれに従って計算される法線を比較し精度を評価する .

4.3 結果

4.2 の評価基準によりそれぞれの物体において提案手法で推定される入射光方向及び Specular Spike 方向の精度を評価する .

4.3.1 球体の表面での入射光方向・Specular Spike 方向推定

形状推定 提案手法を用いて金属球の三次元形状を推定した . 4 台のカメラで合計 296 フレーム撮影し , 253 点の反射位置を獲得した . 正解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 18(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 .

獲得した点がどれだけ正解の金属球の表面に近いかを示す尺度として , 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 . その度数分布を表 1 に , ヒストグラムを図 19 に示す .

図 18 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，表 1，図 19 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．

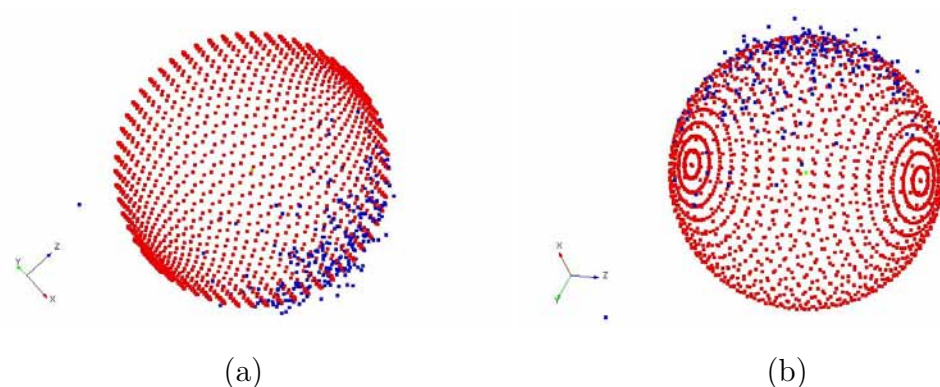


図 18: 金属球における形状の推定結果

誤差	頻度	累積%	平均誤差
0-1mm	175	69.44%	
1-2mm	45	87.30%	
2-3mm	18	94.44%	
3-4mm	5	96.43%	
4-5mm	3	97.62%	
5-6mm	3	98.81%	
6-7mm	1	99.21%	
7-8mm	0	99.21%	
8-9mm	0	99.21%	
9-10mm	0	99.21%	
10mm 以上	2	100.00%	
			1.078mm

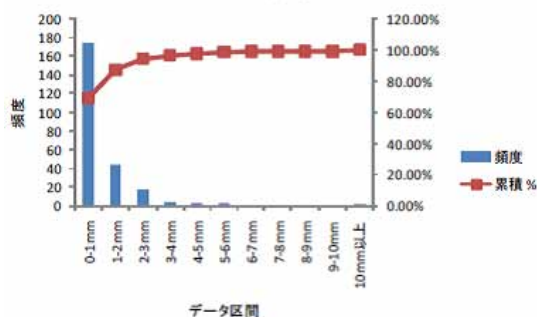


表 1: 金属球における反射位置の誤差 $|r - r'|$ の度数分布

図 19: 金属球における反射位置の誤差 $|r - r'|$ のヒストグラム

Specular Spike 方向推定 金属球においては，球の中心を始点とし推定した三次元空間での反射位置を終点とするベクトル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の間の角度を評価に用いる．

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，その二等分線の分布と既知の法線の分布を二方向から見た図を図 20(a),(b) に示す．図の中で青色のベクトルが推定した結果が

ら計算した法線で，赤色のベクトルがその点における既知の法線である．

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間の角度を用いる．推定した結果から得られ
た法線方向と既知の法線方向の間の角度を ω とし，それぞれの法線方向につい
て ω を計算して評価する．その度数分布を表2に，ヒストグラムを図21に示す．

表2，図21にあるように，推定した結果から得られた法線と既知の法線の間の
角度(誤差)は9割以上が 10° 以内に収まっており誤差の平均は 6.052° であった．

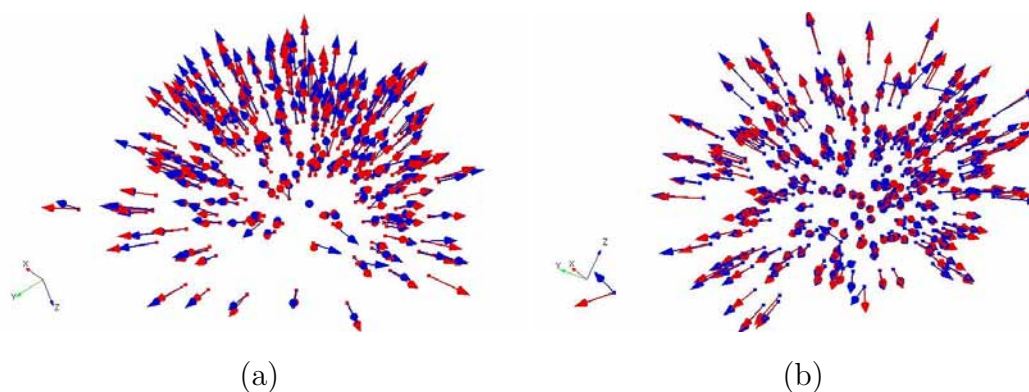


図 20: 金属球における法線分布の推定結果

誤差	頻度	累積%	平均誤差
0-1 °	18	7.11%	
1-2 °	43	24.11%	
2-3 °	42	40.71%	
3-4 °	36	54.94%	
4-5 °	34	77.08%	
5-6 °	22	81.82%	
6-7 °	12	85.38%	
7-8 °	9	88.54%	
8-9 °	8	99.21%	
9-10 °	5	90.51%	
10 °以上	24	100.00%	
			6.052 °

表 2: 金属球における法線の誤差 ω の度
数分布

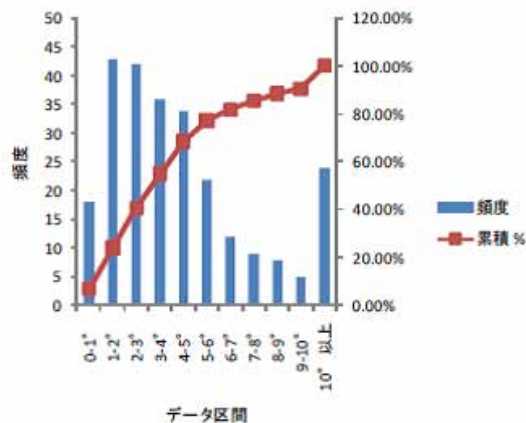


図 21: 金属球における法線の誤差 ω の
ヒストグラム

4.3.2 平面の表面での入射光方向・Specular Spike 方向推定

形状推定 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。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 22(a),(b) である。4.3.1 節と同様に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。その度数分布を表 3 に、ヒストグラムを図 23 に示す。

図 22 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。表 3、図 23 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。

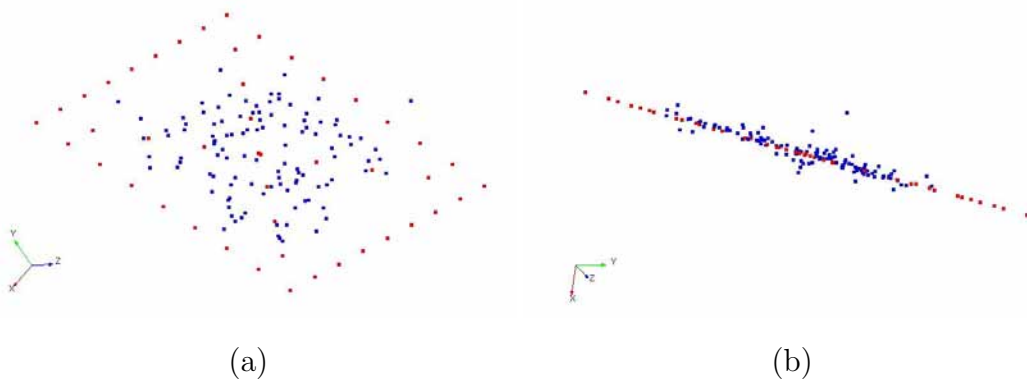


図 22: スチールトレイの裏における形状の推定結果

Specular Spike 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の間の角度を評価に用いる。

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、それらを二等分して求めた法線の推定結果の分布と既知の法線の分布を二方向から見た図を図 24(a)(b) に示す。4.3.1 と同様に

誤差	頻度	累積%	平均誤差
0-1mm	77	66.38%	
1-2mm	28	90.52%	
2-3mm	8	97.41%	
3-4mm	1	98.28%	
4-5mm	1	99.14%	
5-6mm	0	99.14%	
6-7mm	0	99.14%	
7-8mm	0	99.14%	
8-9mm	0	99.14%	
9-10mm	1	100.00%	
10mm 以上	0	100.00%	
			0.982mm

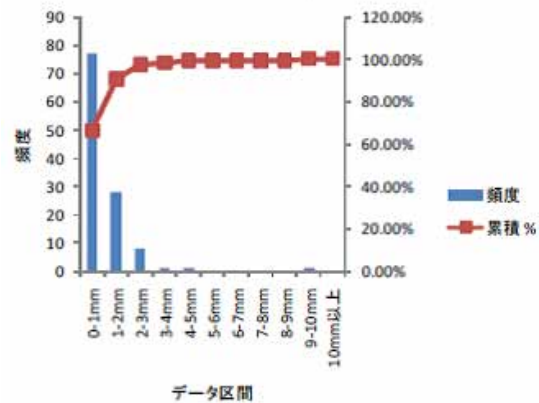


表 3: スチールトレイの裏における反射位置の誤差 d の度数分布

図 23: 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

図の中で青色のベクトルが推定した結果から計算した法線で，赤色のベクトルがその点における既知の法線である．

また 4.3.1 と同様に，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．推定した結果から得られた法線方向と既知の法線方向の間の角度を ω とし，それぞれの法線方向について ω を計算して評価する．その度数分布を表 1 に，ヒストグラムを図 19 に示す．

表 2，図 21 にあるように，推定した結果から得られた法線と既知の法線の間の角度 (誤差) は 9 割以上が 3° 以内に収まっている．また誤差の平均は 2.763° であった．よって，提案手法により入射光方向と Specular Spike 方向を安定して正確に推定することができた．

4.4 考察

形状推定 形状に関しては金属球とスチールトレイの裏に大きな違いは見られなかった．両者とも誤差平均は 1mm 程度となった．ここで，今回のキャリブレーション結果を利用すると，カメラにもよるが 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．

Specular Spike 方向推定 法線方向の比較に関してはスチールトレイの方が精度は高くなった．その原因として以下のことが挙げられる．

金属球において用いた既知の法線方向ベクトルは球の中心を始点とし，推定した三次元空間での反射位置を終点とするベクトルであるため，そもそも三次元空間での反射位置推定にずれが生じる場合，既知の法線方向そのものの信憑性が低くなってしまふ．それに対しスチールトレイの裏は平面なので法線方向が場所によらず一定であるため，どのデータに対しても三次元反射位置の誤差によらず正確な法線方向と比較することができたものと考えられる．

また，誤差が 10° 以上になってしまったデータについて，鏡面反射光の広がりが大きく，偶然 Specular Spike 方向から離れた方向を推定してしまうといった原因が考えられる．さらに金属球の場合にはそれとは別に，入射光が球の下半分に当たるなどして鏡面反射光が実験装置の床 (黒い布) に写り込みその写り込んだ部分に向かう方向が Specular Spike 方向だと推定してしまうことなどが挙げられる．その場合は図 20 にあるように誤差が 10° を大きくオーバーしてしまうこともあり，表 2 の平均誤差が大きくなる原因となる．

その他誤差が生じる原因としては以下のことが挙げられる．今回ロバスト推定に用いた画素の数は各 θ につき反射位置からの距離が 2,4,6,...,1000 の 500 画素で固定していたが，ロバスト推定に用いる画素の範囲が広すぎると鏡面反射光が弱すぎる場合に精度が悪くなり，狭すぎると写り込みの影響を受けやすくなり同様に精度が悪くなる．

最後にスチールトレイでの精度を評価すると，画像上での誤差が x° だった場合三次元空間で x° 以上の誤差が生じ，今回三次元空間上での誤差平均は 2.763° であり画像上での誤差平均はそれよりも低くなるので，画像上で 360 分割した場合の精度としては十分良いといえるだろう．金属球においては先ほど述べた通り既知の法線方向の信憑性を確かめる必要がある．

精度を上げるための解決策をまとめると，

- 画像の解像度を上げる … 形状，Specular Spike 方向の精度を上げる
- レーザの幅を細くすることで鏡面反射の広がりを狭くする … Specular Spike 方向の精度を上げる
- シャッタースピードを変えることで鏡面反射の広がりを調整する … Specular Spike 方向の精度を上げる
- k_θ を推定するのに用いる θ 方向の画素数を調整する … Specular Spike 方向

の精度を上げる
となる。

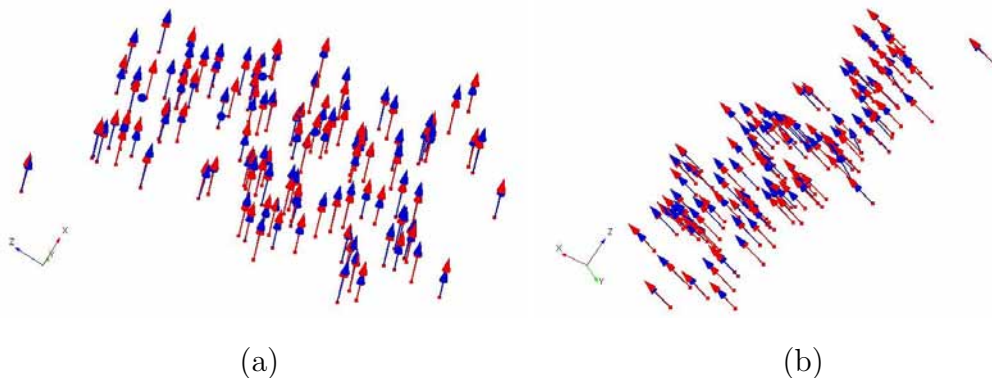


図 24: 金属球における法線分布の推定結果

誤差	頻度	累積%	平均誤差
0-1 °	72	62.07%	
1-2 °	29	87.07%	
2-3 °	4	90.52%	
3-4 °	2	92.24%	
4-5 °	2	93.97%	
5-6 °	1	94.83%	
6-7 °	3	97.41%	
7-8 °	0	97.41%	
8-9 °	0	97.41%	
9-10 °	0	97.41%	
10 °以上	3	100.00%	
			2.763 °

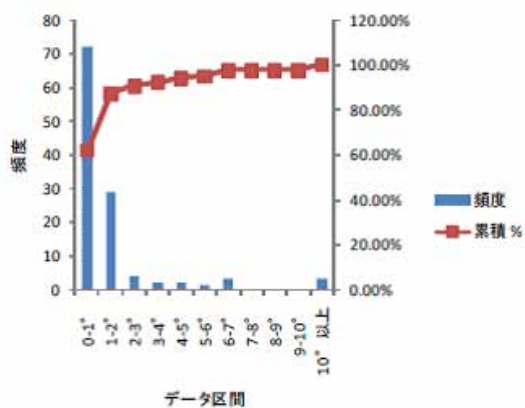


表 4: スチールトレイの裏における法線の誤差 ω の度数分布

図 25: スチールトレイの裏における法線の誤差 ω のヒストグラム

第5章 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・入射光方向・Specular Spike 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。ただし、金属球の法線方向においては既知の法線方向の設定の仕方に問題があり、提案手法で精度良く三次元空間での Specular Spike 方向が推定できるかを確認することができなかった。

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られる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、熱心なご指導を賜りました美濃導彦教授、角所考准教授、舩富卓哉助教、飯山将晃講師に深く感謝いたします。また、グループミーティングでアドバイスをして下さいましたモデルグループの皆様、ならびに美濃研究室の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] K. E. Torrance and E. M. Sparrow . *Theory of off-specular reflection from roughened surfaces* . Journal of the Optical Society of America. 57, 1104–1114 (1967) .
- [2] B.T. Phong . *Illumination for computer generated picture* . Communications of the ACM, vol.18, no.6, pp.311-317, June 1975 .
- [3] 町田 貴史, 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 , 2006 年 6 月 .
- [4] テムニランラット ピッチャヤガン . 複数の反射特性を考慮したチンダル現象下でのレーザー光到達点推定 . 修士論文 , 2008 年 2 月 .