

# 修士論文

二色性反射モデルに基づく反射の解析

高速反射成分分離

疎な形状データと密な法線マップを使用した  
ロバスト反射パラメータ推定

Reflection Analysis Based on  
Dichromatic Reflection Model

Fast Separation of Reflection Components

Robust Estimation of Reflection Parameters using  
Rough Shape Data and Dense Normal Map

2008年2月4日提出

指導教官 池内克史 教授



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO

情報理工学系研究科 電子情報学専攻

66435 肥後 智昭

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	背景	2
1.2	関連研究	3
1.2.1	形状の取得	3
1.2.2	反射成分分離	5
1.2.3	正確な幾何形状を用いた反射特性の推定	8
1.3	本論文の構成	8
<b>第 2 章</b>	<b>物体表面の反射特性</b>	<b>11</b>
2.1	反射の種類	12
2.2	二色性反射モデル	13
2.3	鏡面反射と拡散反射	13
2.4	BRDF	14
2.4.1	Lambertian モデル	15
2.4.2	Torrance-Sparrow モデル	15
2.5	スペクトルと RGB	16
<b>第 3 章</b>	<b>高速反射成分分離</b>	<b>18</b>
3.1	本手法の概要とその位置付け	19
3.2	色空間	19
3.2.1	Hue, Saturation, Intensity	19
3.2.2	色空間	19
3.2.3	ホワイトバランスの補正	21
3.3	提案手法：高速反射成分分離	21
3.3.1	提案手法の原理とその証明	22
3.3.2	アルゴリズム	26
3.4	実験	27
3.5	考察	28

<b>第 4 章</b>	<b>疎な形状データと密な法線マップを用いた反射パラメータ推定</b>	<b>30</b>
4.1	本手法の概要とその位置付け . . . . .	31
4.2	Photometric stereo . . . . .	32
4.3	提案手法：幾何形状を用いた多視点 Photometric stereo . . . . .	33
4.3.1	多視点 Photometric stereo . . . . .	33
4.3.2	法線マップ . . . . .	34
4.3.3	法線と反射パラメータの推定 . . . . .	35
4.4	実験 . . . . .	40
4.5	考察 . . . . .	50
<b>第 5 章</b>	<b>Specular-free 画像によるロバスト反射パラメータ推定</b>	<b>53</b>
5.1	本手法の概要とその位置付け . . . . .	54
5.2	提案手法：ロバストな反射パラメータ推定 . . . . .	54
5.2.1	Specular-free 画像を用いた法線の推定 . . . . .	55
5.2.2	類似度計算による最適な解ベクトルの決定 . . . . .	56
5.2.3	拡散反射パラメータの推定 . . . . .	57
5.2.4	鏡面反射パラメータの推定 . . . . .	57
5.3	実験 . . . . .	59
5.4	考察 . . . . .	65
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>68</b>
6.1	まとめ . . . . .	69
6.2	今後の展望 . . . . .	70
<b>付録 A</b>		<b>72</b>
A.1	カメラパラメータ . . . . .	72
A.2	Specular-free 画像 . . . . .	74
A.3	相互反射の種類 . . . . .	76
	<b>謝辞</b>	<b>79</b>

# 目次

1.1	レーザレンジセンサによる距離データの誤差 . . . . .	3
1.2	計測誤差による法線の誤差 . . . . .	4
1.3	無限遠光源の仮定による誤差 . . . . .	5
1.4	偏光板による鏡面反射成分の除去 . . . . .	6
2.1	反射の種類 . . . . .	12
2.2	鏡面反射と拡散反射 . . . . .	13
2.3	物体表面における反射 . . . . .	14
2.4	BRDF における角度パラメータ . . . . .	15
2.5	Lambertian モデル . . . . .	15
2.6	Torrance-Sparrow モデル . . . . .	16
2.7	RGB の計測 . . . . .	17
3.1	色の要素 . . . . .	20
3.2	色空間 . . . . .	20
3.3	Saturation-intensity 図 . . . . .	22
3.4	白色光源下での鏡面反射成分除去 . . . . .	27
3.5	赤色光源下での鏡面反射成分除去 . . . . .	28
3.6	緑色光源下での鏡面反射成分除去 . . . . .	28
3.7	青色光源下での鏡面反射成分除去 . . . . .	28
3.8	一つの hue に二つの surface color がある例 . . . . .	29
3.9	一つの hue に二つの surface color がある場合の傾き $A$ の推定 . . . . .	29
4.1	法線マップ . . . . .	35
4.2	$(X, Y)$ のプロットと最小二乗法による直線近似 . . . . .	38
4.3	ロバストな直線近似アルゴリズム . . . . .	39
4.4	法線および反射パラメータの推定の流れ . . . . .	40
4.5	物体 1 の入力 . . . . .	41
4.6	物体 1 の推定結果 . . . . .	41

4.7	$K_{S,C}$ と $\sigma$ の推定直線	42
4.8	物体 2 の入力	43
4.9	物体 2 の推定結果と真値との比較	43
4.10	物体 3 の入力	44
4.11	物体 3 の推定結果と真値との比較	45
4.12	ポリゴンメッシュモデルによる形状と実際の形状との差異	46
4.13	入力幾何形状の解像度の違いによる推定結果 (物体 2)	47
4.14	入力幾何形状の解像度の違いによる推定結果 (物体 3)	48
4.15	$\sigma$ の違いによる推定結果のレンダリング画像	50
4.16	$\sigma$ に対する反射パラメータの誤差率	51
5.1	Specular-free 画像の例	55
5.2	解ベクトルの決定	57
5.3	提案手法における法線および反射パラメータの推定の流れ	59
5.4	物体 2 の推定結果	60
5.5	鏡面反射成分が広い範囲で観測される場合の推定結果	60
5.6	物体 A の入力データ	61
5.7	物体 A の推定結果	61
5.8	物体 B の入力データ	62
5.9	物体 B の反射パラメータの推定	62
5.10	推定結果によるレンダリングと真値との比較 (物体 B)	63
5.11	法線の推定効果	64
5.12	物体 3 の推定結果	65
5.13	物体 C の推定	65
5.14	物体 D の推定	66
A.1	世界座標と画像座標の関係	73
A.2	Specular-free 画像の生成	76
A.3	相互反射の種類	77

# 表目次

4.1	物体 1 の推定された反射パラメータ . . . . .	42
4.2	物体 2 の推定された反射パラメータ . . . . .	44
4.3	物体 3 の推定された反射パラメータ . . . . .	44
4.4	入力幾何形状の解像度の違いによる反射パラメータの推定結果 (物体 2) . . .	46
4.5	入力幾何形状の解像度の違いによる反射パラメータの推定結果 (物体 3) . . .	48
4.6	$\sigma$ の違いによる反射パラメータの推定結果 (物体 1) . . . . .	49

# 第1章 序論

## 1.1 背景

近年，科学技術の目覚ましい発展によって，様々な分野において機械や計算機を用いたオートメーション化が進んでいる．こうした自動化への流れは，元々人手不足を補うためや，作業を効率良くおこなうために，単純な繰り返し作業を高速かつ正確におこなうことが主な目的であった．しかし近年では計算機に認識をさせることで適応的な処理をおこなったり，大量のデータの中から特徴を抽出することで，人間には処理することが困難な問題を解決することができるようになってきている．

計算機に実世界の情報を認識させたり，データを与えたりする場合に，非常に有効かつ容易に実現できる方法の1つとして，カメラなどで撮影した画像情報を用いる方法がある．このように画像情報によって計算機に認識，解析させるための研究はコンピュータビジョン(CV)と呼ばれ，ロボットの目を作ることを目的としている．今日，コンピュータビジョンは機械産業や医療，建築，教育，エンターテインメントなど幅広い分野で研究が進められている．特にコンピュータグラフィックス(CG)やバーチャルリアリティ(VR)の分野では，現実感の高い映像や，3次元モデルを用いたコンテンツが必要とされ，最近の映画産業やゲーム業界においても，光の反射を物理モデルに即して計算し，非常にリアリティの高い映像を提供している．このようなリアリティの高い映像を作成するためには，対象とする物体の形状，反射特性，周囲の光源環境などの正確なモデル化が不可欠であり，人手によってこのような正確なモデルを作成するには，高い技術と多大な時間費用が必要となる．そのためこのようなモデル作成の自動化が期待されている．

こうした背景からコンピュータビジョンの分野では，現実の物体を撮影した画像を元に物体の形状，反射特性，光源環境などの推定をおこなうインバースレンダリングの研究が盛んにおこなわれている．カメラで撮影された2次元画像は，物体の反射光を記録したものであり，物体や光源の特徴を推定するための情報として扱うことができる．そのため，ある画像が与えられた際にその反射光を解析することによって，写っている物体の形状やテクスチャといった物体固有の特徴や，その光源環境の分布などの非常に有益な情報を得ることができる．

また物理モデルに即してこれらの推定をおこなうため，現実の物体の反射特性をより正確に表現することが可能である．

そこで本論文では，インバースレンダリングの枠組みとして光源環境を既知とした場合に，画像情報を用いて物理モデルに即して解析をおこない，物体の反射特性を推定する手法を提案する．



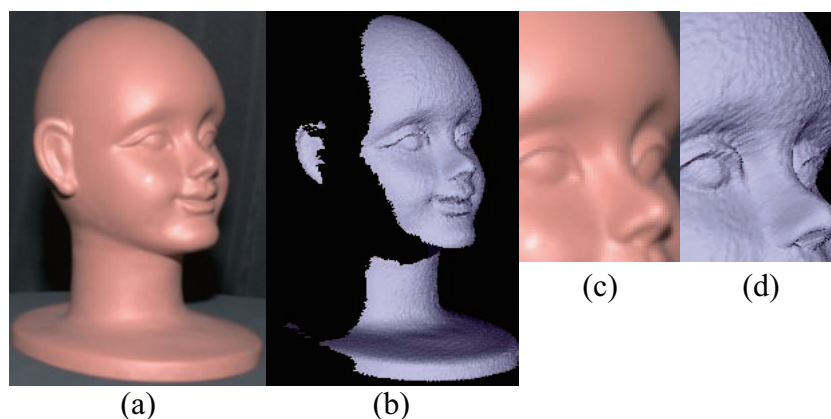


図 1.1: レーザレンジセンサによる距離データの誤差  
 (a) : 対象物体の写真, (b) : 距離データ (面として表示), (c)(d) : (a)(b) の拡大図  
 距離データは誤差によって滑らかな面に凹凸が生じている

## 1.2 関連研究

### 1.2.1 形状の取得

反射特性の推定のためには物体の形状が必要となることが多い。本稿においても 4 章および 5 章の提案手法では、物体の幾何形状を必要とする。

ここでは従来の 3 次元幾何データの取得方法として、レーザレンジセンサ、Photometric stereo、視体積交差法について述べる。

#### レーザレンジセンサ

レーザレンジセンサは計測方法の違いから 2 種類に分けられる。一方は VIVID (コニカミノルタ製) などの三角測距方式である。三角測距とはレーザを物体表面に照射し、その反射光を CCD カメラで受光することによって、三角形の辺や角度から距離を求めるものである。もう一方は Cyrax (Leica 製) などのタイムオブフライト方式である。タイムオブフライトとは、レーザを照射してから物体表面で反射して戻ってくるまでの時間を計測し、その時間から距離を求めるものである。

どちらの方法も距離データをかなり正確に計測することができるため、正確な形状を知りたい場合などに様々な分野でよく用いられる。

しかし機器ごとにその大きさは異なるものの、レンジセンサの精度により距離データには多少の誤差が生じる (図 1.1)。また、様々な方向から計測した距離データを位置合わせ、統合処理をおこない、ポリゴンメッシュモデルを作成する過程でも計算誤差が生じる。この

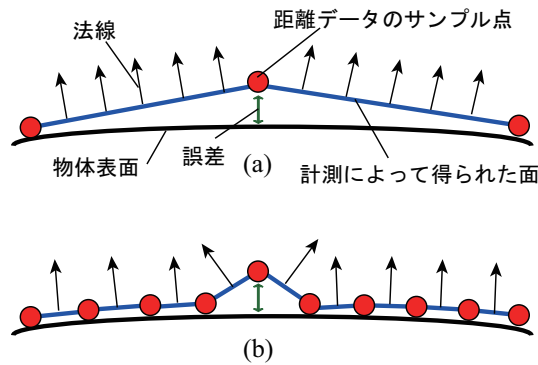


図 1.2: 計測誤差による法線の誤差

(a) : サンプル数が少ない場合, (b) サンプル数が多い場合  
 サンプル数が多いと計測誤差による法線の誤差は局所的に大きくなる

ような誤差は距離データとしては些細なものであっても、法線データとしては大きな影響として現れやすい。法線データは距離データを微分演算することによって得るため、図 1.2 に示すように、距離データを密に計測するほど、計測誤差による法線の誤差は大きくなってしまふ。

### Photometric stereo

Photometric stereo は 4.2 節で説明するように、画像列から法線データを求める手法である。反射モデルにおいて物体の見えは物体表面の法線に依存して変わるため、物体の見えから法線を推定する Photometric stereo は法線を推定する手法として最適であり、近年でも [1][2][3] など数多くの研究がなされている。

通常は光源を無限遠とし、物体表面上では一様に同じ方向から光が入射することを仮定しているため、光源を十分に離して計測できない場合には、推定される法線は光源方向や逆二乗則の影響を受けて誤差を含んでしまう (図 1.3)。

Photometric stereo を用いて形状のデータを得るためには、法線データを積分処理する必要がある。そのため微小な誤差が蓄積されて全体の形状としては歪みが生じやすいといった問題がある。

### 視体積交差法

視体積交差法は複数のカメラで対象物体を観測して得られるシルエットから形状を復元する手法である [4][5]。画像データから直接形状を推定できるが、複数台のカメラのキャリブレーションが必要であったり凹物体の形状を得ることができないといった問題がある。また

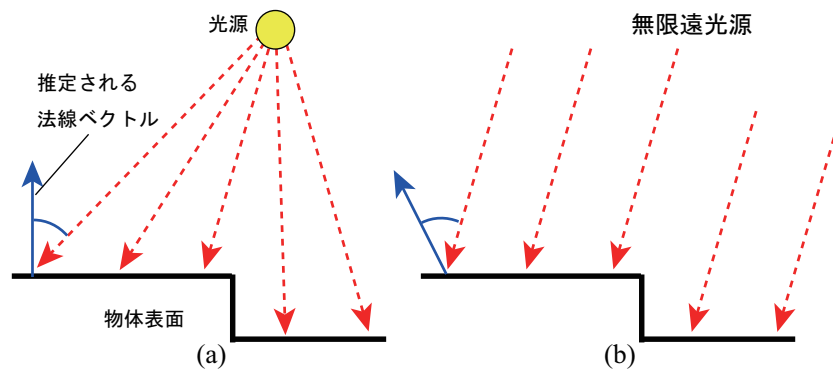


図 1.3: 無限遠光源の仮定による誤差

(a) : 現実のモデル, (b) : 無限遠光源を仮定した場合のモデル

現実には光源方向ベクトルは物体表面の位置により異なる．また逆二乗則に従って光源からの距離が離れると照度が小さくなる．物体表面の明るさから法線と光源ベクトルのなす角を求めるため，(b)のモデルでは照度および光源方向ベクトルが現実とは異なるために，誤った法線が推定されてしまう．

レンジセンサを用いた場合と同様に，法線データを得るためには微分演算が必要となるため，形状の些細な誤差が法線の大きな誤差として現れやすい．

## 1.2.2 反射成分分離

二色性反射モデルに基づいて反射光の解析をおこなう場合，反射光は拡散反射成分と鏡面反射成分に分けて考えることができる．また，これらの反射成分を分離する様々な手法が提案されている．拡散反射成分と鏡面反射成分の分離をおこなう主な手法は大きく分けて，偏光板を用いる手法，複数の画像を用いる手法，単一の画像を用いる手法に分類することができる．

### 偏光板を用いる手法

偏光板を通した光を光源としてその反射光を観測すると，拡散反射成分と鏡面反射成分で反射の仕組みが異なるため，反射光の偏光に違いが生じる．具体的には拡散反射成分は物体内部で複雑な反射を繰り返すため非偏光な光として観測されるが，鏡面反射成分は物体表面で反射するため偏光した光として観測される．Wolff[6]やNayar[7]は，これらの違いを利用して鏡面反射成分の除去を行った．

偏光板を用いた方法は，反射光を物理的に拡散反射成分と鏡面反射成分とに分けることができるため，うまく鏡面反射成分を除去することができる．しかしながら，撮影時に偏光板を適切に取り付けたり，偏光板を回転させながら何枚も画像を取得する必要があるなど，使い勝手が悪いという問題がある．

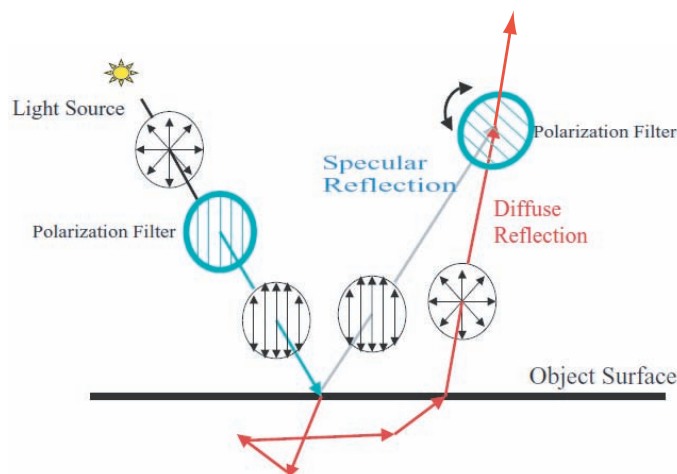


図 1.4: 偏光板による鏡面反射成分の除去

また、鏡面反射成分の除去された画像を得ることだけが目的であれば、反射光に対してもう一度偏光板を通すことで、物理的に鏡面反射成分を除去した拡散反射成分のみの反射光を観測することができる [8](図 1.4)。そのため、近年では偏光板を用いて得られた画像を解析して鏡面反射成分を分離する研究はあまりおこなわれておらず、偏光板を用いて透明物体の形状を推定する [9] などの、より具体的な研究がおこなわれている。

#### 複数の画像を用いる手法

複数の画像を用いて鏡面反射成分を分離する方法には、大きく分けて 2 種類の方法がある。一つは、同じ視点で光源の方向を変えて得られた画像を用いる方法、もう一つは、光源の位置は同じで、視点の位置を変えて得られた画像を用いる方法である [10]。ここでは、光源方向の異なる複数枚の画像を用いて鏡面反射成分を分離する方法について説明する。

佐藤ら [11] は、RGB の色空間にさらに光源方向の成分を加えた 4 次元の Temporal-color space 上で、光源の位置を様々に変化させて撮影したたくさんの画像列から拡散反射成分、鏡面反射成分のそれぞれの反射率を求めた。さらに法線とアルベドを推定することで形状の復元もおこなった。

Lin ら [12] は、同じ光源を異なる方向から当てて得られた、同じ視点における 2 枚の画像を用いて鏡面反射成分の除去をおこなった。カメラについてナローバンドを仮定し、拡散反射成分の反射率を基底の線形和で表すことで反射モデルを設定し、光源を推定することによって反射率を求めた。

向川ら [13] は、固定視点で光源の位置を変化させながら撮影した複数の画像列を用いて、画像の線形化手法により拡散反射成分、鏡面反射成分だけでなく attached shadow や cast shadow

も含めた分類をおこなった。

佐藤らの手法や向川らの手法ではかなりの枚数の画像を使うが，Linらの手法では，鏡面反射成分が存在する領域が重ならないように光源の方向を十分に变えて撮影した2枚の画像のみを用いる。

複数画像を用いると，たくさんの情報を得ることができるため，近年では鏡面反射成分の分離のみならず，向川らの手法のように，shadowの分類をおこなうものや，Photometric stereoを用いた形状復元や，異方性反射などの複雑なBRDFを求める傾向がある。

### 単一画像を用いる手法

単一の画像から分離を行う方法は，Shafer[14]が二色性反射モデルを導入し，RGB色空間において色の分布を解析することで始めて鏡面反射成分の除去をおこなった。またShaferの手法を拡張して，Klinkerら[15]はT-shapeの色分布によって，拡散反射成分と光源の色ベクトルを求めて分離をおこなった。しかし，これらの手法では，画像内にたくさんのsurface colorが存在する場合にはそれぞれのベクトルを特定することが難しい。

これに対しBajcsyら[16]は物体の反射率の基底関数を用いて，反射光を3つの基底関数の線形和で表し，3つの基底関数を軸としたS空間における色の分布を解析することによって拡散反射成分と鏡面反射成分を分離した。S空間ではhue(色相)，saturation(彩度)，brightness(輝度)が定義されており，hueやsaturationによって色空間における領域分割をおこなうことで，たくさんのsurface colorが存在する場合であっても拡散反射成分と鏡面反射成分を分離することが可能である。

近年では，Ping TanらやR. T. Tanらによって，より正確な分離手法が考案されている。Ping Tanら[17]は，TV inpaintingという全変動を考えて，鏡面反射成分の存在する領域を拡散反射成分が滑らかにつながるように色を塗りなおし，さらに二色性反射モデルとNIR仮定に基づいた光源に関する制約を設けることによって，鏡面反射成分を除去している。

R. T. Tanら[18]は入力画像から，鏡面反射成分は存在しないがsurface colorの異なるspecular-free画像を作成し，入力画像とspecular-free画像とを繰り返し比較することによって鏡面反射成分の分離をおこなった。

R. T. Tanら[19]はまた，入力画像とspecular-free画像それぞれの反射率を基底関数の線形和で表し，両者の第二，第三基底の重みが一致することを利用して鏡面反射成分を分離した。

このように，近年ではより複雑なアルゴリズムを用いて正確に鏡面反射成分の分離をおこなう傾向にある。さらに正確に分離をおこなうためには，先に見たように偏光板などの特殊な道具を用いたり，入力画像の枚数を増やしたりすることが必要となる。しかしながら単一画像を用いた方法の利点としては，データを取得するためのセットアップが非常に簡便であ

り、ステレオや物体認識などの他の様々な手法にも応用しやすい点が挙げられる。

### 1.2.3 正確な幾何形状を用いた反射特性の推定

反射特性を推定する手法に関しては、池内ら [20] をはじめ、これまでに多くの研究がなされてきた。しかしながら物体の反射を正確に表現するためには、反射パラメータだけでなく幾何形状を十分に精度良く求める必要がある。

そこで本稿では正確な幾何形状から反射特性を推定する研究の例として佐藤 [21], Lensch [22], Yu [23], Birkbeck [24] などの手法について紹介する。

佐藤ら [21] はレンジセンサとカメラを用いてポリゴンメッシュモデルと画像を取得し、三角メッシュを細かく分けて、その中の法線を距離画像から得られた 3 次元点の集合から求めた。また反射パラメータの推定の際には密な間隔で画像を取得し、それでもなお鏡面反射が観測されない部分は補間によってパラメータを求めた。

Lensch ら [22] はレンジセンサで得られたポリゴンメッシュモデル上に lumitexel を定義し、BRDF として Lafortune モデルのパラメータを非線形最適化によって求めた。初めは全ての lumitexel で均一の BRDF であるとしてパラメータを推定し、当てはまりが悪い lumitexel を検出し、クラスタリングによってそれらを分離した。そしてクラスターごとに BRDF を推定し、再び当てはまりの悪い lumitexel をクラスタリングすることを繰り返して、クラスターごとに BRDF を求めた。さらに求めた BRDF に適合するように、非線形最適化によって法線の修正をおこなった。

Yu ら [23] は視体積交差法によって得られた幾何形状に対して、Phong モデルの反射パラメータと形状を交互に繰り返し推定をおこない、非線形最適化問題を Trust Region Reflective Newton (TRRN) 法を用いて解いた。さらに形状の精度を上げるために三角メッシュを再分割し、Richardson Extrapolation を用いることで分割の収束値を求め、推定をおこなった。

Birkbeck ら [24] は視体積交差法によって得られた形状を初期形状として、多視点画像を用いて photo-consistency 関数を偏微分方程式によって最小化することで、形状の修正および Lambertian モデルと Blinn-Phong モデルの反射パラメータの推定をおこなった。また物体を計測する際にはターンテーブルを用いることで効率化をはかった。

## 1.3 本論文の構成

このように様々な手法が提案されているが、反射成分の分離手法では高速に分離をおこなう手法や、反射特性の推定手法では正確かつロバストに推定をおこなう手法はほとんどないため、本論文では以下の 3 つの手法を提案する。

1. 単一の画像から高速に拡散反射成分と鏡面反射成分を分離する手法
2. 疎な形状データと多視点の画像を用いて、物体表面の法線および反射特性を表す反射モデルのパラメータを正確に求める手法
3. 2の手法を実物体に適用するために、法線と反射パラメータをロバストに推定する手法

1つ目の手法は、単一画像を入力とする長所を生かし、実時間で反射成分を分離する手法である。鏡面反射成分は観測位置によって見えが変化するため、ステレオ視におけるマッチングや、顔認識などのシステムでは大きな問題となる。またこれらのシステムでは実時間処理も重要な要素となってくる。反射成分分離手法は1.2.2節で述べるように、偏光板を用いるものや、複数の画像を用いるものなど様々な手法が提案されている。しかし偏光板を用いる手法は適切に偏光板を取り付け、制御しながら計測をおこなう必要があるため実時間処理は難しい。また複数の画像を用いる場合は、視点や光源の位置を変えて複数枚の画像を撮影する必要があり、処理する画像枚数も多くなるため高速な処理をおこなうことは難しい。そこで我々は単一画像を入力として、RGB空間から別の色空間に射影し、その色空間での反射成分の特性を利用して、実時間で拡散反射成分と鏡面反射成分を分離する手法を提案する。

2つ目の手法は、物体表面の形状と法線をそれぞれ異なる方法で計測し、より正確な幾何データを取得する一方で、これを用いて反射パラメータの推定をおこなう手法である。一般に反射パラメータの推定は物体表面の正確な形状と法線が必要である。現実世界では形状あるいは法線の一方が既知であれば、もう一方を求めることが可能であると考えられる。しかし、計算機上で扱うデータは離散的であるため、一方から他方を完全に復元することは難しい。そこで我々は形状と法線をそれぞれに適切な方法で計測することによって正確な幾何データを取得し、同時に反射パラメータの推定をおこなう手法を提案する。本手法から得られた法線データを法線マップとして形状に適用することによって、対象物体の細部の見えを損なうことなく、少ないデータ量で形状を表現することも可能である。さらに、現実に存在する物体のより正確なモデル化や、正確に推定された反射パラメータから物体表面の塗料や顔料などの分類をするといった応用も可能であると考えられる。

3つ目の手法は、2つ目の手法を実物体に適用するために、ロバストに法線と反射パラメータを推定する手法である。実物体を扱う場合、鏡面反射成分の影響を考慮する必要があったり、均一な材質で作られている物体であっても、その反射特性が一様ではない場合が存在する。そこで我々は実物体の反射特性を推定するために、鏡面反射成分の影響に対してロバストで、かつ物体表面上の微小な領域ごとに反射パラメータを推定することで、複雑な反射特性にも対応した推定手法を提案する。本手法と2つ目の手法を組み合わせることで、現実の物体をより正確にモデル化することが可能である。

本論文の構成は以下の通りである．1章は本章であり，本研究の背景と目的，関連研究について述べた．2章は本研究の基本となる物体表面の反射特性について説明する．3章は1つ目の提案手法である高速反射成分分離手法について述べ，実験および結果について考察をおこなう．4章は2つ目の提案手法として幾何形状を用いた多視点 Photometric stereo による法線および反射パラメータの推定手法について述べ，実験，考察をおこなう．5章では3つ目の提案手法として，4章の手法を一般的な実物体に適用するためのロバストな推定手法について述べ，実験によってその有効性を確かめる．6章では本論文で述べた提案手法およびその実験結果をまとめ，今後の課題について述べる．



## 第2章 物体表面の反射特性

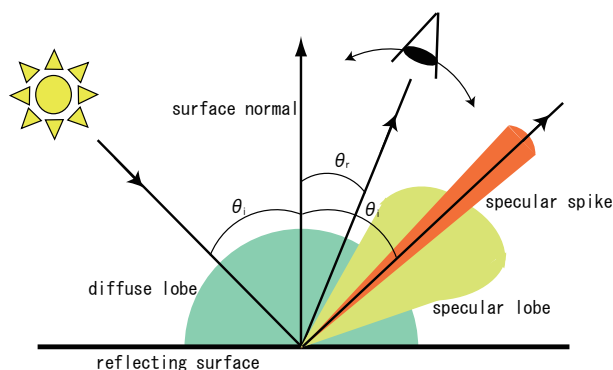


図 2.1: 反射の種類

本章では反射を解析するために必要となる物体表面の反射特性について説明する．主な内容としては，反射の種類，二色性反射モデル，拡散反射と鏡面反射，BRDF，スペクトルとRGBについて順に説明をおこなう．

## 2.1 反射の種類

反射光を空間的な見えに関して分類すると，等方性反射と異方性反射の2つに分けて考えることができる．光源と視点を固定して法線方向を軸に物体を回転させたとき，見え方が変化しない反射を等方性反射，見え方が変化する反射を異方性反射と言う．

自然界に存在する多くの物体は等方性反射物体である．一方，異方性反射にはサテンやベルベットのような複雑で微細な形状による反射，タマムシなどの構造色などの反射が存在する．本論文で扱う物体は等方性反射の物体に限り，以下では異方性反射については取り扱わない．

光源が等方性反射の物体表面に当たって反射するとき，その反射光は specular spike, specular lobe, diffuse lobe の3つに分類できることが Nayer ら [25] によって示されている (図 2.1)．

Specular spike は物体表面で反射され完全鏡面反射方向の極めて狭い角度に放射される非常に強い反射光で，物体表面が非常に滑らかな場合にのみ観測される．Specular lobe は物体表面で反射され完全鏡面反射方向をほぼ中心として放射される強い反射光で，物体表面が粗くなるほど反射光は広がり，その強さは弱くなる．Diffuse lobe は物体内部で複雑な反射を繰り返し散乱して放射される反射光で，視線方向  $\theta_r$  によらず同じ強さで観測される．

これら3つの反射光のうち，specular spike と specular lobe は光源方向  $\theta_i$  に対する完全鏡面反射方向付近で大きく重なるため，この2つの反射成分を分離するのは困難である．また物体表面の粗さが粗い場合には specular spike は非常に弱く，物体表面が非常に滑らかな場合は specular spike と specular lobe は完全鏡面反射方向付近の極めて狭い範囲に集中する．

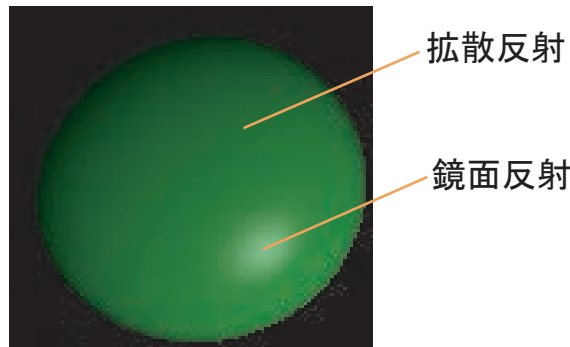


図 2.2: 鏡面反射と拡散反射

したがって，specular spike と specular lobe をまとめて 1 つの反射成分として扱っても一般的には問題ないと考えられる．

そこで本論文では，specular spike と specular lobe をまとめて specular(鏡面反射成分)，diffuse lobe を diffuse(拡散反射成分) として取り扱う．

## 2.2 二色性反射モデル

二色性反射モデルとは，S. A. Shafer によって提案された反射モデルで [14]「反射光のスペクトルは鏡面反射成分と拡散反射成分のスペクトルの線形和で表すことができる」というものである．二色性反射モデルは今日でも非常に多くの反射モデルの基礎となっている．

反射光の輝度を  $I(\lambda)$ ，鏡面反射成分の輝度を  $I_S(\lambda)$ ，拡散反射成分の輝度を  $I_D(\lambda)$  とすると，二色性反射モデルは

$$I(\lambda) = I_S(\lambda) + I_D(\lambda)$$

と表すことができる．ただし  $\lambda$  は光の波長である．

## 2.3 鏡面反射と拡散反射

鏡面反射と拡散反射はそれぞれ図 2.2 のように観測される．ここではそれぞれの反射光が物体表面でどのように反射するかについて述べる．

鏡面反射成分は物体外部の物質(大気など)と物体との屈折率の違いによって物体表面で起こる反射である．そのため反射光はフレネルの法則に従い，反射される光の量は入射角，物体の屈折率，入射光の偏光に比例する．屈折率は波長に比例するため，鏡面反射成分の光の量は波長に比例する．しかし，一般に可視光領域では波長に対して屈折率の変化は十分に小さく，一定であると見なすことができるため，鏡面反射成分の光の量は波長に対して一定

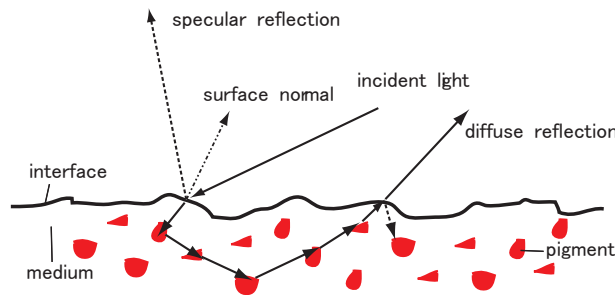


図 2.3: 物体表面における反射

であると近似できる．つまり鏡面反射成分のスペクトルは入射光のスペクトルと等しい．これを Neutral Interface Reflection(NIR) 仮定という．

また，反射の方向については，物体表面が十分に滑らかであれば，物体表面の法線に対して完全鏡面反射方向に放射される(図 2.3)．物体表面が粗くなると，完全鏡面反射方向付近で拡散して放射される．

一方，物体表面で鏡面反射成分として反射されなかった入射光は，図 2.3 に示すように，物体の内部に透過する．物体の内部に入った光は色素にぶつかり波長ごとに吸収されランダムな反射を繰り返しながら，物体内部の媒体中を進む．そしてこの光の一部は再び物体表面を通過して外部に放射されて拡散反射成分として観測される．そのため拡散反射成分は入射光とは異なる色になり，また Lambert の法則に従いあらゆる方向において同じ明るさで観測される．

## 2.4 BRDF

BRDF とは双方向反射率分布関数 (Bi-directional Reflectance Distribution Function) のことで，図 2.4 に示すように光源方向  $(\theta_i, \phi_i)$  から入射してくる入射光の照度に対する視点方向  $(\theta_r, \phi_r)$  への反射光の輝度の比率を表す関数である．BRDF は空間的に 4 つのパラメータを持つが，厳密には波長  $\lambda$  にも依存するため，5 つのパラメータの関数である．

しかし，実際には各波長ごとの反射率を取得または表現する方法が限られているため，RGB の 3 チャンネルごとに BRDF を定義し，4 つのパラメータの関数とすることが多い．さらに本論文で我々が扱う物体は等方性反射であるから，方位角については相対角度  $(\phi_r - \phi_i)$  で決めることができるため，3 つのパラメータの関数として表現される．

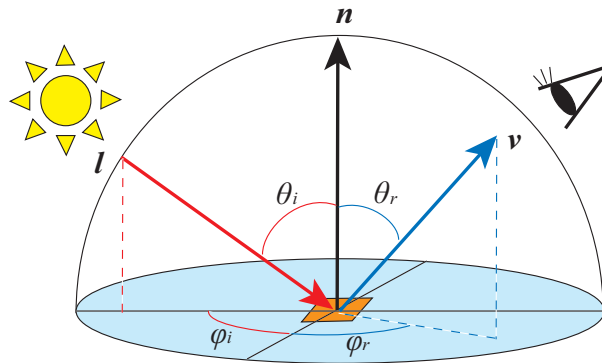


図 2.4: BRDF における角度パラメータ

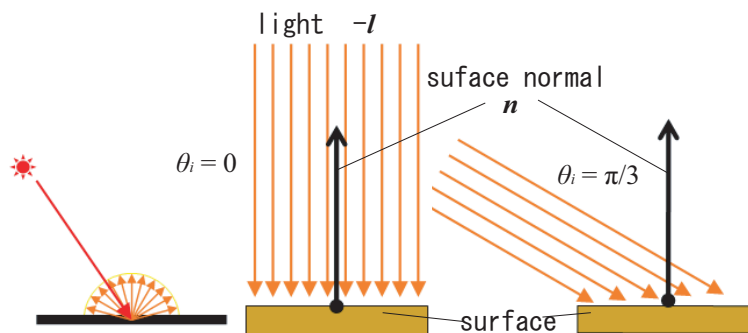


図 2.5: Lambertian モデル

### 2.4.1 Lambertian モデル

拡散反射成分は 2.3 節で示したように、視点の位置によらず同じように観測される。そのため拡散反射成分の明るさ  $I_D$  は物体表面に入射する光の量、つまり物体表面の単位法線ベクトル  $n$  と光源ベクトル  $l$  のなす角  $\theta_i$  に依存して決まり (図 2.5)、視点方向  $(\theta_r, \phi_r)$  および方位角  $(\phi_r - \phi_i)$  には無関係である。したがって Lambertian モデルは以下のように表される。

$$I_D = K_D l \cdot n = K_D |l| \cos \theta_i$$

ただし、 $K_D$  は拡散反射成分の大きさを表すパラメータであり、光源ベクトル  $l$  はその大きさが光源の明るさを表し、向きが光源方向を表すものとする。

Lambertian モデルは扱いやすく精度も良いため、拡散反射成分のモデルとして様々な手法やレンダリングに広く用いられている。

### 2.4.2 Torrance-Sparrow モデル

鏡面反射成分を表すモデルには Beckmann-Spizzichino モデル [26]、Torrance-Sparrow モデル [27]、Phong モデル [28]、Blinn モデル [29]、He-Torrance-Sillion-Greenberg モデル [30]

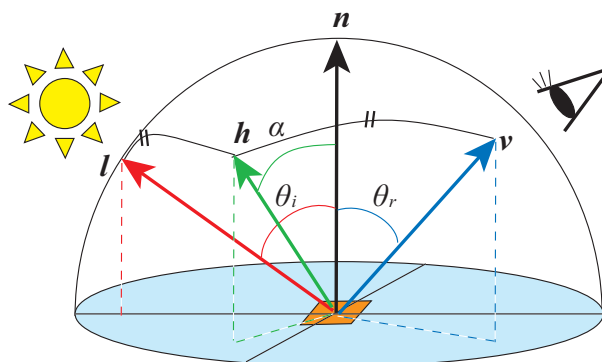


図 2.6: Torrance-Sparrow モデル

Ward モデル [31] , Lafortune モデル [32] , Ashikhmin モデル [33] など様々なモデルが提案されている .

我々は鏡面反射成分のモデルとして , Torrance-Sparrow モデルを用いる . Torrance-Sparrow モデルはマイクロファセットの原理に基づき , 幾何学的要因による光の減衰や off-specular を考慮したモデルである . しかし , フレネル反射係数や幾何学的な減衰のパラメータは複雑であるため , これらのパラメータを一定であるとして単純化したモデルを用いることが多い . Torrance-Sparrow の簡易モデルにおいて鏡面反射成分の明るさ  $I_S$  は図 2.6 に示すように , 単位法線ベクトル  $n$  と光源ベクトル  $l$  のなす角を  $\theta_i$  , 単位法線ベクトル  $n$  と単位視線方向ベクトル  $v$  のなす角を  $\theta_r$  , 光源ベクトル  $l$  と単位視線方向ベクトル  $v$  のなす角を二等分する単位ベクトル  $h$  と法線  $n$  のなす角を  $\alpha$  として次式のように表される .

$$\begin{aligned} I_S &= \frac{K_S}{\cos \theta_r} |l| \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \\ &= \frac{K_S}{v \cdot n} |l| \exp\left(-\frac{\{\arccos(\mathbf{h} \cdot \mathbf{n})\}^2}{2\sigma^2}\right) \end{aligned}$$

ただし ,  $K_S$  は鏡面反射の強さを表すパラメータ ,  $\sigma$  は物体表面の粗さを表すパラメータである .

## 2.5 スペクトルと RGB

反射光の色は正確には光の波長によってスペクトルの形式で表される . スペクトルを計測するためには専用の計測機器が必要であり , データ量の観点からも各波長ごとの強さを保存するには膨大なデータ量を必要としてしまう . またデジタルスチールカメラのような計測機器だけでなく , ディスプレイなどの表示機器のほとんどは RGB によって色を表している .

物理量としてのスペクトルから , デジタルカメラによって RGB の値がどのように計測されるかについて説明する . 光源のスペクトルを  $E(\lambda)$  , 物体の拡散反射率を  $S(\lambda)$  とすると観

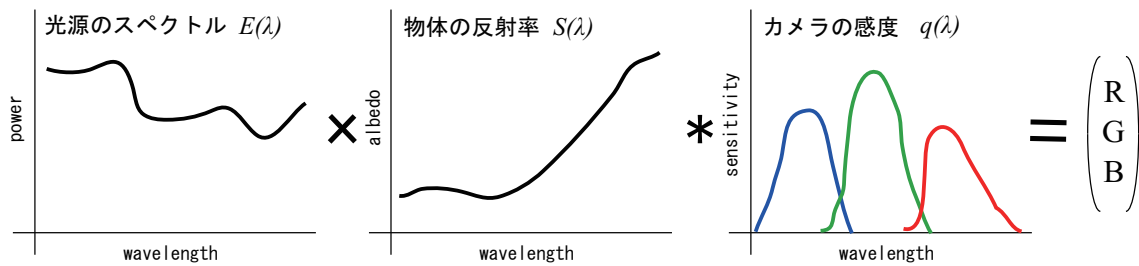


図 2.7: RGB の計測

測される反射光のスペクトル  $I(\lambda)$  は次式で表される .

$$I(\lambda) = E(\lambda)S(\lambda)$$

カメラの感度特性を  $q_C(\lambda)$  ( $C = R, G, B$ ) とすると , カメラで観測される輝度値  $I_C$  は

$$I_C = \int I(\lambda)q_C(\lambda)d\lambda$$

となる (図 2.7) . つまり同じ光を観測しても , カメラの感度特性によって得られる RGB の値は異なる .

このように光の特性や物体の反射特性を RGB だけで表現することは厳密には正確ではない . しかし計測の手軽さや実用的な観点からコンピュータビジョンやコンピュータグラフィックスにおける研究の多くは色情報として RGB の値を用いている . 本論文でもデジタルスチールカメラを用いて計測をおこない , 色情報として RGB の 3 パラメータの値を用いる .

## 第3章 高速反射成分分離



### 3.1 本手法の概要とその位置付け

本章では、2次元画像における反射光を二色性反射モデルに基づいて解析することで、鏡面反射成分と拡散反射成分の分離をおこなう。分離手法は1.2.2節で述べたように、偏光板を用いる手法、複数枚の画像を用いる手法、単一の画像を用いる手法など様々なものが提案されているが、高速に分離おこなう手法はあまりない。

そこで我々は、偏光板などの道具を使わず、単一の画像を用いる長所を生かして、拡散反射成分だけを残した画像を高速に生成する手法を提案する。具体的には、画像のRGB値をそれぞれの反射成分の特徴を抽出しやすい色空間に射影することで、最小二乗法による直線近似によって高速に反射成分の分離をおこなう。

本手法によって、例えば物体認識やステレオのマッチングにおいて、しばしばエラーの原因となる鏡面反射成分を瞬時に除去することができ、より高速なシステムの構築が期待される。また単一の画像のみを入力とするため、画像を扱う多くの場合において、様々なアプリケーションへの応用が考えられる。

章立ては以下の通りである。3.1節は本節であり、本研究の概要およびその位置付けについて述べた。3.2節では、本手法で用いる色空間について説明する。3.3節では、3.2節で説明する色空間を用いた高速な反射成分分離手法を提案する。3.4節では、実験および結果を示し、最後に考察をおこなう。

## 3.2 色空間

### 3.2.1 Hue, Saturation, Intensity

色を直感的に考える際には一般に図3.1に示すようなhue, saturation, intensityの3つの要素の組み合わせで考えることが多い。

Hueとは色相のことで、赤、青、緑、黄色というように、それぞれ区別される色味のことである。Saturationとは彩度のことで、あざやかさの度合いを示したものである。Intensityとは明度や輝度と呼ばれるもので、明るさの度合いを表したものである。

本章ではこれらhue, saturation, intensityの3つの要素を分かりやすく示した独自の色空間の座標系を考えることによって、高速に鏡面反射成分を除去を行う。

### 3.2.2 色空間

本論文では鏡面反射成分を除去する計算を高速に行うために、宮崎らによって提案された色空間を用いる [34]。

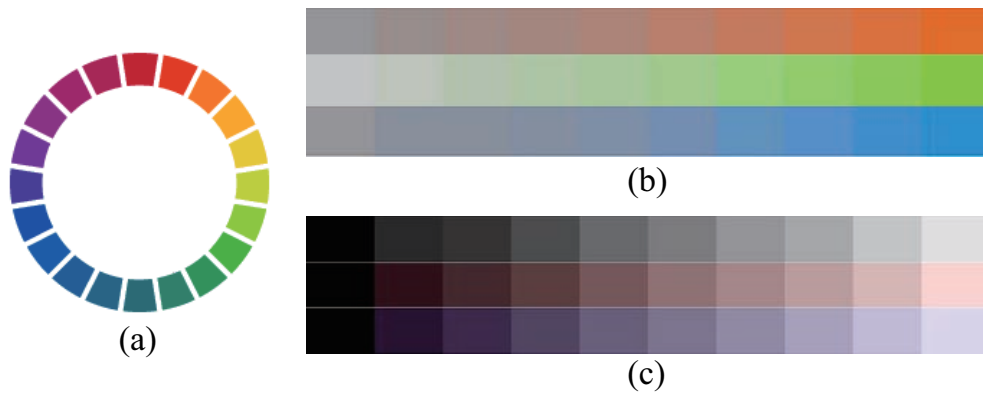


図 3.1: 色の要素

(a) : Hue , (b) : Saturation , (c) : Intensity

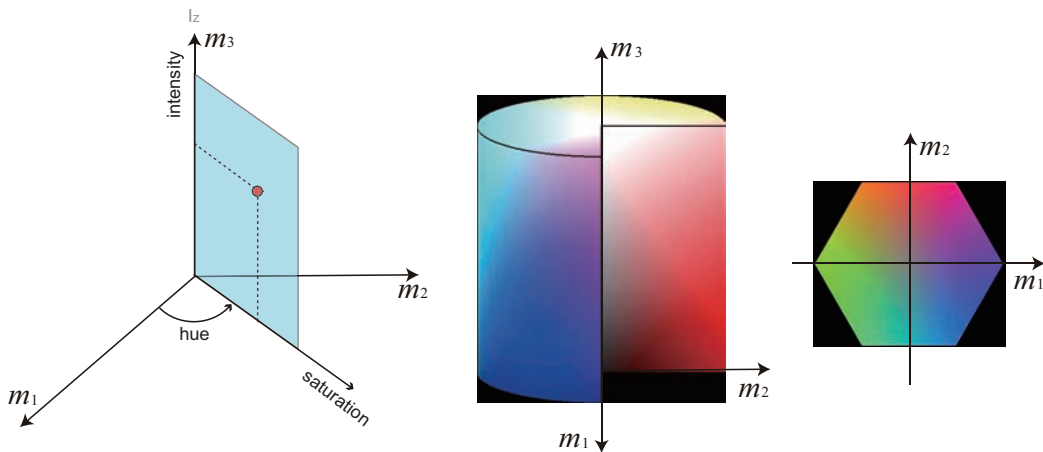


図 3.2: 色空間

この色空間では，図 3.2 に示すように，hue は  $(m_1, m_2)$  平面上で  $m_1$  軸とのなす角度で表され，saturation は  $(m_1, m_2)$  平面上での原点からの距離によって決められる．また intensity は  $m_3$  で表されている．

この色空間は Bajcsy の S 空間 [16] と同様に，hue，saturation，intensity を考えるのに最適である．S 空間ではスペクトルの基底関数の重みによって色空間に射影をしているが，この色空間では RGB 空間から直接変換ができるため，変換が容易である．また対称性に秀でているため，直感的にわかりやすく，かつ解析の際の計算もおこないやすい．HSI 色空間とも似ているが，この色空間における saturation は HSI 空間など一般的に述べられる saturation とは定義式が異なる．そのため 3.3.1 の原理で述べるように，直線近似によって鏡面反射成分を分離することができるという特長がある．

この色空間と RGB 色空間の関係は次のように表される .

$$\begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

さらに , この色空間での要素  $(m_1, m_2, m_3)$  を用いると , hue , saturation , intensity の値が次式のように求まる .

$$\text{hue} = \arctan \frac{m_2}{m_1} \quad (3.2)$$

$$\text{saturation} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \quad (3.3)$$

$$\text{intensity} = m_3 \quad (3.4)$$

### 3.2.3 ホワイトバランスの補正

前節で示した色空間を提案手法に適用する場合 , 光源が白色である必要がある . そこで本節では光源が白色以外の場合に , あらかじめ光源が白色になるように画像を修正する方法として , ホワイトバランスの補正について説明する .

まず測定したい色の光源の下でホワイトリファレンス (標準白色板) を撮影し RGB 値を計測する . その RGB の値を大きさ 1 に正規化した値を  $(l_r, l_g, l_b)$  とすると , 対象となる画像の各ピクセルの RGB の値  $(L_r, L_g, L_b)$  を次式のように  $(l_r, l_g, l_b)$  で割り算することによって , 光源を白色としたときの RGB の値  $(\hat{L}_r, \hat{L}_g, \hat{L}_b)$  を得ることができる .

$$\begin{pmatrix} \hat{L}_r \\ \hat{L}_g \\ \hat{L}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_r/l_r \\ L_g/l_g \\ L_b/l_b \end{pmatrix} = L \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

よって , 有色光源の場合には式 (3.5) によって求めた  $(\hat{L}_r, \hat{L}_g, \hat{L}_b)$  を用いることで , 光源が白色である場合として考えることができる .

## 3.3 提案手法 : 高速反射成分分離

この節では提案手法として , 前節で説明した色空間を用いて高速に反射成分を分離する手法の原理とその証明を行う . さらに本システムのアルゴリズムについて説明する .

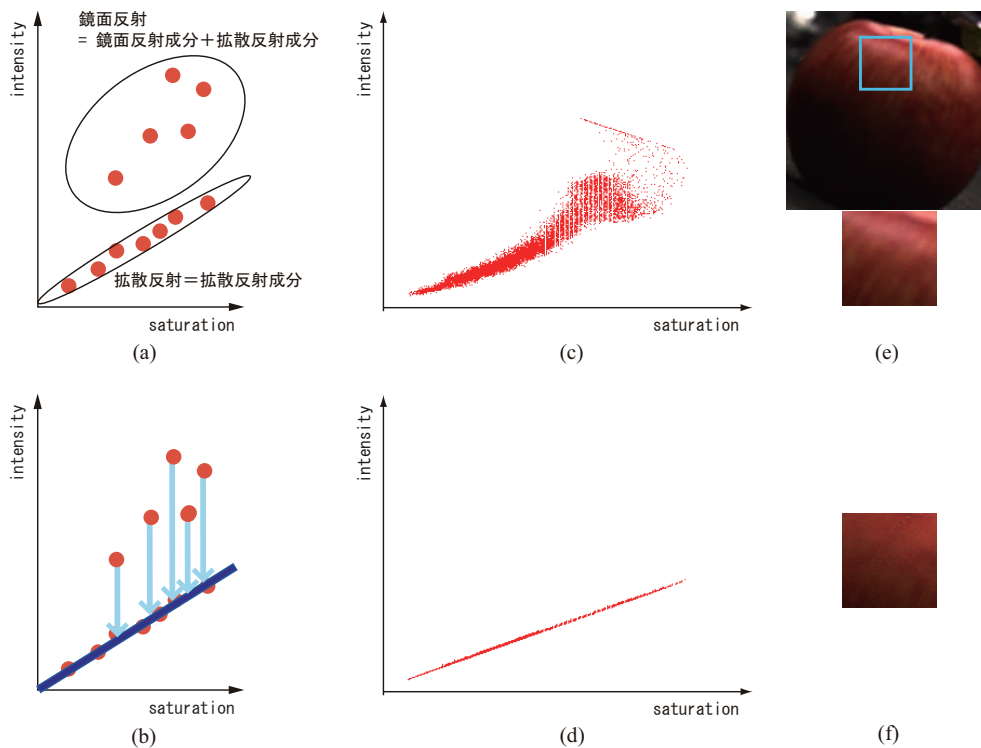


図 3.3: Saturation-intensity 図

(a) : Saturation-intensity のモデル図, (b) : 鏡面反射成分の除去, (c) : 実データの saturation-intensity 図, (d) 実データの鏡面反射成分除去後の saturation-intensity 図, (e) : (c) のデータ画像, (f) : 結果画像

### 3.3.1 提案手法の原理とその証明

本手法によって鏡面反射成分を分離するために, 次の3つを仮定する.

1. 光源が一様であること
2. 物体の鏡面反射成分は光源のスペクトルと同じであること (NIR 仮定)
3. 一つの hue には一つの surface color しかないこと

これらの仮定に基づいて鏡面反射成分を分離する原理の概要について説明し, その証明をおこなう.

まず対象となる画像の各ピクセルの RGB 値を色空間上に射影し, 図 3.2 のように hue の値ごとに平面を考える. 仮定 3 より, この平面ごとに異なる surface color として取り扱う. ただし hue の値は連続的に存在し無限に平面を考えることができってしまうため, 実際には hue をある角度範囲ごとに区切って, その中で平面を仮定する.

Hue が一定の平面において横軸を saturation, 縦軸を intensity として, プロットされた点に着目すると, 色空間の特性から図 3.3(a) のように, 拡散反射成分のピクセルの saturation

と intensity は比例の関係になる．そこでこの性質を利用して鏡面反射成分の除去をおこなう．ここで仮定 1, 2 より，光源が白色であれば，鏡面反射成分のベクトルは光源の色ベクトルと等しくかつ intensity の軸と平行になるため，鏡面反射と拡散反射の saturation は等しい．よって図 3.3(b) に示すような直線を考えることによって，saturation の値から拡散反射の intensity を求めることができる．これは鏡面反射成分を除去することと同意である．

ただし光源が白色以外の場合は 3.2.3 節で説明したホワイトバランスの補正をおこなうことで，光源を白色である場合の画像を作成してから処理をおこなう．

このような原理によって鏡面反射成分を除去するためには，以下の 4 つを証明する必要がある．

- (I) Surface color が同じ物体において，拡散反射と鏡面反射を表すピクセルの hue はそれぞれ shading(陰影)によらず一意に定まり，両者は等しい．
- (II) 鏡面反射の saturation は鏡面反射成分の大きさによらず一定である．
- (III) 同じ surface color でかつ，同じ shading である鏡面反射と拡散反射のピクセルにおいて，鏡面反射の intensity は拡散反射の intensity よりも大きい．
- (IV) 拡散反射のピクセルは，hue が一定で saturation を横軸・intensity を縦軸とした平面で比例直線上に分布する

ただし一つの hue には一つの surface color しかないという仮定から，(II)(IV) の証明については一つの hue において証明をおこなえば十分である．

証明をおこなうための準備として，二色性反射モデルを，RGB の輝度値ごとに数式で表すことを考える．NIR 仮定から，鏡面反射成分は光源の色と同じであり，また，光源はホワイトバランス補正によって白色に正規化されているので，正規化された鏡面反射成分  $I_S$  は

$$I_S = s \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

と表せる．ここで縦ベクトルのそれぞれの成分は RGB の値を表しており， $s$  は鏡面反射成分の反射率を表すスカラーである．また正規化された拡散反射成分  $I_D$  は，Lambertian モデルを仮定すると

$$I_D = \begin{pmatrix} \alpha_r \\ \alpha_g \\ \alpha_b \end{pmatrix} \cos \theta$$

となる．ここで  $\cos \theta$  は Lambertian モデルにおいて shading(陰影)を表す値である． $(\alpha_r, \alpha_g, \alpha_b)^T$  は拡散反射成分の RGB それぞれの反射率を表しており，この値によって surface color が決定される．よって反射光の RGB の輝度は二色性反射モデルを用いて以下のように表すことができる．

$$\begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha_r \\ \alpha_g \\ \alpha_b \end{pmatrix} \cos \theta \quad (3.6)$$

式(3.6)は， $s = 0$  のとき拡散反射のモデルであり， $s > 0$  のとき鏡面反射成分を含めたモデルとなる．

### (I) の証明

ある surface color として  $(\alpha_r, \alpha_g, \alpha_b)^T$  の拡散反射率をもつ物体に関して，拡散反射の hue を考えると，式(3.6)で  $s = 0$  と式(3.1)から

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \left( \alpha_r - \frac{1}{2}\alpha_g - \frac{1}{2}\alpha_b \right) \cos \theta \\ m_2 &= \left( \frac{\sqrt{3}}{2}\alpha_g - \frac{\sqrt{3}}{2}\alpha_b \right) \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

である．よって式(3.2)から

$$\text{hue} = \arctan \frac{m_2}{m_1} = \arctan \left( \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}\alpha_g - \frac{\sqrt{3}}{2}\alpha_b}{\alpha_r - \frac{1}{2}\alpha_g - \frac{1}{2}\alpha_b} \right) \quad (3.8)$$

ゆえに，shading によらず  $(\alpha_r, \alpha_g, \alpha_b)$  により一意に値が決まる．

一方，同じ surface color を持つ物体の鏡面反射について hue を考えると，式(3.1)(3.6)から， $s$  の成分は打ち消されて同様に式(3.7)が導かれるので，hue の値も式(3.8)と同じになり，shading によらず  $(\alpha_r, \alpha_g, \alpha_b)$  により一意に値が決まる．以上より，surface color が同じ物体において，拡散反射と鏡面反射の hue は shading によらず一意に求まり，かつ両者は等しいことが示された．

### (II) の証明

鏡面反射の saturation を考える．式(3.1)(3.3)(3.6)から

$$\begin{aligned} \text{saturation} &= \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \\ &= \frac{\cos \theta}{\sqrt{2}} \sqrt{(\alpha_r - \alpha_g)^2 + (\alpha_g - \alpha_b)^2 + (\alpha_b - \alpha_r)^2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

よって saturation は鏡面反射成分の大きさを表す  $s$  によらずに値が決まることが示された．また拡散反射 ( $s = 0$ ) と鏡面反射の saturation は同じ値を取ることがわかる．

### (III) の証明

鏡面反射の intensity について考えると，式 (3.4) から

$$\text{intensity} = m_3 = \frac{\alpha_r + \alpha_g + \alpha_b}{3} \cos \theta + s$$

また，この鏡面反射のピクセルと同じ surface color で，同じ shading をもつ拡散反射の intensity は

$$\text{intensity} = m_3 = \frac{\alpha_r + \alpha_g + \alpha_b}{3} \cos \theta \quad (3.10)$$

ゆえに鏡面反射の intensity は，この鏡面反射と同じ surface color でかつ，同じ shading をもつ拡散反射の intensity よりも  $s$  だけ大きいことが示された．

### (IV) の証明

Hue が一定の値として，拡散反射について saturation と intensity を考える．式 (3.9)(3.10) から拡散反射の saturation と intensity は以下のように比例の関係にあることがわかる．

$$\text{intensity} = A \times \text{saturation} \quad (3.11)$$

ただし

$$A = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{\alpha_r + \alpha_g + \alpha_b}{\sqrt{(\alpha_r - \alpha_g)^2 + (\alpha_g - \alpha_b)^2 + (\alpha_b - \alpha_r)^2}} \quad (3.12)$$

よって hue がある一定の値のとき，saturation と intensity は比例の関係にあり，比例直線の傾き  $A$  は  $(\alpha_r, \alpha_g, \alpha_b)$  により一意に値が決まることが示された．

以上 (I)(II)(III)(IV) より，RGB の情報だけを用いて鏡面反射成分を除去できることが示された．さらに式 (3.9)(3.10) における  $\cos \theta$  より，鏡面反射成分の除去の過程において陰影情報は保存されることがわかる．

ただし，この手法では白，灰色，黒といったグレースケールのピクセルを扱うことはできない．なぜなら，グレースケールでは  $r \approx g \approx b$  であるから，式 (3.3) より saturation  $\approx 0$  となってしまう，グレースケールのピクセルは，例外的に図 3.3(a) に示すような直線上にのらないからである．

また当然のことながらカメラの感度を超えてしまったピクセルは処理できない．例えばビットマップの場合，カメラの感度を超えた明るいピクセルは全て 8 ビットで表される最大値 255 として処理することになるので，当然 hue や saturation の値が本来の値とは異なり，結果も誤ったものとなる．よって撮影する際にはカメラの感度を超えないように露光時間を短くしたり，絞りを小さくするなどの注意が必要である．

### 3.3.2 アルゴリズム

鏡面反射成分を分離するシステムのアルゴリズムについて説明する。

**Step1:** 画像の各ピクセルを RGB から色空間に射影することで，hue，saturation，intensity を計算する。

**Step2:** Hue の値によりピクセルを分類し，hue が一定であるそれぞれの saturation-intensity 平面で，拡散反射のピクセルを選んでプロットし，直線の傾き  $A$  を計算する。

**Step3:** 全てのピクセルで傾き  $A$  を用いて intensity を計算する。

**Step4:** 元の RGB 空間へと射影しなおす。

具体的には，(Step1) まず画像の各ピクセルを RGB の値によって色空間に射影する。そして式 (3.2)(3.3)(3.4) に従って hue，saturation，intensity を計算する。(Step2) 次に hue の値により分類して，saturation を横軸，intensity を縦軸とした平面を考える。図 3.3(b) のように，saturation の値ごとに最小の intensity をプロットする。最小の値をとることによって，拡散反射のピクセルのみを選び出し，これらのプロットは (IV) の証明より，原点を通る直線上にのる。よって最小二乗法を用いて直線を当てはめ，傾き  $A$  を各 hue ごとに求めてやればよい。鏡面反射は拡散反射と saturation が同じで intensity のみが違うので，(Step3) 式 (3.11) で求めた傾き  $A$  を用いて，全てのピクセルで saturation から出力画像の intensity を求めれば，それらは全て拡散反射の intensity となる。(Step4) そして色空間を RGB へと変換すれば，鏡面反射成分が分離された画像が得られる。

直線の最小二乗法は線形であるため  $O(N)$  で計算ができ，本手法ではリアルタイムに結果の画像を表示することが可能である。

#### 高速化

本手法は全てのピクセルに関して処理をおこなうため，画像のサイズに比例して計算時間がかかる。そのため画像内で鏡面反射成分を除去する対象とするピクセルをユーザーが限定することが可能であれば，さらに高速化できる。

また Step1 ~ 4 のうち，Step2 の直線の傾きを求める過程では，傾き  $A$  を求めることが目的であるため，次のようにしてさらに高速化できる。傾き  $A$  を求める際に用いるサンプル点は全てのピクセルとする必要はないため，例えば，直線近似のサンプルデータとしてプロットに用いるピクセルを，画像中で一ピクセル飛ばしにサンプリングすることで，直線近似の処理に用いるデータ量を半分に減らすことができる。最も単純な場合，拡散反射のピクセルが 1 つあれば比例直線の傾きを求めることができる。





図 3.4: 白色光源下での鏡面反射成分除去

直線近似のサンプルデータとして用いるデータ量は、少ないほど高速に処理が可能であるが、一方で精度は下がってしまう恐れがあり、速度と精度はトレードオフの関係があると言える。

### 3.4 実験

カメラは SONY の XCD-X710CR(解像度  $512 \times 384$ ,  $\gamma$  値は 1), PC の CPU は Intel Core 2 Duo(2GHz) を用いて室内で実験をおこなった。まず画像をキャプチャして Step1 ~ 4 をおこない、結果画像を出力表示したら、その時点でのフレーム画像をキャプチャして Step1 へ戻り、同様の処理を繰り返しおこなったところ、およそ 8.8[fps] で鏡面反射成分を分離した画像を表示することができた。

実験結果の画像を図 3.4 に示す。左の図はカメラで撮影した画像、右の図は提案手法により鏡面反射成分を除去した画像である。鏡面反射成分がうまく除去されている。また陰影情報は残っていることがわかる。

ただし、グレースケールのピクセルは提案手法では処理できないので、何も手を加えずそのまま入力と同じ色を表示するようにした。

また反射光がカメラの感度を超えないように撮影をおこなったため、得られた結果画像そのままでは全体的に暗くなっていた。そこで結果の図 3.4 は Photoshop を用いて明るさのレベル補正を行っている。

次にカラーフィルタを用いて光源の色を白色以外に変えて実験を行った。ホワイトリフレンスにおける RGB の平均値からホワイトバランスを補正した。その結果を図 3.5, 3.6, 3.7 に示す。ただし、これらの結果の図も見やすいように明るさのレベル補正を行っている。

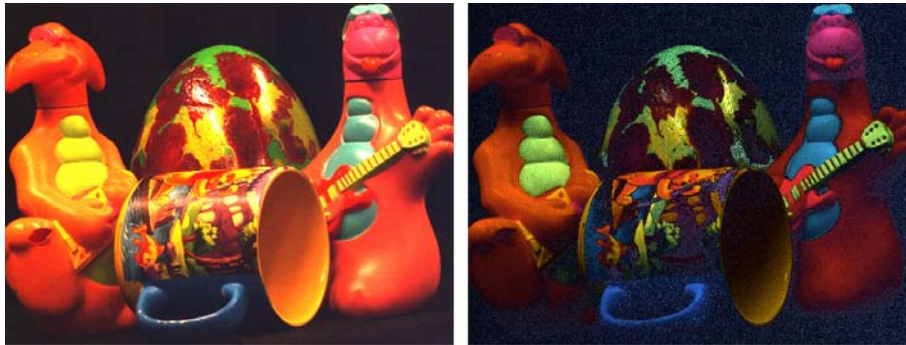


図 3.5: 赤色光源下での鏡面反射成分除去

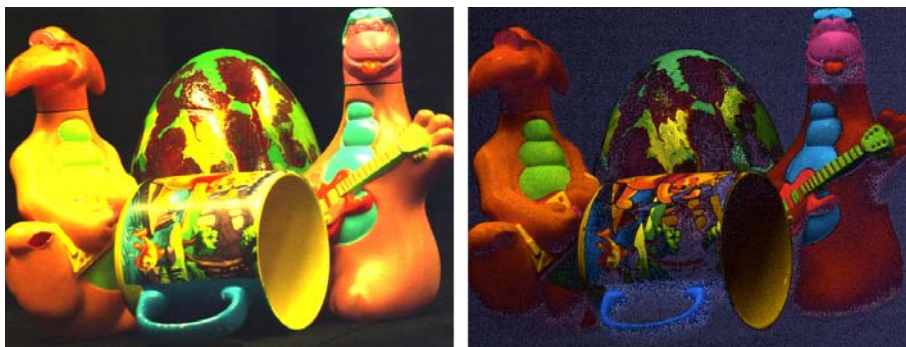


図 3.6: 緑色光源下での鏡面反射成分除去

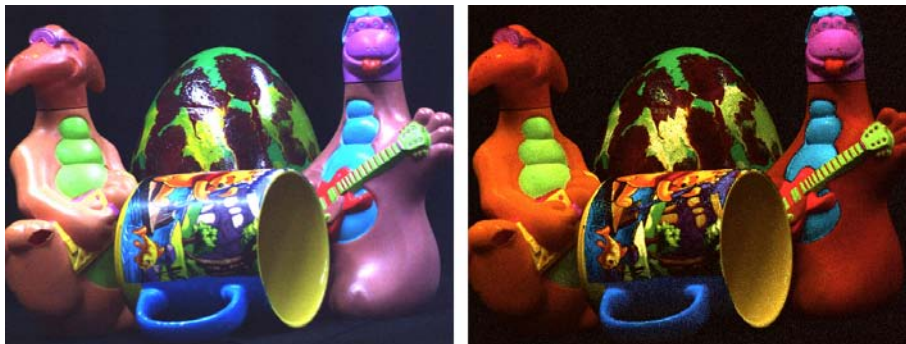


図 3.7: 青色光源下での鏡面反射成分除去

### 3.5 考察

我々の手法では、RGB から色空間への射影、および直線近似をおこなうことで、高速に鏡面反射成分を分離することができる。

しかしながら、物体によっては3.3.1節の原理で述べた3つの仮定のうち、「一つのhueには一つのsurface colorしかない」という仮定が成り立たない例がいくつか見つかっており、その場合は鏡面反射成分の分離には問題ないが、元の画像と比べて、結果画像の色が異なる

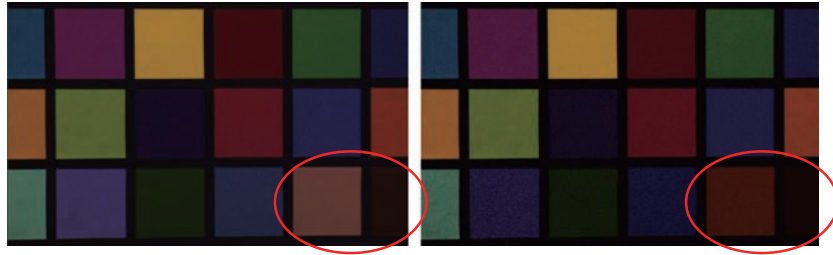


図 3.8: 一つの hue に二つの surface color がある例

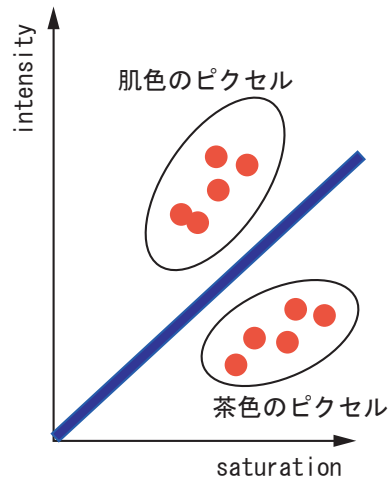


図 3.9: 一つの hue に二つの surface color がある場合の傾き  $A$  の推定

という問題が起こってしまう。

例えば図 3.8 はマクベスチャートの有色部分に対して本手法で処理した結果(右)と元の画像(左)であるが、それぞれの画像の右下の肌色と茶色の部分に注目してみると、これらは surface color が異なるのに同じ hue の値を持ってしまうため、図 3.9 に示すように、直線の傾き  $A$  がうまく求められず、結果画像が元の画像とは色が異なっている。

また本手法では仮定でも述べたように、光源が一様である必要があるので、相互反射の影響が大きい場合や、光源に揺らぎがある場合は、うまく鏡面反射成分を分離できない。

## 第4章 疎な形状データと密な法線マップを用いた反射パラメータ推定

## 4.1 本手法の概要とその位置付け

本手法は反射モデルにおける反射パラメータを正確に推定し、3次元モデルを生成することを目的とする。本手法によって反射特性を推定するためには、物体の幾何形状を必要とするが、1.2.1節で述べたように、形状の取得方法は手法によって長所短所が存在する。

そこで、我々は幾何データをより正確に取得するために、レーザレンジセンサで得られる距離データと Photometric stereo で得られる法線とを組み合わせる幾何データとする。さらに、正確な形状および法線を取得した上で反射パラメータの推定をおこなう。

正確な幾何形状を用いた反射特性の推定手法の関連研究を1.2.3節で紹介したが、これらの手法は、多視点からカメラで撮影をおこない、光源やカメラパラメータおよび初期形状を既知、または計測によって容易に推定できる点で我々の提案手法と共通である。

しかしこれらの手法は拡散反射成分と鏡面反射成分をまとめて扱い、同時に推定をおこなっているため、鏡面反射成分が観測される点においては誤差が多く含まれる可能性が高いといった問題がある。

そこで我々は拡散反射成分と鏡面反射成分を分けて考えることで、反射パラメータおよび法線の推定の精度向上をはかる。また、物体表面のそれぞれの点について入射光に関して逆二乗則および光源方向を考慮することによって、さらに推定精度を高める。形状については、レーザレンジセンサで取得するポリゴンメッシュモデルに対して法線マップを適用する。法線マップによって細部の形状を表現できるため、ポリゴンメッシュモデルの面の数が少なく疎な形状であっても、正確な見えを生成することが可能である。そのためポリゴンメッシュモデルのデータ量を大幅に削減することができる。

本手法では以下のことを仮定する。

- 物体の反射は Lambertian モデル、Torrance-Sparrow モデルにより表される
- 光源は単一の点光源で、その位置および色は既知である
- 鏡面反射成分と光源の色は同じである (NIR 仮定)
- 相互反射は無視できるほど小さい
- カメラの内部、外部パラメータは既知である

ただしカメラの内部パラメータとは、画像撮影時におけるカメラの焦点距離や画像サイズなどを表したもので、外部パラメータとは、カメラの位置、姿勢を表したものである (付録A.1 参照)。

章立ては以下の通りである。4.1節はこの節であり、本手法の概要とその位置付け、本手法における仮定について述べた。4.2節では、本手法において法線の推定方法の基礎となる

Photometric stereo について説明する．4.3 節では提案手法として，距離データを利用した多視点の Photometric stereo について述べ，本手法における法線マップの定義，反射パラメータの推定方法について説明する．4.3.3 節では，実験として対象物体の反射パラメータが均一であるという仮定をおいて，法線および反射パラメータの推定をおこなう．そして最後の節で実験結果をもとに本手法について考察をおこなう．

## 4.2 Photometric stereo

本稿ではレーザレンジセンサで取得した形状データを用いることによって，Photometric stereo を多視点の Photometric stereo へと拡張する．そこで，本節ではその基礎となる Photometric stereo について説明をおこなう．

Photometric stereo は異なる光源環境下で撮影された複数枚の画像の輝度情報から，物体の法線を推定する手法である [35]．一般的な Photometric stereo では，物体は Lambertian 物体であると仮定して，固定視点の下で無限遠点光源を移動させながら撮影した画像を入力とする．Photometric stereo における基本式は次のように表される．

$$\mathbf{I} = \mathbf{S}\mathbf{L} \quad (4.1)$$

ここで  $\mathbf{I}$  は次式のように  $p$  ピクセルの入力画像を  $f$  枚並べた  $p \times f$  行列である．

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} i_{11} & \cdots & i_{1f} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ i_{p1} & \cdots & i_{pf} \end{pmatrix}$$

$\mathbf{S}$  は各ピクセルにおける法線ベクトル  $\mathbf{n} = (n_{jx}, n_{jy}, n_{jz})$  ( $j = 1, \dots, p$ ) に，反射率  $r_j$  をかけた  $(s_{jx}, s_{jy}, s_{jz}) = (r_j n_{jx}, r_j n_{jy}, r_j n_{jz})$  を成分とする  $p \times 3$  行列である．ただし  $|\mathbf{n}| = 1$  とする．

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} s_{1x} & s_{1y} & s_{1z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{px} & s_{py} & s_{pz} \end{pmatrix}$$

$\mathbf{L}$  は，点光源が無遠にあり，対象物体表面上の全ての点において同じ方向  $(m_{xk}, m_{yk}, m_{zk})$  ( $k = 1, \dots, f$ ) からの光源が当たっているとして，大きさ 1 の方向ベクトルに光源の明るさ  $E_k$  をかけた  $(l_{xk}, l_{yk}, l_{zk}) = (E_k m_{xk}, E_k m_{yk}, E_k m_{zk})$  を成分とする  $3 \times f$  行列である．

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} l_{x1} & \cdots & l_{xf} \\ l_{y1} & \cdots & l_{yf} \\ l_{z1} & \cdots & l_{zf} \end{pmatrix}$$

Photometric stereo は行列  $I$  が与えられたとき，行列  $S$  を求める問題と見なすことができる．ここで光源環境  $L$  が既知であれば， $L^{-1}$  を求めることによって容易に  $S$  を求めることができる． $S$  のそれぞれの行におけるベクトル  $(s_{jx}, s_{jy}, s_{jz})$  は大きさが反射率  $r_j$ ，向きが法線  $(n_{jx}, n_{jy}, n_{jz})$  を表しているため，反射率と法線が同時に求められる．

また光源の位置が未知であっても，特異値分解と境界などの拘束条件を用いることによって  $S$  と  $L$  を求める手法も提案されている [36]．

### 4.3 提案手法：幾何形状を用いた多視点 Photometric stereo

本稿では形状データとしてレンジセンサで取得したポリゴンメッシュモデルを用いて，Photometric stereo を多視点に拡張することによって，光源の向きや逆二乗則を考慮して正確に法線および反射パラメータを求める手法を提案する．ただし，この節では入力画像列として拡散反射成分のみの画像が与えられた理想的な場合の推定方法について述べる．実際には鏡面反射成分や計測誤差，ノイズなどの影響を考慮する必要があり，その方法については 4.3.3 節で説明をおこなう．

#### 4.3.1 多視点 Photometric stereo

我々の提案する多視点の Photometric stereo はレーザレンジセンサで取得したポリゴンメッシュモデルを利用することで，物体表面上の点の位置がほぼ正確に得られるため，その点から点光源へのベクトルを求めることで，近接点光源にも対応することができる．その結果，物体表面上のそれぞれの点における光源方向は，点ごとに異なる方向としてより正確に定義され，またその距離を用いることで逆二乗則による減衰も考慮して，正確に法線および反射パラメータの推定をおこなう．

4.2 節で説明した一般的な Photometric stereo は固定視点で入力画像を撮影することによって，物体表面上の位置を入力画像のピクセル位置に対応させ，各ピクセルごとに法線および反射率を推定する．一方，多視点 Photometric stereo ではカメラパラメータを既知とすることで物体表面上の位置と入力画像との対応付けをおこなう．具体的には，物体表面上のある点がレーザレンジセンサの座標系で表されているとき，外部パラメータを用いて，カメラの座標系における位置を得る．さらに内部パラメータを用いて対応する入力画像のピクセル位置を求める．

こうして物体表面上の点  $A$  と入力画像のピクセル  $i$  とを結びつけることができる．点  $A$  における推定すべき法線を  $n$ ，点  $A$  から点光源へのベクトルを  $m$  とすると，入力画像ピクセル

ルの明るさ  $i$  は次のように表される .

$$i = \frac{E}{d^2} K_D \mathbf{n} \cdot \mathbf{m} \quad (4.2)$$

ただし  $d$  は点 A と点光源との距離とし , この点に照射される光源の輝度は逆二乗則に従い  $\frac{E}{d^2}$  とする . また , この点における拡散反射の反射率を表す拡散反射パラメータを  $K_D$  とした .

式 (4.2) において , 求めるべき未知数は  $K_D$  ,  $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$  の 4 つである . 点 A が写っている異なる 3 枚の入力画像において式 (4.2) が成り立ち , また法線ベクトルが単位ベクトルであることから , 以下のような拘束式が成り立つ .

$$i_k = \frac{E_k}{d_k^2} K_D \mathbf{n} \cdot \mathbf{m}_k \quad (k = 1, 2, 3) \quad (4.3)$$

$$|\mathbf{n}| = 1$$

ここで式 (4.3) は

$$\mathbf{s} = (K_D n_x, K_D n_y, K_D n_z)$$

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} \frac{E_1}{d_1^2} m_{x1} & \frac{E_2}{d_2^2} m_{x2} & \frac{E_3}{d_3^2} m_{x3} \\ \frac{E_1}{d_1^2} m_{y1} & \frac{E_2}{d_2^2} m_{y2} & \frac{E_3}{d_3^2} m_{y3} \\ \frac{E_1}{d_1^2} m_{z1} & \frac{E_2}{d_2^2} m_{z2} & \frac{E_3}{d_3^2} m_{z3} \end{pmatrix}$$

とまとめることによって ,

$$\mathbf{i} = \mathbf{sL}$$

と式変形される . この式は式 (4.1) と同様の形をしており ,  $\mathbf{i} = (i_1, i_2, i_3)$  と  $\mathbf{L}$  は既知であるから ,  $\mathbf{L}^{-1}$  を両辺の右からかけることによって容易に  $\mathbf{s}$  を求めることができる . さらに法線ベクトルは単位ベクトルであるから  $K_D = |\mathbf{s}|$  ,  $\mathbf{n} = \frac{\mathbf{s}}{|\mathbf{s}|}$  によって , 拡散反射パラメータと法線ベクトルが求まる .

このように我々の提案する多視点 Photometric stereo では , レンジセンサで得られたポリゴンメッシュモデルを利用することで , 物体表面のそれぞれの点ごとに光源ベクトルの方向と距離を考慮した , より正確な法線および拡散反射パラメータの推定をおこなうことができる .

### 4.3.2 法線マップ

本手法では法線情報を 3 次元形状の微分によって求めるのではなく , 法線は法線として単独で値を保持するために法線マップを用いる .



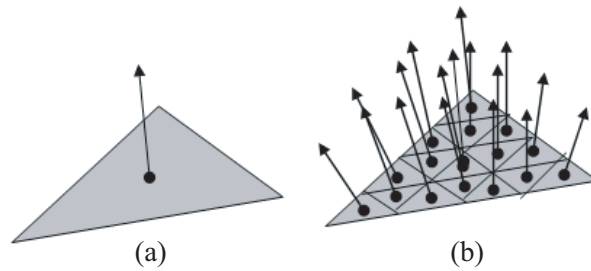


図 4.1: 法線マップ

(a) : ある三角パッチとその法線, (b) : 法線マップ適用

ここでは法線マップを次のように定義する．ポリゴンメッシュモデルにおける各三角パッチを図 4.1 のように微小領域に分割し，その領域ごとに法線の値を保持させたものを法線マップとする．よって法線マップはテクスチャと同じような扱いができる．

物体表面における反射を考える場合，反射光の明るさは法線に依存するため，法線マップを用いることで，形状を変化させずとも，物体の見えを大きく変化させることができる．そのためポリゴンメッシュモデルの三角パッチを細かい微小領域に分割し，それぞれの微小領域に法線を割り当てることによって，より細かな部分の凹凸まで表現することが可能である．

本手法では，法線マップの微小領域における各法線を 4.3.1 節で説明した多視点 Photometric stereo により推定をおこなう．密に法線マップを推定することで細かな形状まで表現できるため，ポリゴンメッシュモデルは低い解像度で十分である．したがって，高性能なレンジセンサを用いなくても細部まで形状を表現でき，データ量をかなり削減することができる．

### 4.3.3 法線と反射パラメータの推定

4.3.1 節では多視点 Photometric stereo によって，物体の反射光として拡散反射成分のみが観測される場合に，法線および拡散反射パラメータを推定できることを示した．しかし，実際には物体の反射光として鏡面反射成分も観測されるため，その影響を考慮した推定をおこなう必要がある．

本節では対象とする物体の反射パラメータが均一であると仮定して，法線および反射パラメータを推定する方法について説明する．物体は二色性反射モデルに基づき，拡散反射成分は Lambertian モデル，鏡面反射成分は Torrance-Sparrow モデルにしたがうとして，その反射パラメータ  $K_{D,C}$ ,  $K_{S,C}$ ,  $\sigma$  ( $C = R, G, B$ ) を求める．

## 拡散反射パラメータの推定

ここでは画像列の輝度情報を用いて多視点 Photometric stereo に基づいた正確な法線による拡散反射パラメータ  $K_{D,C}$  を求める手法について説明する．ただし，物体表面のどの位置においても反射パラメータは均一であることを仮定しているため，全体でただ一つの拡散反射パラメータを求めれば良い．そこで，法線マップを定義した微小領域ごとに拡散反射パラメータを求め，その中から鏡面反射成分が含まれない尤もらしい拡散反射パラメータを推定する．

ある微小領域  $A$  に関して，鏡面反射成分の含まれない拡散反射だけの部分を考えると，反射光  $I_{C,A}$  は次式で表される．

$$I_{C,A} = K_{D,C} n_A \cdot l_{C,A} \quad (4.4)$$

光源ベクトル  $l_{C,A}$  は既知であるから，微小領域  $A$  において反射光  $I_{C,A}$  が拡散反射成分のみで観測された画像が 3 枚得られると，多視点 Photometric stereo により  $K_{D,C}$  と  $n_A$  の解の組を 1 つ求めることができる．ここで求められた  $K_{D,C}$  は多視点 Photometric stereo に基づいた正確な法線に対応する反射パラメータである．

しかし，微小領域  $A$  を写した画像列について，反射光が拡散反射成分のみであるかどうかを見分けることは一般的には難しい．そこで本節では，STEP1：あらかじめ鏡面反射成分が観測されやすいピクセルを入力から除外し，STEP2：3つの入力画像ピクセルの色ベクトルに条件を与え，さらにSTEP3：推定された  $K_{D,C}$  の大きさをチェックすることによって鏡面反射成分を含む推定値を取り除く．

### STEP1

まず入力画像から鏡面反射成分が観測されやすい入力を取り除く．鏡面反射成分が観測されるのは光源の入射角に対する鏡面反射角周辺の角度方向だけであるから，Torrance-Sparrow モデルの  $\alpha$  の値が閾値を超える入力は鏡面反射成分であると見なし，入力ピクセルから除外する．

### STEP2

3つの入力画像ピクセルの色ベクトル  $I_1 = (I_{1R}, I_{1G}, I_{1B})$ ， $I_2$ ， $I_3$  が拡散反射成分のみであるための必要条件は次のように表される．

$$\frac{I_1 \cdot I_2}{|I_1||I_2|} = 1, \quad \frac{I_1 \cdot I_3}{|I_1||I_3|} = 1 \quad (4.5)$$

よって多視点 Photometric stereo の入力として，式 (4.5) を満たす組み合わせを用いて拡散反射パラメータおよび法線の推定をおこなう．しかし，微小領域  $A$  の反射光である 3つの入力画像ピクセルが式 (4.5) の必要条件を満たし，かつ鏡面反射成分が含まれる場合として以下の 2通りが考えられる．

(ア) あるピクセルの鏡面反射成分の RGB 比が拡散反射成分の RGB 比と等しい

(イ) 3つのピクセルの拡散反射成分の値が等しく，かつ3つの鏡面反射成分の値が等しい

さらに式(4.5)は実際には量子化誤差などが原因で，たとえシミュレーション実験であっても完全に値を1とすることは難しいため，0.999以上の値であることを条件としている．よって，鏡面反射成分が微量だけ含まれる場合もこの必要条件を満たしうる．

### STEP3

さらに鏡面反射成分の影響を少なくするために，複数の微小領域と様々な入力画像から得られる3つの入力ピクセルの組み合わせで  $K_{D,C}$  を推定し，その分布を調べる．一般に鏡面反射成分が観測される領域は，鏡面反射成分の広がりおよび表面の粗さを表す  $\sigma$  の値にもよるが，拡散反射成分のみが観測される領域に比べてかなり少ないと考えられる．さらに STEP1,2 を満たす場合を考えると，鏡面反射成分を含む入力による推定結果は非常に少ない．また入力の中に鏡面反射成分が含まれる場合，推定される  $K_{D,C}$  の値は真値とは異なる値になる．そのため多視点 Photometric stereo を用いて  $K_{D,C}$  の推定値を数多く求め，その分布の最頻値を推定値とする．

このようにして鏡面反射成分の観測されにくい領域を選び出し，統計的に尤もらしい拡散反射パラメータを推定する．

## 法線の推定

物体表面上の全ての微小領域において等しい  $K_{D,C}$  を求めることができたので，推定値の  $K_{D,C}$  に対応する法線を多視点の Photometric stereo により求めればよい．

4.3.1 節で示したように，多視点の Photometric stereo では，3つの入力から法線と拡散反射パラメータ  $K_{D,C}$  の推定値の組が1つ求まる．よって微小領域 A が写された画像列  $n$  枚において，多視点 Photometric stereo を用いると，法線と  $K_{D,C}$  の組み合わせとして  ${}_nC_3$  通りの推定値が得られる．この  ${}_nC_3$  通りの解  $K_{D,C}$  の中から，推定された  $K_{D,C}$  に最も近い値になるときの対応する法線を，法線の推定値とする．

## 鏡面反射パラメータの推定

鏡面反射パラメータを推定するために，まず鏡面反射成分の明るさ  $I_{S,C}$  を  $I_{S,C} = I_C - I_{D,C}$  によって求める．ただし  $I_{D,C}$  は拡散反射成分の明るさであり，すでに推定した法線と拡散反射パラメータ  $K_{D,C}$  を用いて，微小領域ごとに式(4.4)により求める．これを Torrance-Sparrow

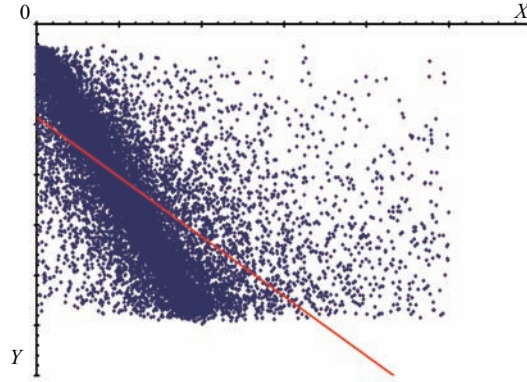


図 4.2:  $(X, Y)$  のプロットと最小二乗法による直線近似

モデルに当てはめると次式を得る .

$$I_{S,C} = \frac{E_C}{d^2} \frac{K_{S,C}}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.6)$$

鏡面反射パラメータ  $K_{S,C}$  および  $\sigma$  を求めるために , 以下の条件を満たした場合に , 鏡面反射成分が観測されているとみなして推定に用いる .

1.  $I_{S,C}$  が  $C = R, G, B$  全てにおいて閾値  $T_{S,C}$  よりも大きい
2. 色ベクトル  $I_S$  と  $E$  のなす角が閾値  $\theta_T$  よりも小さい
3.  $\alpha$  が閾値  $\alpha_T$  よりも大きい

ただし色ベクトル  $\mathbf{A} = (A_R, A_G, A_B)$  と  $\mathbf{B} = (B_R, B_G, B_B)$  のなす角  $\theta$  は次のように定義する .

$$\theta = \arccos\left(\frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{A}| |\mathbf{B}|}\right)$$

ここで式 (4.6) の対数を取り ,  $X = \frac{\alpha^2}{2}$  ,  $Y = \ln\left(\frac{I_{S,C} d^2 \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{E_C}\right)$  とおくと , 鏡面反射成分は以下のように  $XY$  平面上における直線の式で表される .

$$Y = -\frac{1}{\sigma^2} X + \ln K_{S,C} \quad (4.7)$$

$(X, Y)$  の値は入力および既に求めた法線と拡散反射パラメータから , 法線マップを定義した微小領域ごとに求めることができる . ここでは物体表面上で反射パラメータは均一であるから ,  $(X, Y)$  のデータ点を十分な数  $XY$  平面上にプロットし直線近似をおこなえば , 式 (4.7) の直線が得られる . そしてこの直線の  $Y$  切片と傾きの値から  $K_{S,C}$  と  $\sigma$  の値を求める .

しかし  $(X, Y)$  のデータをプロットした結果は , 様々な誤差の影響により図 4.2 のように多くの外れ値が含まれるため , 単純な最小二乗法などでは直線近似をおこなうことが難しい .

そこで以下のようなアルゴリズムによって直線近似に用いるデータを選び出し , 外れ値が多く含まれる場合であってもロバストに直線近似をおこなう .

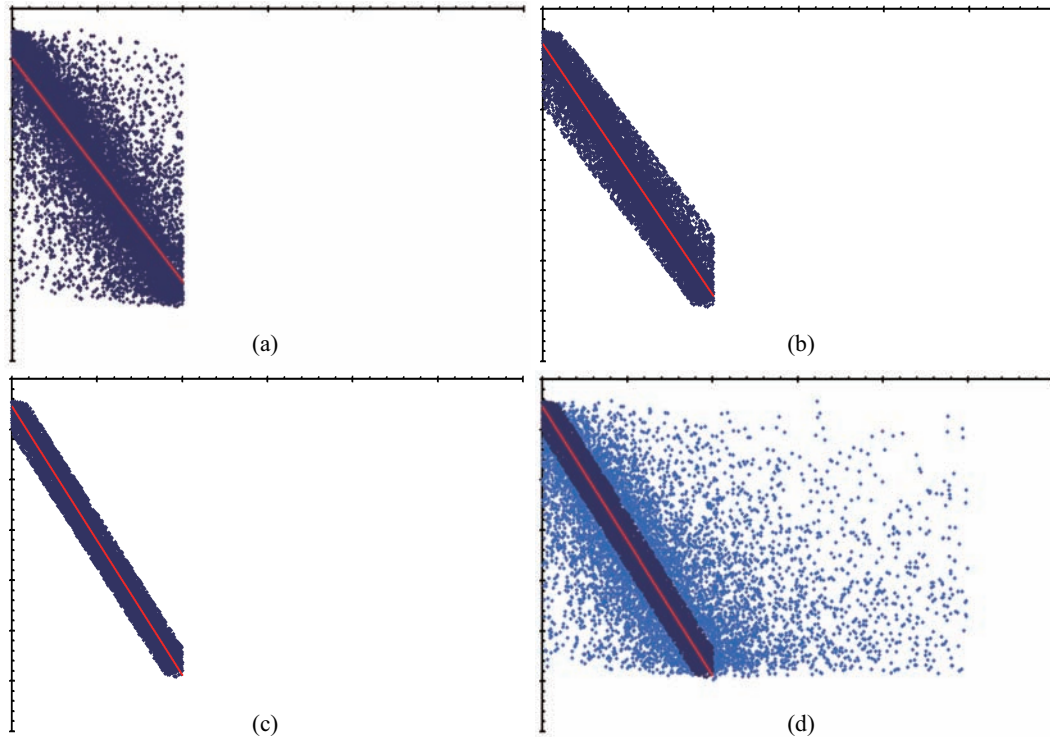


図 4.3: ロバストな直線近似アルゴリズム

(a) : Step2 , (b) : Step3 , (c) : Step5 , (d) : 元データと Step5 の結果

**Step1**  $X$  の定義域  $0 \leq X \leq 10t_X$  を 10 分割し  $0 \leq X \leq t_X, t_X \leq X \leq 2t_X, \dots, 9t_X \leq X \leq 10t_X$  のそれぞれの領域におけるサンプルデータ数が全体のサンプルデータ数の 9% 以下である領域のデータを削除する

**Step2** 最小二乗法により近似直線  $Y = a_1X + b_1$  を求める (図 4.3(a))

**Step3**  $Y = a_1X + b_1 \pm T_1$  の内部にあるデータのみを選び出し最小二乗法により近似直線  $Y = a_2X + b_2$  を求める (図 4.3(b))

**Step4**  $T_{k-1} > T_k$  として  $Y = a_kX + b_k \pm T_k$  の内部にあるデータのみを選び出し最小二乗法により近似直線  $Y = a_{k+1}X + b_{k+1}$  を求める

**Step5**  $a_{n-1} \approx a_n$  かつ  $b_{n-1} \approx b_n$  となるまで Step4 を繰り返し、 $Y = a_nX + b_n$  を最終的な近似直線とする (図 4.3(c)(d))

このようにして RGB 各成分ごとに近似直線を求め、 $K_{S,C}$  および  $\sigma_C$  の値を得る。また  $\sigma$  は RGB 各成分の平均値  $(\frac{\sigma_R + \sigma_G + \sigma_B}{3})$  とする。

推定については適切な直線が求めれば十分であるから、全ての微小領域のデータを用いる

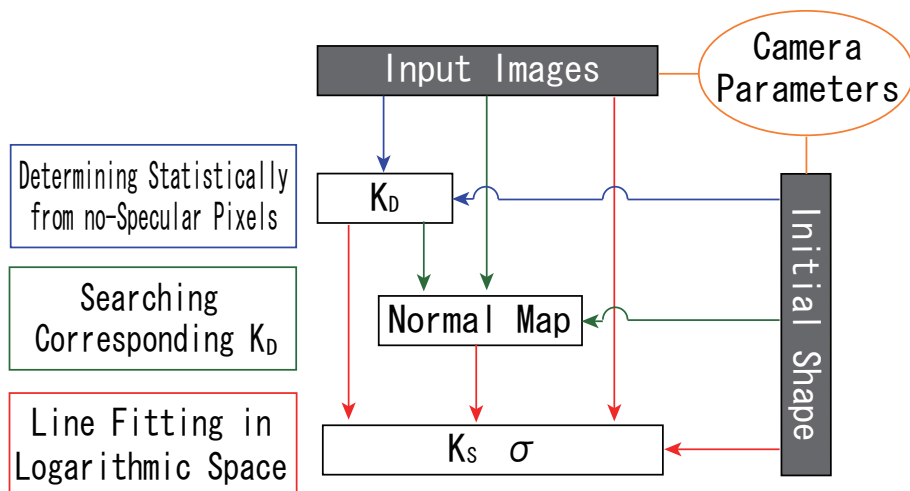


図 4.4: 法線および反射パラメータの推定の流れ

必要はない．そのため推定に利用できる条件を満たすデータが一定数になるまで，ランダムに微小領域を選び出したのちに上記のアルゴリズムによって推定をおこなう．

以上より法線および反射パラメータの推定は図 4.4 に示すような流れでおこなわれる．

## 4.4 実験

この節では提案手法によって，対象物体の法線および反射パラメータを求め，推定結果からレンダリング画像を作成することによって，本手法の精度および問題点について検討する．

まずはじめにシミュレーション物体を用いて法線および反射パラメータの推定をおこない，その精度を評価する．次に実物体を用いて同様に精度の評価をおこなう．次に初期幾何形状の解像度が推定結果に及ぼす影響について検証し，さらに，鏡面反射成分の広がり具合を表す  $\sigma$  の違いによる推定結果の影響について実験をおこなう．

### 精度の評価実験

実験はシミュレーション実験を 2 つ (物体 1 : 球，物体 2 : 器)，実物体での実験を 1 つ (物体 3 : 顔) おこなった．シミュレーション実験における入力画像は Lambertian モデルと Torrance-Sparrow モデルに従うものとしてレンダリングした画像を用いた．

物体 1(球)におけるシミュレーション実験について示す．入力画像は図 4.5(a) に示すような 18 枚とし，入力の幾何形状としては，レーザレンジセンサを用いる代わりに三角パッチ 320 面からなる geodesic sphere を用いた (図 4.5(b))．また各パッチを 1600 の微小領域に分割し，法線マップを定義した．

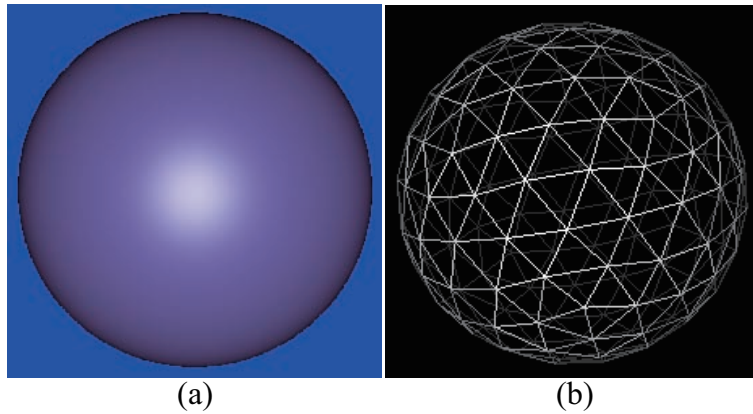


図 4.5: 物体 1 の入力  
 (a) : 入力画像のうちの 1 枚, (b) : 入力幾何形状

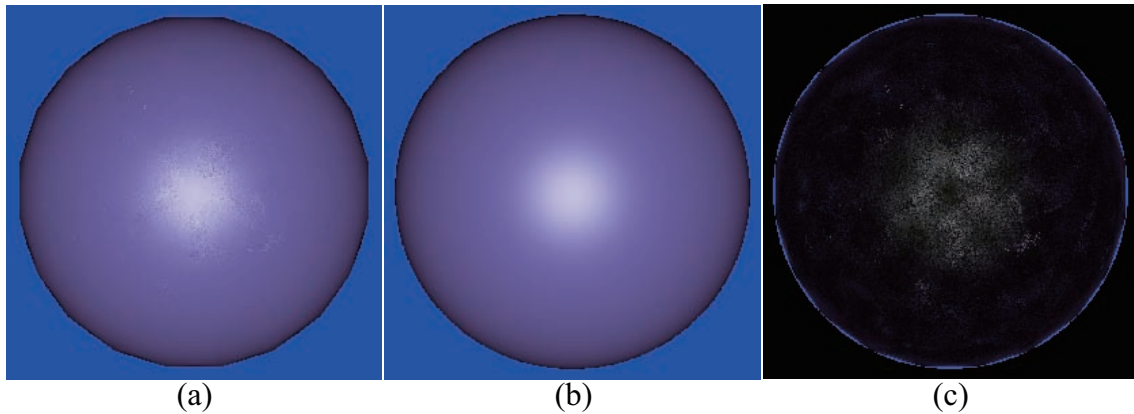


図 4.6: 物体 1 の推定結果  
 (a) : 推定結果のレンダリング画像, (b) : 真値の画像, (c) : 真値との差分

法線および反射パラメータの推定をおこなった結果を図 4.6 および図 4.7, 表 4.1 に示す。反射パラメータについてはどのパラメータも誤差率が 1% 前後で正確に推定ができています。また入力の幾何形状はかなり粗く平面が目立つにもかかわらず、法線マップを用いることで球の曲面を表現できている。

レンダリング画像と真値とを比較した図 4.6(c) において、球の縁の部分と中心付近の鏡面反射の部分に誤差が見られるが、縁の部分の誤差は元の形状が真値の球よりも一回り小さいために生じた誤差である。中心付近の誤差に関しては、物体表面の位置が真値とは異なるために生じた視線方向ベクトルや光源方向ベクトルのわずかな誤差によるものだと考えられる。

次にシミュレーション実験として物体表面に細かな凹凸のある器を扱った結果を示す。図 4.8 に入力画像列 16 枚のうちの 1 枚と入力の幾何データを示す。また推定した反射パラメー



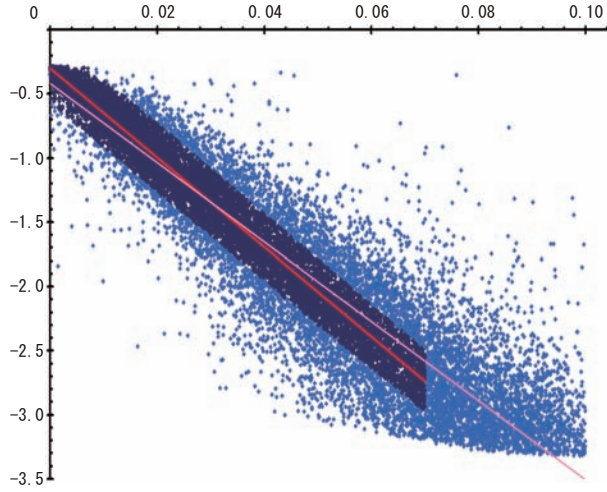


図 4.7:  $K_{S,C}$  と  $\sigma$  の推定直線

・ : 単純な最小二乗法での推定結果, · : ロバストな直線近似での推定結果

	推定値	真値	誤差率 (%)
$K_{D,R}$	0.30284	0.3	0.947
$K_{D,G}$	0.20215	0.2	1.075
$K_{D,B}$	0.70570	0.7	0.814
$K_{S,R}$	0.74090	0.75	1.213
$K_{S,G}$	0.74083	0.75	1.223
$K_{S,B}$	0.74103	0.75	1.196
$\sigma$	0.16929	0.17	0.418

表 4.1: 物体 1 の推定された反射パラメータ

と修正された法線マップを用いて、入力に用いたものとは異なる視点位置から見たときのレンダリング画像と真値との比較を図 4.9 に示す。入力の幾何データでは器の様子があまり表現されていないが、法線マップを推定することでより精密な凹凸まで表現することができている。反射パラメータについても表 4.2 に示すように精度良く求めることができた。

次に実物体での実験として物体 3(顔のモデル) を扱った例を示す。入力データの取得方法について説明する。まずはじめにレンジセンサとカメラを固定し、キャリブレーションボックスの計測をおこない、レンジセンサとカメラのキャリブレーションおよびカメラの内部パラメータを求める。レンジセンサとカメラを固定したまま対象物体を計測することによって、距離データと入力画像の取得をおこなうとともにそれらの対応づけをし、距離データの位置合わせをおこなうことでカメラの外部パラメータを求めた。また光源はカメラのフラッシュ



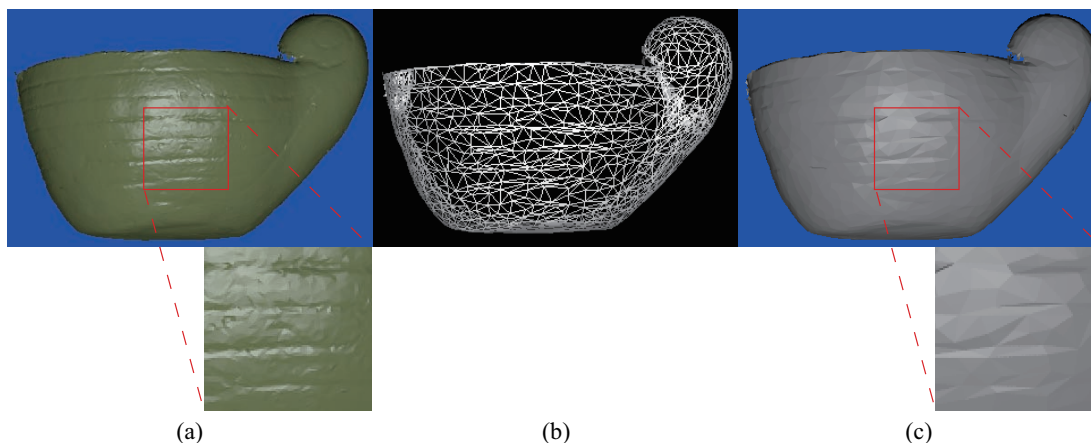


図 4.8: 物体 2 の入力

(a) : 入力画像のうちの 1 枚, (b) : 入力幾何形状, (c) : 入力形状の見え

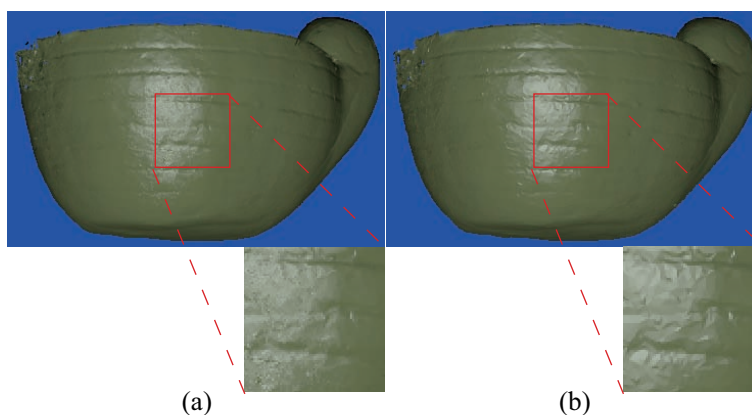


図 4.9: 物体 2 の推定結果と真値との比較

(a) : 推定結果のレンダリング画像, (b) : 真値の画像  
(入力画像に含まれていない視点からの画像)

を用いることでカメラの位置姿勢から光源の位置を求め、光源の RGB 各成分の明るさについては、標準白色板をカメラのフラッシュで撮影することによって求めた。

入力画像を 16 枚とし、そのうちの 3 枚を図 4.10(a)(b)(c) に示す。また入力の幾何形状は図 4.10(d) に示した 1000 面からなるポリゴンメッシュモデルを用いて、それぞれの三角パッチを 400 個の微小領域に分割して法線マップを定義した。法線および反射パラメータの推定をおこなった結果を図 4.11, 表 4.3 に示す。

結果の画像は入力の幾何形状と比較するとかなり真値に近づいている。しかしながら推定結果によるレンダリング画像はまばらなノイズのような誤差が多く見られる。これは周囲の法線ベクトルに対して、そのピクセルにおける法線ベクトルが誤って推定されているため

	推定値	真値	誤差率 (%)
$K_{D,R}$	0.29858	0.3	0.474
$K_{D,G}$	0.39817	0.4	0.459
$K_{D,B}$	0.14923	0.15	0.485
$K_{S,R}$	0.76395	0.75	1.860
$K_{S,G}$	0.76360	0.75	1.813
$K_{S,B}$	0.76447	0.75	1.929
$\sigma$	0.12258	0.12	2.149

表 4.2: 物体 2 の推定された反射パラメータ

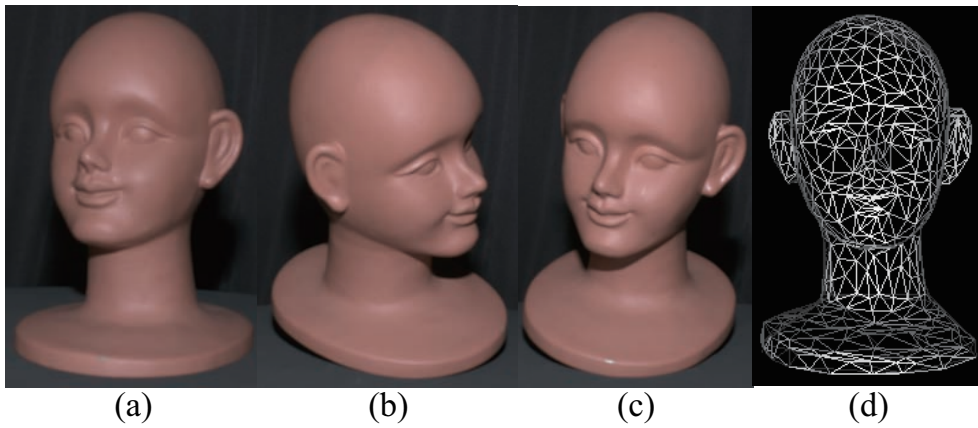


図 4.10: 物体 3 の入力

(a)(b)(c) : 入力画像のうち 3 枚, (d) : 入力幾何形状

	$K_{D,R}$	$K_{D,G}$	$K_{D,B}$	$K_{S,R}$	$K_{S,G}$	$K_{S,B}$	$\sigma$
推定値	0.51940	0.19373	0.12877	0.11514	0.10826	0.10863	0.28499

表 4.3: 物体 3 の推定された反射パラメータ

であると考えられる．物体表面上の全ての領域において反射パラメータが均一であるとして推定をおこなう本手法において，何らかのノイズや誤差の影響の多くは法線の推定誤差として現れやすい．そのためこのようにまばらな誤差が多く見られる．

#### 初期幾何形状による推定精度の評価実験

ここでは初期幾何形状による推定精度への影響について考察する．

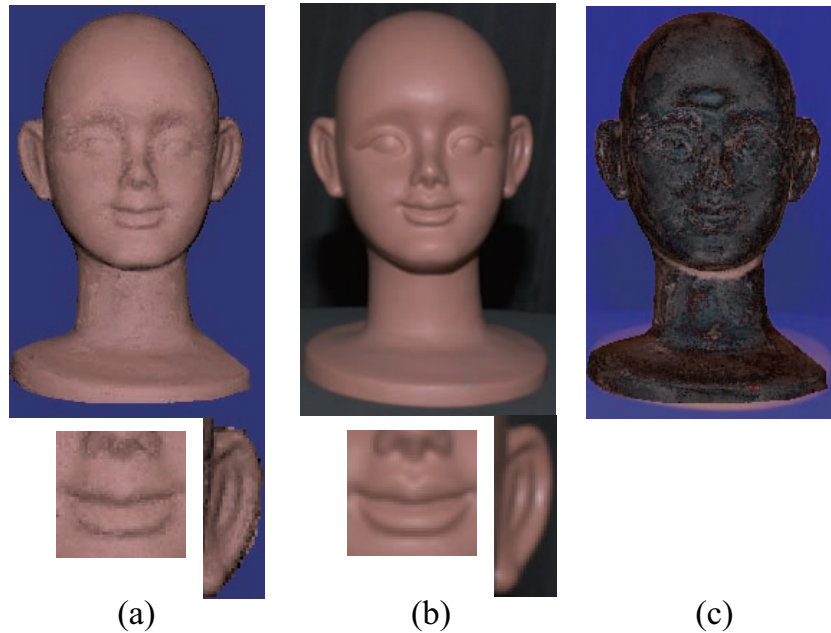


図 4.11: 物体 3 の推定結果と真値との比較  
 (a) : 推定結果のレンダリング画像, (b) : 真値の画像, (c) : 真値との差分

入力として与えるポリゴンメッシュモデルは、局所的には三角パッチの平面によって物体表面を近似しているため、図 4.12 に示すように視点方向が変わると画像中での対応するピクセル位置が異なる可能性がある。つまり視点 1 から見ると実際の形状におけるある微小領域 A もポリゴンメッシュモデルにおける微小領域 A' も入力画像中の同じピクセル位置が対応しているが、視点 2 から見ると入力画像中の異なるピクセル位置が対応し、また視線方向ベクトルも異なる向きになる。そのため推定をおこなう際にこれらの差異が誤差となってしまふと考えられる。ポリゴンメッシュモデルの解像度が低いほど実際の形状との差が大きくなるので、解像度の低いポリゴンメッシュモデルを入力として用いたとき、このような誤差の影響がどの程度現れるのかを調べる。

そこで、入力の幾何形状の解像度を段階的に変えながら、法線および反射パラメータを求める実験をおこなった。対象物体はシミュレーション物体 2 を用いた。これはシミュレーション実験であるため、その他の誤差要因を最小限にすることができると考えられる。その結果を図 4.13 および表 4.4 に示す。

(a) は真値と同程度の解像度でおよそ 8 万ポリゴン、(b) は 5 万ポリゴン、(c) は 1 万ポリゴン、(d) は 5000 ポリゴン、(e) は 1000 ポリゴン、(f) は真値である。また (ア) は入力として与える幾何形状、(イ) は推定結果を用いたレンダリング結果、(ウ) は拡大図である。また表 4.4 はそれぞれの結果で得られた反射パラメータを示している。

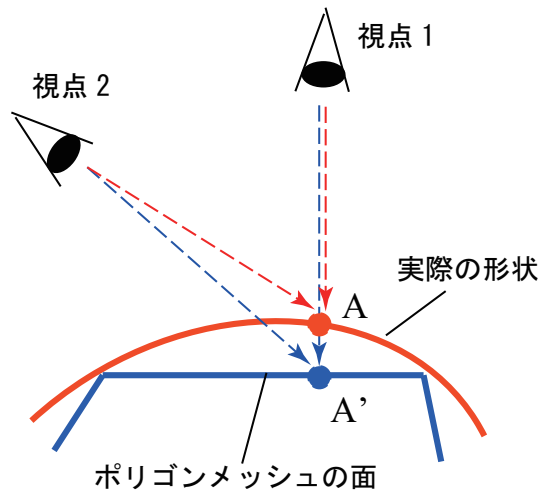


図 4.12: ポリゴンメッシュモデルによる形状と実際の形状との差異

微小領域 A と A' は視点 1 から見ると同じピクセルが対応するが、視点 2 から見ると異なるピクセルが対応する。

	真値	推定値 (8 万)	推定値 (5 万)	推定値 (1 万)	推定値 (5000)	推定値 (1000)
$K_{D,R}$	0.3	0.29885	0.29909	0.29777	0.29884	0.29861
$K_{D,G}$	0.4	0.39849	0.39882	0.39711	0.39847	0.39814
$K_{D,B}$	0.15	0.14943	0.14954	0.14886	0.14949	0.14945
$K_{S,R}$	0.75	0.76052	0.75889	0.76288	0.76381	0.75818
$K_{S,G}$	0.75	0.76029	0.75862	0.76253	0.76352	0.75781
$K_{S,B}$	0.75	0.76089	0.75939	0.76345	0.76436	0.75877
$\sigma$	0.12	0.12255	0.12271	0.12255	0.12255	0.12301

表 4.4: 入力幾何形状の解像度の違いによる反射パラメータの推定結果 (物体 2)  
入力幾何形状の解像度に関わらず精度良く反射パラメータを推定できている

入力の幾何形状としてかなり粗いものを用いた場合であっても、推定された法線および反射パラメータを用いたレンダリング画像は真値の画像とかなり似ている。しかし、背景との境界をなすエッジ部分に関しては、法線を変化させても形状そのものは変わらないため、入力の幾何形状に依存する。反射パラメータについては、入力の幾何形状によらずかなり精度良く推定された。(ウ)の拡大図を見ても分かるように、幾何形状が粗くなると法線のばらつきが多くなる。つまり、それぞれの微小領域で推定される反射パラメータは、幾何形状が粗くなるにつれて真値からのばらつきが大きくなるが、その影響は法線の推定として現れ、統計的な平均値として求められる反射パラメータは、ばらつきが大きくなっても平均値が同じである限り正しい推定をおこなうことができると考えられる。



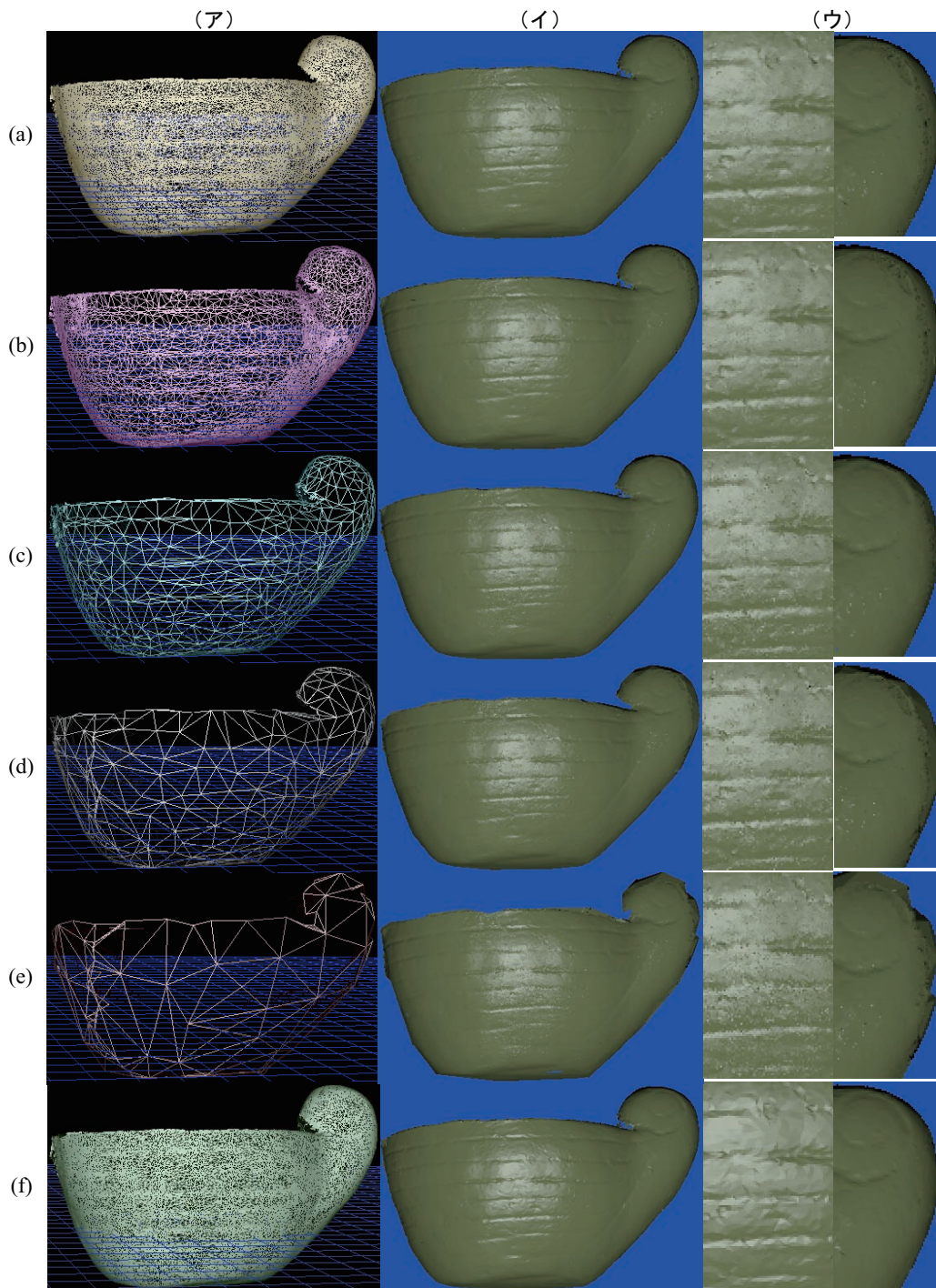


図 4.13: 入力幾何形状の解像度の違いによる推定結果 (物体 2)

(a) : 8 万ポリゴン, (b) : 5 万ポリゴン, (c) : 1 万ポリゴン, (d) : 5000 ポリゴン, (e) : 1000 ポリゴン, (f) : 真値, (ア) : 入力幾何形状, (イ) : 推定結果のレンダリング画像, (ウ) : 拡大図

また同じような実験を実物体である物体 3 についてもおこなった．その結果を図 4.14 および表 4.5 に示す．図 4.14(a) は真値の画像, (b)(c)(d) は高解像度の 10 万ポリゴンでの, 幾

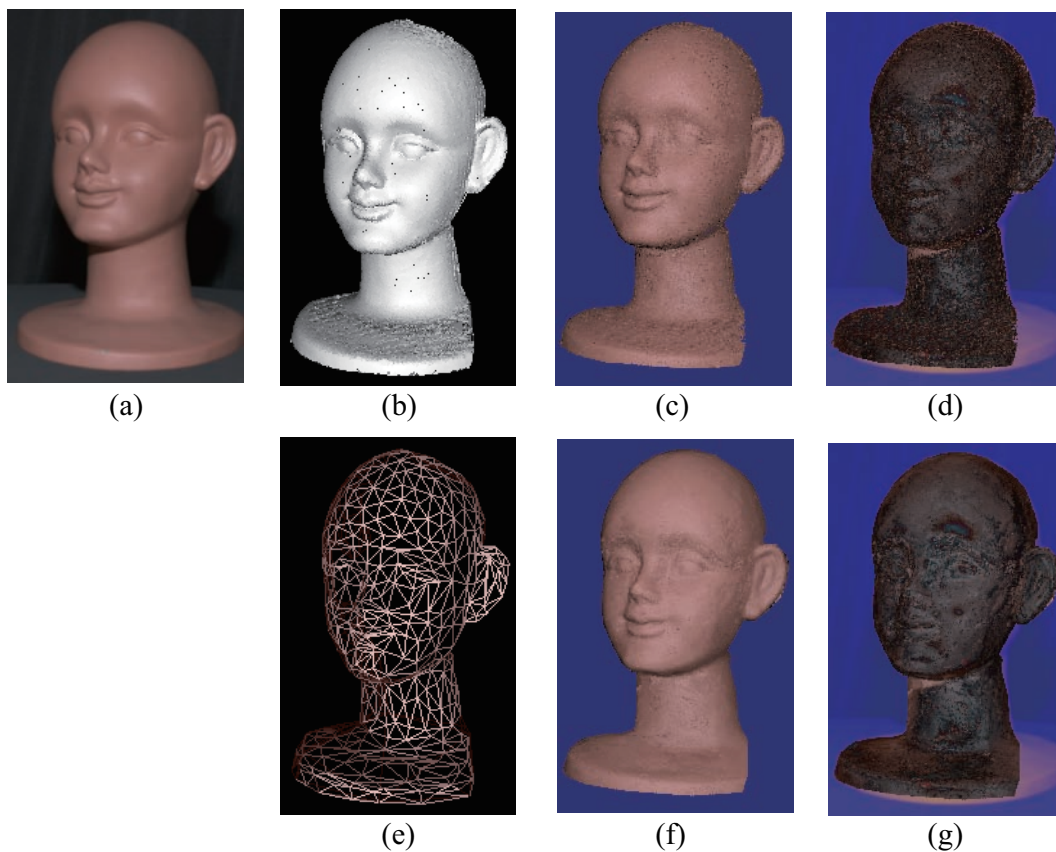


図 4.14: 入力幾何形状の解像度の違いによる推定結果 (物体 3)

(a) : 真値の画像, (b)(c)(d) : 10 万ポリゴン, (e)(f)(g) : 1000 ポリゴン, (b)(e) : 入力幾何形状, (c)(f) : 推定結果のレンダリング画像, (d)(g) : 真値との差分

	$K_{D,R}$	$K_{D,G}$	$K_{D,B}$	$K_{S,R}$	$K_{S,G}$	$K_{S,B}$	$\sigma$
推定値 (10 万)	0.52473	0.19498	0.12837	0.11837	0.11224	0.11255	0.28396
推定値 (1000)	0.52223	0.19444	0.12907	0.12209	0.11573	0.11620	0.25786

表 4.5: 入力幾何形状の解像度の違いによる反射パラメータの推定結果 (物体 3)

何形状, 推定結果のレンダリング画像, 真値との差分をそれぞれ表している. また (e)(f)(g) は低解像度の 1000 ポリゴンでの幾何形状, 推定結果のレンダリング画像, 真値との差分を表している.

反射パラメータは真値がわからないため, 正確であるかどうかを判断することが難しいが, 入力幾何形状による差は, 鏡面反射パラメータに多少の違いがあるものの, 法線および拡散反射パラメータの推定への影響はそれほど大きくない.

	真値	$\sigma = 0.03$	$\sigma = 0.05$	$\sigma = 0.1$	$\sigma = 0.15$	$\sigma = 0.2$	$\sigma = 0.25$	$\sigma = 0.3$
$K_{D,R}$	0.3	0.30151	0.30133	0.30161	0.30186	0.30693	0.31696	0.32853
$K_{D,G}$	0.2	0.20085	0.20074	0.20092	0.20124	0.20628	0.21608	0.22735
$K_{D,B}$	0.7	0.70420	0.70378	0.70443	0.70441	0.71002	0.72139	0.73425
$K_{S,R}$	0.75	0.48274	0.65264	0.73398	0.73693	0.74304	0.73711	0.72204
$K_{S,G}$	0.75	0.48338	0.65291	0.73400	0.73689	0.74325	0.73759	0.72286
$K_{S,B}$	0.75	0.48029	0.65115	0.73398	0.73700	0.74231	0.73467	0.71793
$\sigma$	-	0.04934	0.05659	0.10179	0.15047	0.19894	0.24707	0.29596

表 4.6:  $\sigma$  の違いによる反射パラメータの推定結果 (物体 1)  
 $\sigma$  が大きすぎたり小さすぎたりすると推定がうまくできなくなる

#### $\sigma$ の違いによる推定精度への影響

鏡面反射成分の広がり具合を表す  $\sigma$  のパラメータによる推定精度への影響について考える。物体 1 のモデルを用いて、入力画像の  $\sigma$  の値を変化させて、推定結果がどのように変わるかを調べた。入力画像の  $\sigma$  の値が異なる点以外は全て 4.4 節での物体 1 の実験と同じ入力である。

結果を図 4.15, 4.16 および表 4.6 に示す。図 4.15 は上の画像が真値である入力画像のうち一枚、下の画像が推定された法線および反射パラメータによりレンダリングした画像である。(a) は  $\sigma = 0.03$ , (b) は  $\sigma = 0.05$ , (c) は  $\sigma = 0.1$ , (d) は  $\sigma = 0.15$ , (e) は  $\sigma = 0.2$ , (f) は  $\sigma = 0.25$ , (g) は  $\sigma = 0.3$  である。また図 4.16 のグラフは、 $\sigma$  の変化に対する反射パラメータの真値からの誤差率 (%) を表している。

図 4.16 および表 4.6 より、 $\sigma$  が小さいときは鏡面反射パラメータの推定精度が低い。これは観測される鏡面反射成分が少ないことが原因であると考えられる。一方で拡散反射成分は広い範囲で観測されるため、拡散反射パラメータと法線は精度良く推定されている。また、 $\sigma$  が大きいときは拡散反射パラメータの推定精度が低く、真値よりも大きな値が推定されている。これは鏡面反射成分が広く分布しているために、拡散反射成分のみの微小領域を検出することが難しく、弱い鏡面反射成分を含めて拡散反射成分と見なしてしまったことが原因であると思われる。拡散反射パラメータの推定精度が低いために、図 4.15(f)(g) のように法線の推定精度も悪くなっている。また拡散反射パラメータが真値より大きいことから、鏡面反射パラメータの  $K_S$  は真値よりも小さな値が推定されている。

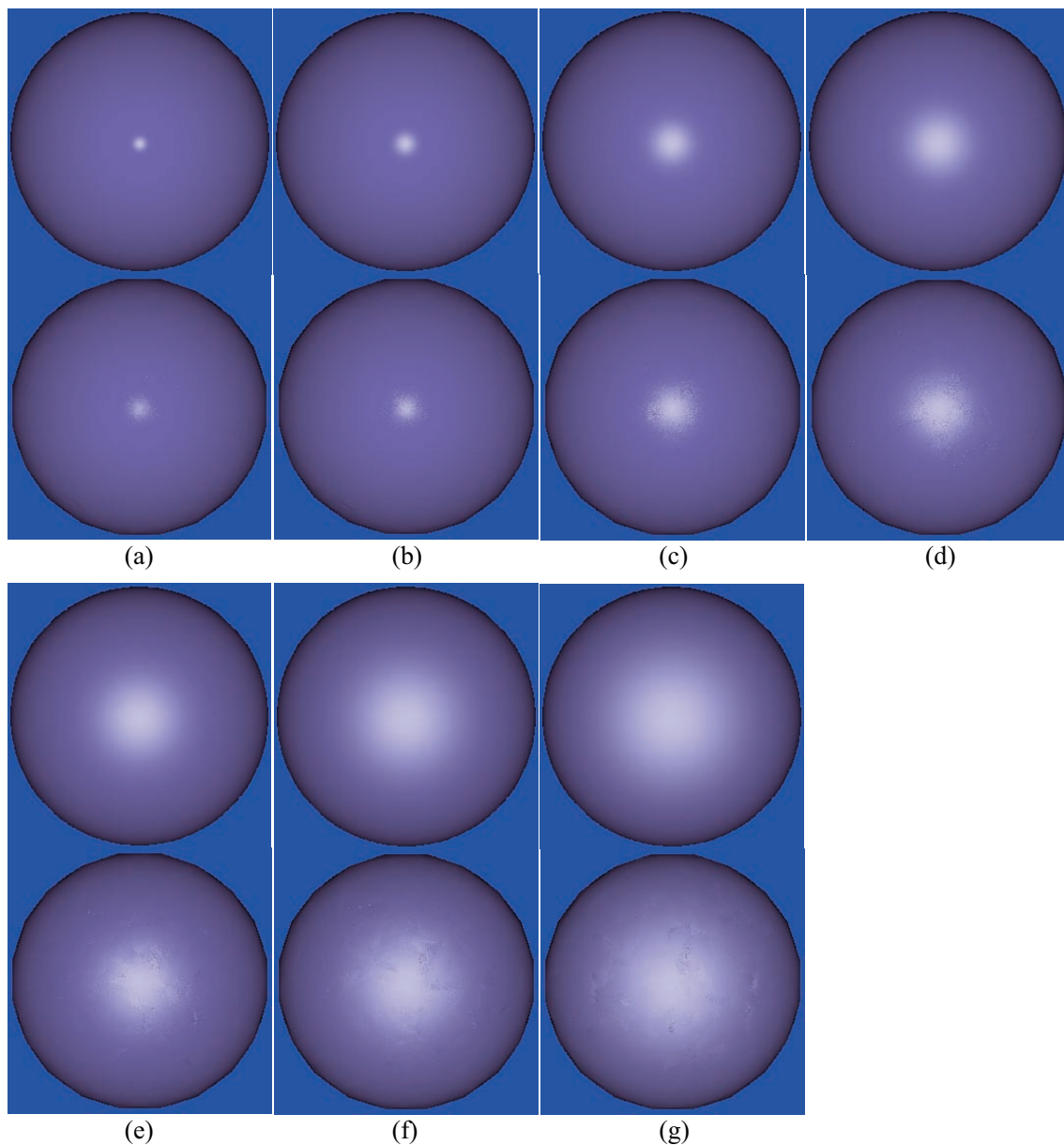


図 4.15:  $\sigma$  の違いによる推定結果のレンダリング画像

上: 真値の画像, 下: 推定された法線および反射パラメータによるレンダリング画像, (a):  $\sigma = 0.03$  のとき, (b):  $\sigma = 0.05$ , (c):  $\sigma = 0.1$ , (d):  $\sigma = 0.15$ , (e):  $\sigma = 0.2$ , (f):  $\sigma = 0.25$ , (g):  $\sigma = 0.3$

## 4.5 考察

実験によって, レンジセンサから得られた形状データを利用して, 多視点の Photometric stereo によって法線および反射パラメータを推定する本手法は, 精度良く推定をおこなうことができ, その有効性が示された.

また実験によって以下のことがわかった.



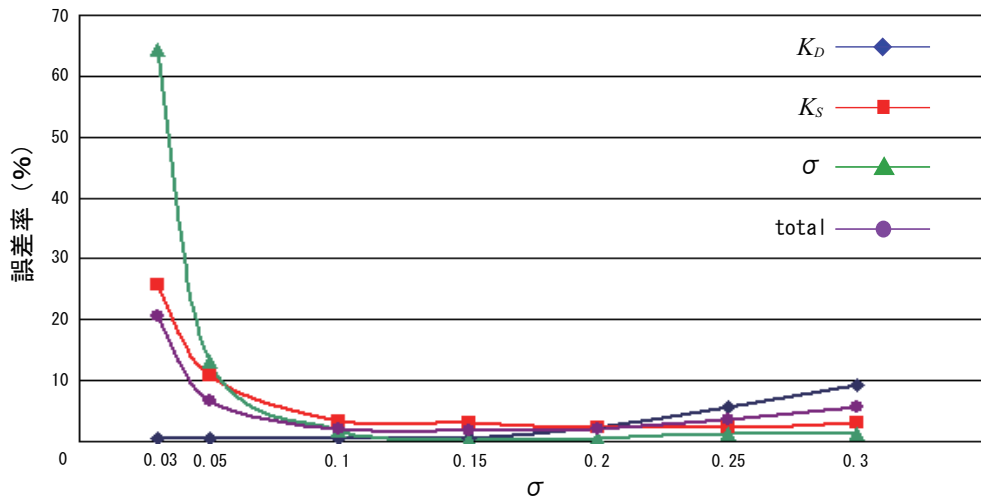


図 4.16:  $\sigma$  に対する反射パラメータの誤差率

- 入力として与える幾何形状が多少粗いものであっても，法線および反射パラメータの推定にはあまり影響が現れない
- 鏡面反射成分の広がり具合によって，推定結果の精度が変わる
- 実物体を扱う場合は，反射パラメータが均一であるように見える物体でも，均一と仮定することは難しい

入力の幾何形状の解像度が精度に対して最も影響を及ぼすのは，ある視点における背景との境界部分である．その他の部分における細かな凹凸については，あまり解像度の影響を受けることなく，正確に推定することができる．そのため境界部分の形状が不自然にならない程度に，入力の幾何形状の解像度を低くすることでデータ量の削減をおこなうことができると考えられる．

鏡面反射の広がり具合は対象とする物体によって決まるため，一般的な物体に対して，閾値を変化させることによって鏡面反射成分が観測されにくい領域を見つけ出すことは難しい．また  $\sigma$  が大きく広い範囲で鏡面反射成分が観測される場合は，拡散反射パラメータや法線の推定にまで影響が出てしまうため，鏡面反射成分の有無によらず法線および拡散反射パラメータの推定をおこなえることが望ましい．

実物体を対象とする場合は，相互反射の影響やノイズなどの影響により，反射パラメータが均一であると見なせそうな場合であっても，均一として推定をおこなうことが難しい．そのため，あらかじめ同じ反射パラメータであると思われる大きな領域に分割して，その領域ごとに反射パラメータを推定するような手法を用いたとしても，図 4.11 に示す程度の精度しか期待できないと考えられる．つまり反射パラメータはなるべく狭い領域ごとに分けて推定をする必要がある．

そこで5章では、鏡面反射成分の有無によらず、また相互反射やノイズの影響に対してもロバストな反射パラメータの推定手法を提案する。さらに反射パラメータを推定する領域を細かく分けることで、より正確に反射特性を表現することを目指す。

## 第5章 Specular-free 画像によるロバスト反射 パラメータ推定

## 5.1 本手法の概要とその位置付け

4章で述べた疎な形状データと密な法線マップによる反射パラメータ推定では、シミュレーション実験において非常に精度良く法線および反射パラメータを推定できたものの、実物体を扱った実験では推定の精度があまり良くなかった。また、鏡面反射成分が広い範囲に存在する場合には、鏡面反射成分を避けて推定することが難しく、推定結果に悪い影響を及ぼすことが示された。

そこで本章では、4章で提案した多視点 Photometric stereo を用いて法線および反射パラメータを推定する際に、鏡面反射成分の有無に依存しない手法として、specular-free 画像を用いたロバストな反射パラメータ推定手法を提案する。提案手法を用いた実験によって、4章において推定精度が良好ではなかった実物体に対して、法線および反射パラメータの推定を正確におこなえることを示す。

反射パラメータの推定に関しては、実物体を対象としたとき、物体が均一な材質でできており、物体表面で均一な反射パラメータであると思われる場合であっても、反射パラメータを均一であると仮定して推定をおこなうことは難しいことが4.4節の実験結果により示唆されている。

そこで本章では反射パラメータが均一であると考えられる領域をより小さな局所的な領域とし、それぞれの領域ごとに反射パラメータを推定することによって、複数の色を持った物体や、複雑なテクスチャのある物体の反射特性の推定を可能にし、より正確な反射特性の推定を目指す。

章立ては以下の通りである。5.1節は本節であり、背景として4章での問題点を挙げ、その解決を本章の目的とすることを述べた。5.2節では鏡面反射の有無によらずロバストに反射パラメータを推定する手法を提案する。5.3節では提案手法を用いた実験をおこない、その結果を示す。そして最後の節でまとめをおこなう。

## 5.2 提案手法：ロバストな反射パラメータ推定

本節では実物体を対象として、正確な法線および反射パラメータをロバストに推定する手法を提案する。4.5節の考察を踏まえて、5.2.1節では鏡面反射成分の有無によらず法線を推定するために、入力画像に specular-free 画像を用いた推定について述べる。5.2.3節では、法線マップを定義した微小領域ごとに拡散反射パラメータを推定する方法を説明する。5.2.4節ではクラスタリングによって鏡面反射パラメータが同じであると領域を決め、その領域ごとに非線形最適化手法によって鏡面反射パラメータを推定する方法について説明する。

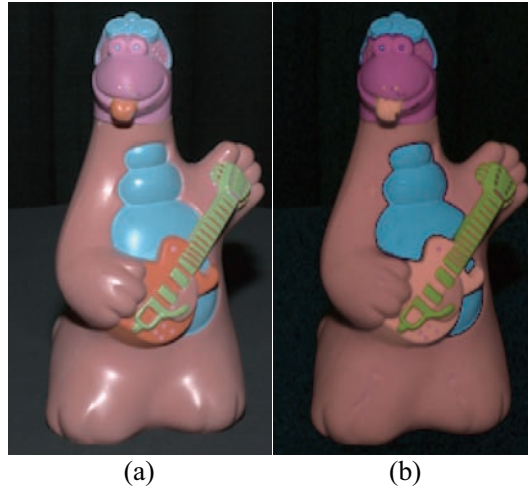


図 5.1: Specular-free 画像の例  
(a) : 入力画像 , (b) : Specular-free 画像

### 5.2.1 Specular-free 画像を用いた法線の推定

ある微小領域における法線を 4.2 節で説明した Photometric stereo の原理によって推定するためには、異なる既知の光源環境で撮影された鏡面反射成分の含まれない拡散反射成分だけの入力が 3 つ以上必要である。4.3.3 節では条件式などによって鏡面反射成分が含まれにくい領域を選び出して法線の推定をおこなった。しかし鏡面反射成分が広い範囲で観測されてしまう場合は、拡散反射成分だけの領域を選び出すことが困難であり、うまく推定をおこなうことができなかった。

そこで我々は入力として specular-free 画像を用いる。Specular-free 画像を用いることによって、鏡面反射成分の有無や広がり具合に関わらず法線の推定を正確におこなうことができる。

Specular-free 画像は R. T. Tan ら [18] によって提案された鏡面反射成分を含まない画像である。図 5.1 にその例を示す。図 5.1(a) は入力画像、図 5.1(b) は specular-free 画像である。Specular-free 画像は光源色が既知でかつ鏡面反射成分が NIR 仮定に基づく場合、1 枚の画像だけを用いて非常に簡単にかつ高速にピクセル単位で生成できる。特徴として陰影情報を保存したまま鏡面反射成分を除去することが挙げられる (付録A.2 参照)。

本手法における多視点 Photometric stereo では陰影情報から法線を推定するため、specular-free 画像を入力とすることで、 $\sigma$  による鏡面反射成分の広がり具合や、鏡面反射成分の有無によらず法線を求めることができる。また specular-free 画像の利点として、相互反射のうち specular-specular の相互反射 (付録A.3 参照) は光源と同じ色であるため除去することができる。よって specular-free 画像は多視点 Photometric stereo を用いて法線を推定する場合に最適な入力である。

Specular-free 画像を入力として、微小領域 A における法線を多視点の Photometric stereo 法によって求める方法について説明する。4.3.1 節で提案した多視点 Photometric stereo によって、微小領域 A が写されている n 枚の specular-free の画像列の中から 3 つを選んだ  ${}_nC_3$  通りの解候補の法線が求められる。理想的には入力 of specular-free 画像は全て Lambertian に従っているため、これらの法線は全て等しいはずである。しかし誤差として入力画像のノイズや、図 4.12 で見たように、形状の差異による参照する画像ピクセルのずれなどが考えられるため、 ${}_nC_3$  本の法線ベクトルの解候補から次の 5.2.2 節で示す方法により、これらの誤差の影響を取り除いた最適な解ベクトルを決定する。

## 5.2.2 類似度計算による最適な解ベクトルの決定

解の候補として複数のベクトルが推定された場合に、類似度を計算することによって、それらから最適な解ベクトルを決定する方法について説明する。

n 個のベクトル  $\mathbf{a}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) が解候補であったとき、全てのベクトルに対し、注目しているベクトルとその他のベクトルとのコサイン距離とベクトルの大きさを考え、それぞれのベクトルとの類似度を計算する。閾値によって類似度が高いと見なされたベクトルの数が最大となる場合に、注目しているベクトルおよび類似度が高いと見なされたベクトルの平均値を最適なベクトル解とする (図 5.2)。ノイズなどによって誤って推定された外れ値のベクトルは、類似度の高いベクトルが少ないため、このように類似度の高いベクトル数が最大となる集合を選び出すことによって、外れ値を除去してロバストに推定をおこなうことができる。

ベクトルの類似度の計算は以下のおこなう。次の条件式を満たすベクトルを類似度が高いとして、その集合を  $V_k$ 、その個数を  $N_k$  とする。

$$V_k = \left\{ \mathbf{a}_i \mid \frac{\mathbf{a}_k \cdot \mathbf{a}_i}{|\mathbf{a}_k||\mathbf{a}_i|} > T, \quad t_1|\mathbf{a}_k|^2 < \mathbf{a}_k \cdot \mathbf{a}_i < t_2|\mathbf{a}_k|^2 \right\} \quad (5.1)$$

ここで

$$N_p = \max_k(N_k)$$

としたとき、解ベクトル  $\mathbf{b}$  を

$$\mathbf{b} = \frac{1}{N_p} \sum_{\mathbf{a}_i \in V_p} \mathbf{a}_i$$

によって求める。ただし、本章における実験では  $T = 0.99$ ,  $t_1 = 0.9$ ,  $t_2 = 1.1$  とした。

入りに鏡面反射成分を持ったピクセルが含まれていた場合には、法線ベクトルや拡散反射パラメータの色ベクトルは、拡散反射成分のみを入力として得られたベクトル群に対して、ベクトルの向きや大きさが異なるため、式 (5.1) の条件を満たさない。したがってこのよう

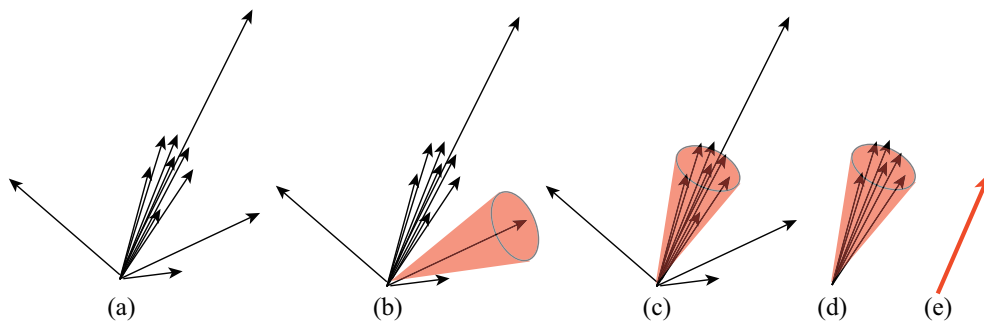


図 5.2: 解ベクトルの決定

推定された解候補ベクトル (a) のそれぞれに対して類似度の高いベクトルの数を数える (b)(c) . 類似度の高いベクトルの数が最大の場合に (d) , それらの平均を解ベクトルとする (e) .

に類似度の低いベクトルを検出することによって、鏡面反射成分が含まれるピクセルを入力として得られたベクトルを取り除くことができ、また同様にノイズなどにより誤ったベクトルが推定された場合にも、外れ値として取り除くことができる。そのためよりロバストに解ベクトルを決定することができると思われる。

### 5.2.3 拡散反射パラメータの推定

カメラで撮影した入力画像の中で、微小領域 A が見えている  $n$  枚に対して、前節で推定した法線と式 (4.4) によって  $n$  通りの  $K_{D,C}$  が求められる。  $n$  個の  $K_D$  色ベクトルの解候補から 5.2.2 節の方法によって最適な解ベクトルを決定する。

入力画像には鏡面反射成分が含まれている場合があるが、そのような入力から得られた  $K_D$  は、拡散反射成分のみを入力として得られた  $K_D$  とは異なる値をとるため、外れ値として見なすことができる。よって、5.2.2 節の方法を用いて複数の解ベクトル候補の中から外れ値を取り除き、最適な解ベクトルを決定する。

### 5.2.4 鏡面反射パラメータの推定

Torrance-Sparrow モデルの鏡面反射パラメータを求めるためには、反射パラメータが均一であるとする一つの領域内において最低でも 2 枚以上の入力画像が必要となる。しかし、1 枚の画像中に鏡面反射成分が観測される領域は限られており、かなり少ない。そのため、全ての微小領域において 2 枚以上の入力を与えることを考えると、非常に密に画像を撮影する必要があり、入力画像の数が膨大になってしまう。

そこで鏡面反射成分については反射パラメータが同じであると仮定する領域を微小領域から拡張し、その領域内でパラメータを一定であると見なして推定をおこなう。各微小領域に

において鏡面反射パラメータが似ていると見なすのに尤もらしい基準として次の2つが考えられる。

- 位置関係の近い微小領域
- 拡散反射パラメータが等しい微小領域

よってこれらの基準にしたがい、全ての微小領域の3次元位置と  $K_D$  の3次元色ベクトルの合計6次元を特徴量とし、この特徴空間内で K-means クラスタリングをおこなうことよって拡張領域を求める。ただし微小領域間の距離の定義として、位置と  $K_D$  色ベクトルの6次元標準化ユークリッド平方距離を用いて表した。この特徴空間における6次元ベクトルを  $v = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6)$  とすると  $v_i$  と  $v_j$  の距離  $D_{ij}$  は次式のように表される。

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^6 \frac{(v_{k,i} - v_{k,j})^2}{s_k^2}$$

ただし  $s_k^2$  は  $v_k$  の分散である。

K-means クラスタリングによって分類された拡張領域内で鏡面反射パラメータが均一であるとして、既に求めた法線および拡散反射パラメータを用いて  $I_{S,C} = I_C - I_{D,C}$  によって求めた鏡面反射成分のうち、4.3.3 節の鏡面反射パラメータの推定の際に用いた鏡面反射成分であると思なす条件を満たしたものを抜き出して推定をおこなう。

拡張領域内で観測された鏡面反射成分の数を  $n$  個とし、ある鏡面反射成分  $i$  が観測された微小領域を  $A(i)$  とする ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。また微小領域  $A(i)$  において観測された鏡面反射成分の明るさを  $I_{S,C,A(i)}$  とし、Torrance-Sparrow モデルを用いて次式で表される誤差関数  $Err(K_{S,C}, \sigma)$  を考える。

$$Err(K_{S,C}, \sigma) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left( I_{S,C,A(i)} - \frac{E_C}{d_{A(i)}^2} \frac{K_{S,C}}{\mathbf{n}_{A(i)} \cdot \mathbf{v}_{A(i)}} \exp\left(-\frac{\alpha_{A(i)}^2}{2\sigma^2}\right) \right)^2 \quad (5.2)$$

$Err(K_{S,C}, \sigma)$  は鏡面反射パラメータ  $K_{S,C}$ 、 $\sigma$  の関数であり、この関数を最小化するときの  $K_{S,C}$ 、 $\sigma$  が推定すべき鏡面反射パラメータである。すなわち式 (5.2) で表された誤差関数を最小にするように非線形最適化問題を解けばよい。

そこで我々は Levenberg-Marquardt 法を用いて非線形最適化をおこなう。LM 法は解から離れたところでは勾配法で粗い探索をおこない、解にある程度近づいたら Gauss-Newton 法に切り替える組織的な推定をおこなう手法である。収束までの時間は短いものの、初期解によっては局所解に陥る場合があるため、アニーリングによってランダムに初期解を変えながら繰り返し最適化計算をおこなう。

以上より法線および反射パラメータの推定は図 5.3 に示すような流れでおこなわれる。



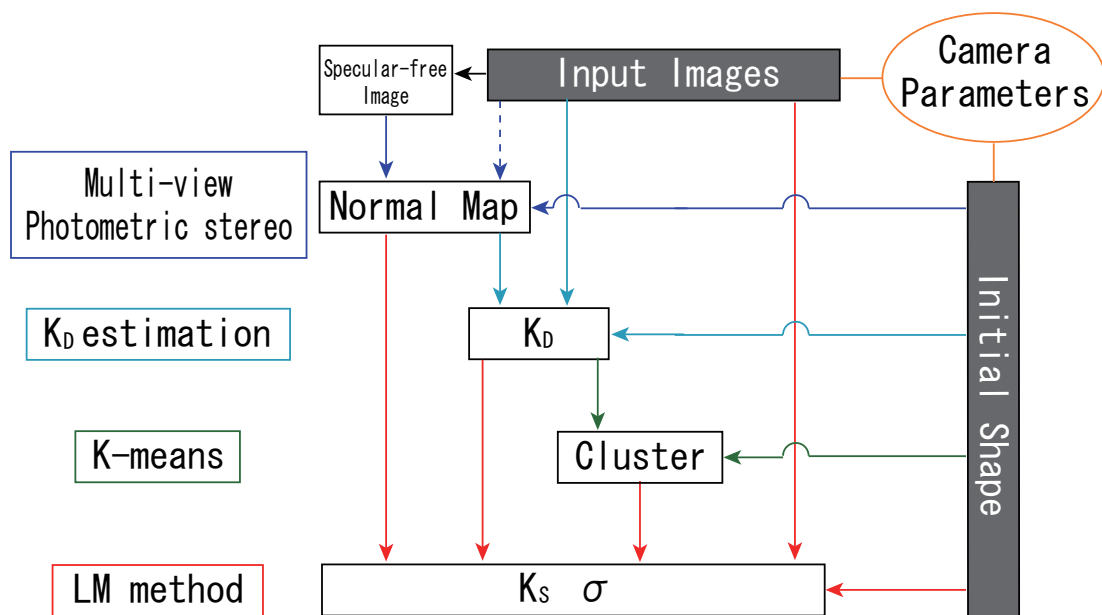


図 5.3: 提案手法における法線および反射パラメータの推定の流れ

### 5.3 実験

この節では提案手法を用いて対象物体の法線および反射パラメータを求め、推定結果からレンダリング画像を生成する実験について、その概要と結果を示す。

まずシミュレーション実験として、4.4 節でも対象物体として用いた物体 2 について本手法を適用した。入力 は 4.4 節での実験と同じく図 4.8 に示したような 16 枚の入力画像と幾何形状である。本手法によって推定した結果を図 5.4 に示す。(a) は推定された法線および反射パラメータを用いてレンダリングした画像とその一部の拡大図で、この視点からの画像は入力画像列中には存在しない。(b) はシミュレーションによって求められた真値の画像である。(c) は (a) と (b) の差分画像であり、この結果からも非常に精度良く推定がおこなわれていることがわかる。(d) は拡散反射パラメータを可視化した画像である。拡散反射パラメータがほぼ全ての場所で均一に求められていることから、(a) における凹凸の表現は反射率によるものではなく、法線によって細かな凹凸が表現されていることがわかる。また、求められた拡散反射パラメータの平均値は (0.3028, 0.4027, 0.1528) となっており、真値 (0.3, 0.4, 0.15) と比べて誤差は 1 % 前後で非常に精度良く求めることができた。

またシミュレーション実験として、図 4.15 における  $\sigma = 0.3$  に対して本手法を適用した。このように鏡面反射成分が広い範囲に存在する場合、4.3.3 節で述べたパラメータ推定手法では、鏡面反射成分の影響により正確な推定が不可能であった。本手法による結果を図 5.5 に示す。(a) は入力画像、(b) は本手法によって得られた法線および反射パラメータを用いてレンダリングをおこなった結果の画像、(c) は 4.3.3 節で述べた従来手法による結果の画像で

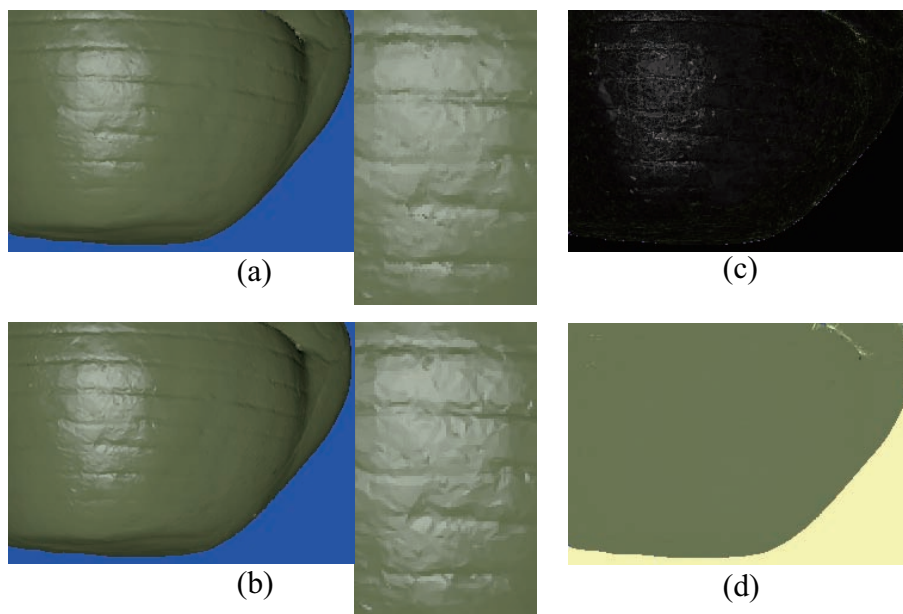


図 5.4: 物体 2 の推定結果

(a) : 推定結果のレンダリング画像, (b) : 真値の画像, (c) : 真値との差分, (d) : 拡散反射パラメータ画像

拡散反射パラメータはほぼ均一に正しく求められていることから, 表面の凹凸は推定された法線によって表現されていることがわかる.

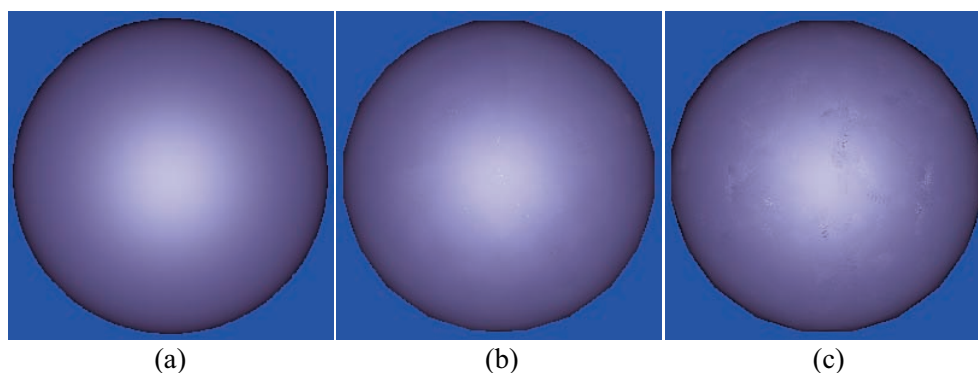


図 5.5: 鏡面反射成分が広い範囲で観測される場合の推定結果

(a) : 入力画像, (b) : 本手法による結果, (c) 4.3.3 節で述べた従来手法による結果

ある.

本手法を用いることによって鏡面反射成分が広い範囲で観測されるような場合であっても, 正確に法線および反射パラメータを推定することができた. これは specular-free 画像を用いることで, 鏡面反射成分の有無に依存せず, 正確に法線を求めることができるためであると考えられる.

次に実物体を用いた実験について述べる. 実験において入力データは 4.4 節の実物体によ

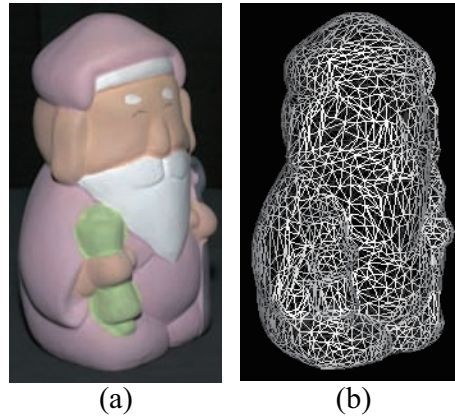


図 5.6: 物体 A の入力データ  
 (a) : 入力画像のうちの 1 枚 , (b) : 入力の幾何形状

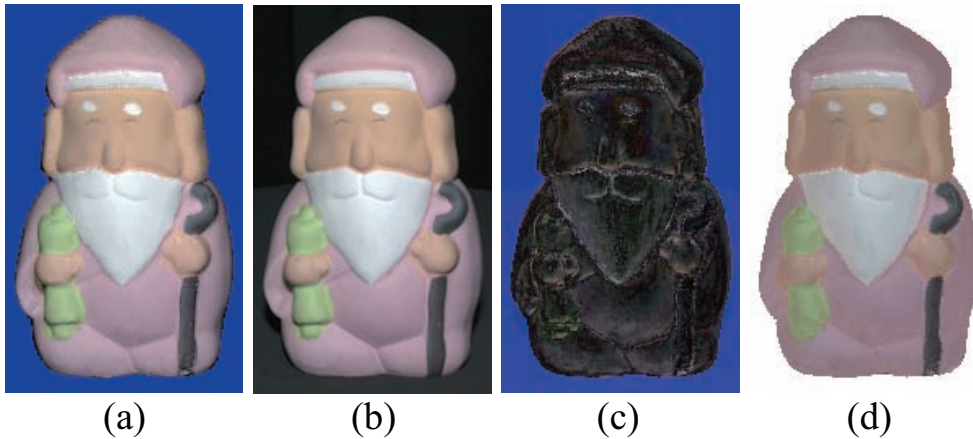


図 5.7: 物体 A の推定結果  
 (a) : 推定された反射パラメータでのレンダリング画像 , (b) : 真値の画像 , (c) : 真値との差分 , (d) : 拡散反射パラメータ画像

る実験の際に述べたように , レーザレンジセンサとカメラを固定し , 光源としてカメラのフラッシュを用いて計測をおこなうことによって取得した .

まず物体 A として拡散反射物体についての実験について示す . 入力画像は図 5.6(a) に示すような 18 枚 , 入力の幾何形状は図 5.6(b) に示すような 5000 の面からなるポリゴンメッシュモデルとした . 1 つの三角パッチを 121 の微小領域に分割し , それぞれの面ごとに法線および拡散反射パラメータを推定した . 図 5.7 にその結果を示す . (a) が推定された反射パラメータでのレンダリング画像 , (b) が真値の画像 , (c) が真値との差分 , (d) が拡散反射パラメータを可視化した拡散反射パラメータ画像である . 推定された反射パラメータによるレンダリング画像は真値の画像に非常に似ている .

次に物体 B として鏡面反射成分を含む物体についての実験を示す . 図 5.8(a) に入力画像列

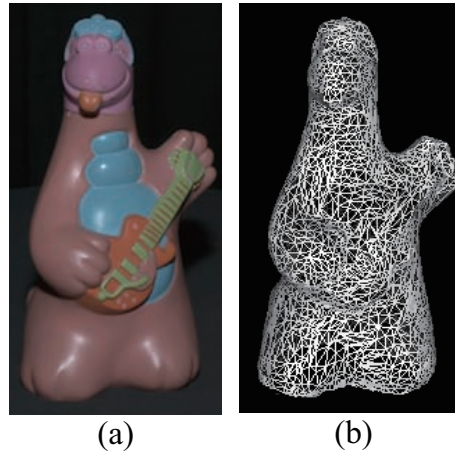


図 5.8: 物体 B の入力データ

(a) : 入力画像のうちの 1 枚 , (b) : 入力の幾何形状

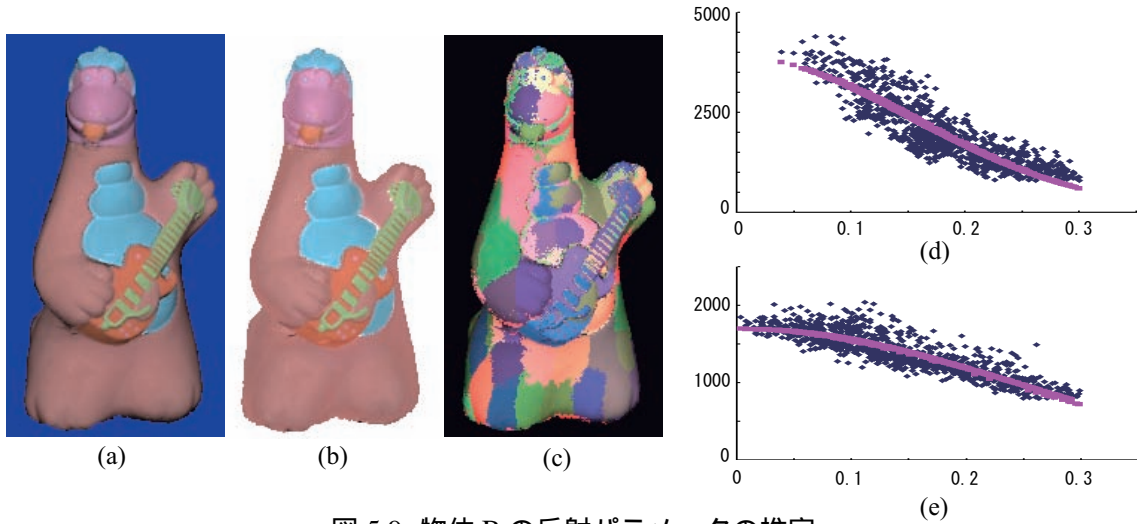


図 5.9: 物体 B の反射パラメータの推定

(a) : 拡散反射成分画像 , (b) : 拡散反射パラメータ画像 , (c) : クラスタリング結果 , (d)(e) : 鏡面反射パラメータの推定

18 枚の中の 1 枚を , 図 5.8(b) に入力の幾何形状を示した . 同様に法線および拡散反射パラメータを推定した結果を図 5.9(a) に示す . (b) は拡散反射パラメータ画像 , (c) は位置と拡散反射パラメータの値に応じて K-means クラスタリングした結果である . 色分けされている部分がそれぞれ鏡面反射パラメータを均一と見なす拡張領域である . これらの領域ごとに式 (5.2) を最小化するように鏡面反射パラメータの推定をおこなった . 図 5.9(d) および (e) に , 縦軸に鏡面反射成分の輝度 , 横軸に Torrance-Sparrow モデルにおける  $\alpha$  (光源方向と視線方向を二等分するベクトルと法線ベクトルのなす角) とした時の , サンプルデータ点を , 推定された鏡面反射パラメータによる推定点を で表す .

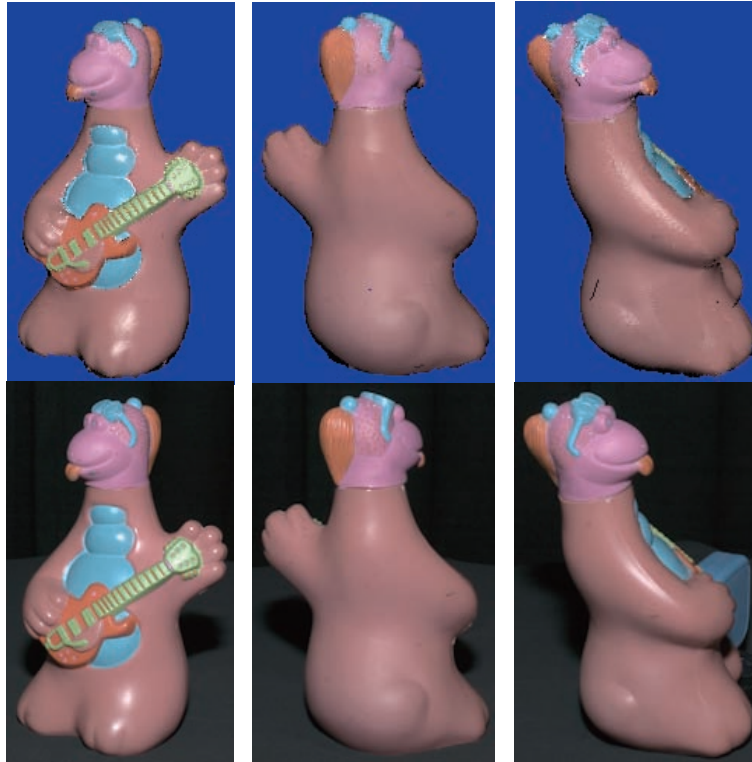


図 5.10: 推定結果によるレンダリングと真値との比較 (物体 B)  
 上段：推定結果のレンダリング画像，下段：真値の画像

次に推定された法線および反射パラメータを用いてレンダリングした画像と、実際に同じ視点からカメラで撮影した真値の画像とを比較したものを図 5.10 に示す。鏡面反射成分も含めて、真値の画像とよく似たレンダリング画像を生成することができている。

さらに法線の推定効果についての結果を図 5.11 に示す。(a) はカメラで撮影した画像である。(b)~(d) は法線と均一な拡散反射パラメータによりレンダリングをおこなった画像である。つまり、形状および法線の影響を可視化した画像であると言える。(b) は 5000 ポリゴンの面と推定された法線，(c) は 5000 ポリゴンの面と初期形状のままの法線，(d) は 50000 ポリゴンの面とその法線による結果である。初期形状の法線や面の数とその 10 倍である高精度な形状と比較して、推定された法線は細かな凹凸や滑らかな曲面まで表現することができる。

また (d) の結果から、レーザレンジセンサの解像度を上げてデータを取得しても、誤差の影響などから形状データだけでは十分な結果が得られない場合があることがわかる。

次に 4.4 節の実験では十分な推定ができず、まばらな誤差が目立っていた物体 3 について、4.4 節の実験と同じ入力 (図 4.10) を用いて推定をおこなった。その結果を図 5.12 に示す。(a) は推定結果によるレンダリング画像，(b) は真値の画像，(c) は別の視点でのレンダリング画



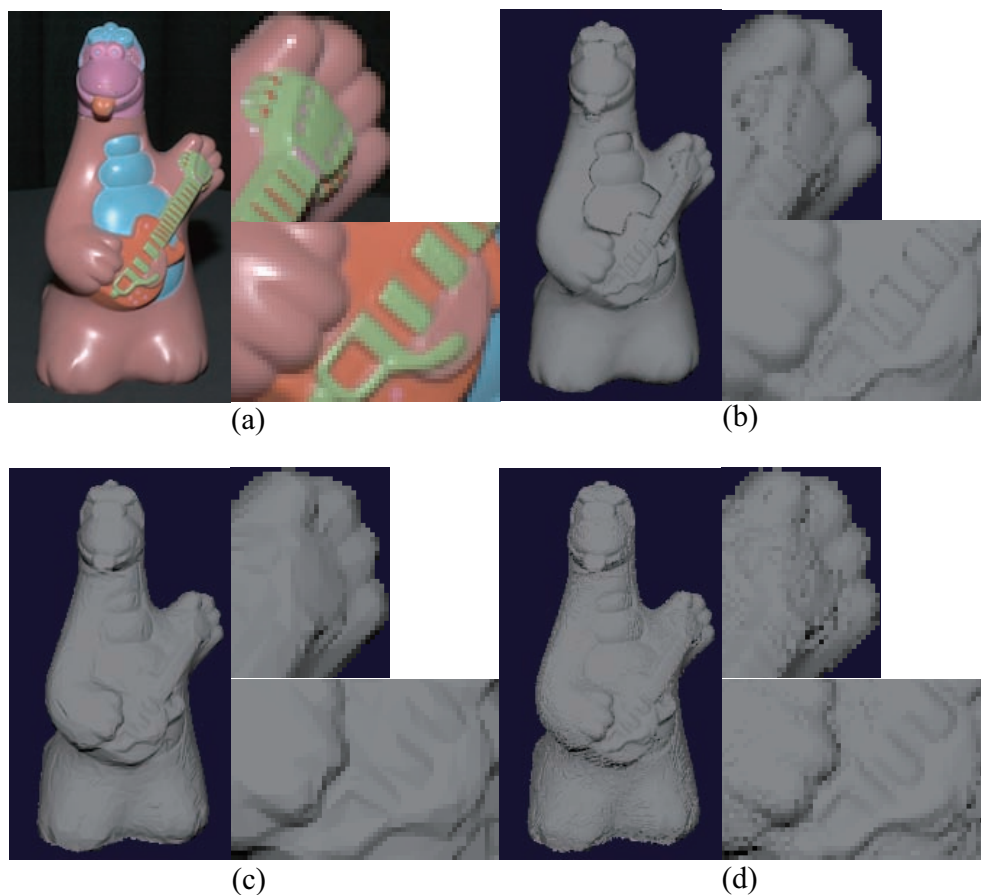


図 5.11: 法線の推定効果

(a) : カメラで撮影した画像 , (b) ~ (d) : 均一な拡散反射パラメータによるレンダリング画像 , (b) : 推定された法線 , (c) : 入力幾何形状 (5000 ポリゴン) の法線 , (d) : 5 万ポリゴンの法線

入力幾何形状や、その 10 倍の解像度の形状モデルによる法線と比べて、推定された法線は細かな凹凸や滑らかな曲面まで表現することができる。

像 , (d) は (c) の真値の画像 , (e) は拡散反射パラメータを可視化した図である。鏡面反射成分が正しく推定されていない箇所も多少あるが、かなり正確に推定ができています。また (e) より、顔のモデルの目の周りなどの凹部では拡散反射パラメータが大きな値として推定されている。物体 3 は材質としては均一な材質で作られているため、このような大きな拡散反射パラメータが推定されるのは、相互反射による影響であると考えられる。

さらに対象物体として細かなテクスチャを有する物体 C、および比較的大きな物体として、およそ 1.6m×2.0m×2.7m の奈良県明日香村にある高松塚古墳の石室のモデル (物体 D) を扱った結果を図 5.13、5.14 に示す。

細かなテクスチャのある場合でも入力画像と同程度にテクスチャを表現することができています。またある程度大きな物体であっても本手法によって同様に法線および反射パラメータ

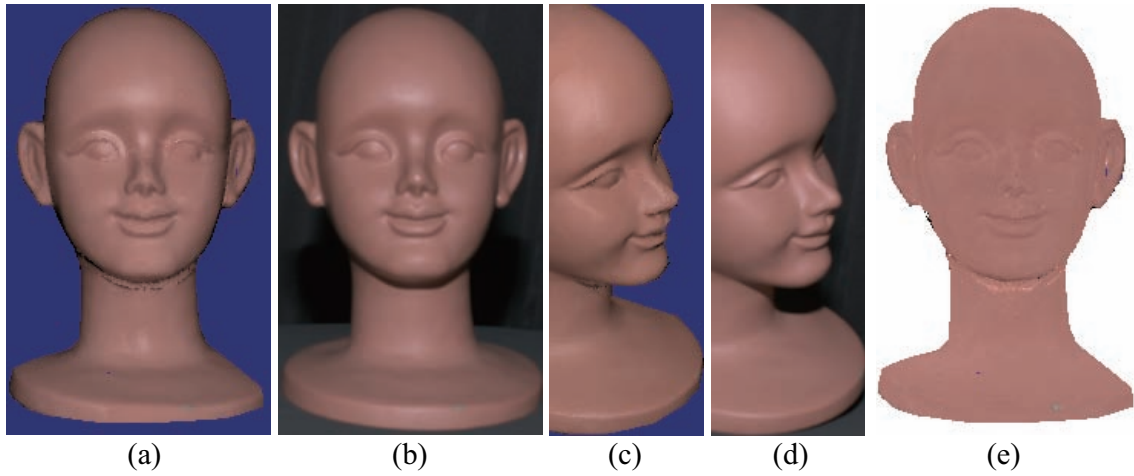


図 5.12: 物体 3 の推定結果

(a) : 推定結果のレンダリング画像, (b) : 真値の画像, (c) : 別の視点でのレンダリング画像, (d) : (c) の真値の画像, (e) : 拡散反射パラメータ画像

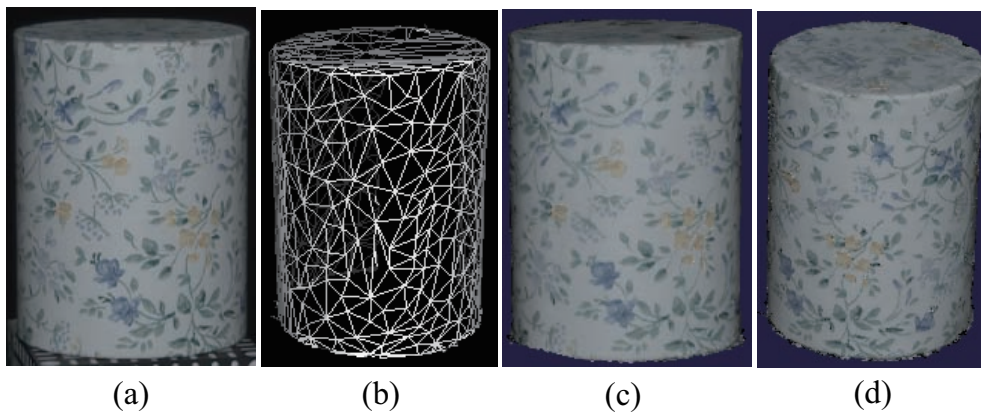


図 5.13: 物体 C の推定

(a) : 入力画像のうちの 1 枚, (b) : 入力幾何形状, (c) : 推定結果のレンダリング画像, (d) : 別視点でのレンダリング画像

を推定することができた。

## 5.4 考察

実験によって、4章の手法だけでは精度良く推定ができなかった実物体を対象とした場合であっても、本手法を用いることで、正確かつロバストに反射パラメータを推定できることが示された。さらに、複雑なテクスチャのある物体や、比較的大きな物体であっても本手法によって、反射パラメータの推定が可能であることがわかった。

本手法の特徴として正確性とロバスト性があげられる。ここでは4章で提案した多視点

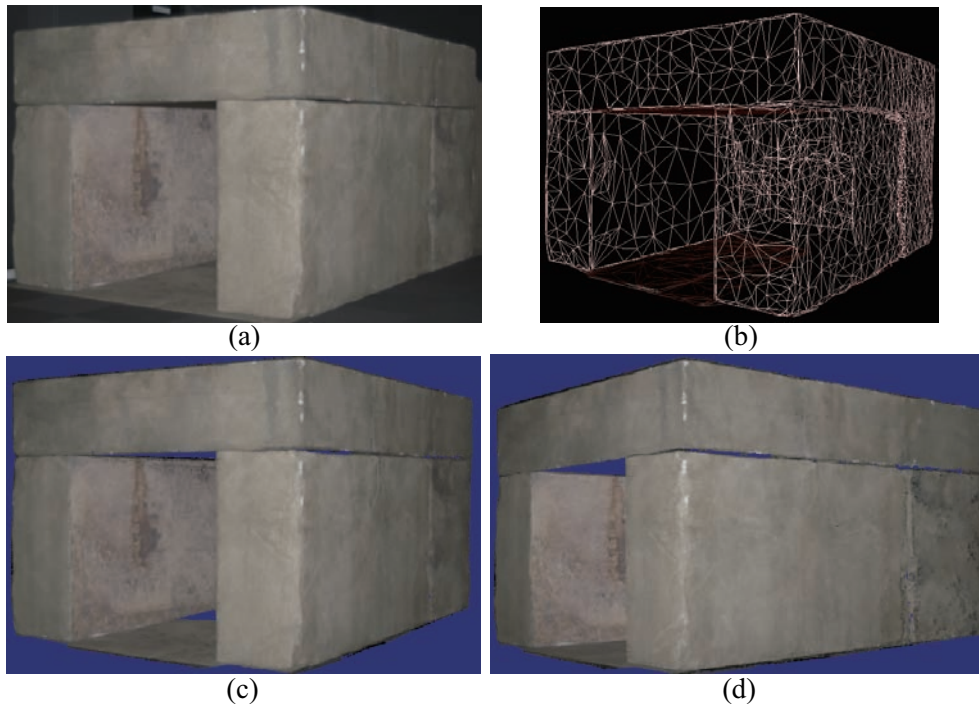


図 5.14: 物体 D の推定

(a) : 入力画像のうちの 1 枚, (b) : 入力幾何形状, (c) : 推定結果のレンダリング画像, (d) : 別視点でのレンダリング画像

Photometric stereo 法と, 本章で提案したロバストな反射パラメータ推定手法における正確性とロバスト性について考察する.

正確に推定をおこなうことができる理由は 3 つある. 1 つ目は, 密な法線マップを推定している点である. 密に法線を推定することによって, 物体の細部にわたる凹凸まで表現することが可能である. またその一方で, 法線が密であるため, 形状に関しては疎なポリゴンメッシュモデルを入力として用いても, 正確な見えを再現することができる.

2 つ目は, 反射パラメータを局所的に推定している点である. 拡散反射パラメータについては, 法線を定義した微小領域ごとに推定することで, 複雑なテクスチャを有する物体についても正確に推定をおこなうことができた. 鏡面反射パラメータについては, 位置が近く拡散反射パラメータが等しい微小領域間でパラメータが均一であると見なすことによって, 局所的な領域ごとに鏡面反射パラメータを求めた.

3 つ目は, 物体表面において微小領域ごとに, 光源の方向および逆二乗則を考慮して推定をおこなっている点である. 入力として形状データをあたえることによって, それぞれの微小領域と光源との位置関係を得ることができる. そのため従来の Photometric stereo では正確に推定できなかった近接光源を扱う場合であっても, 本手法を用いることによって正確に推定をおこなうことができる.



ロバストに推定をおこなうことができる理由は2つある．1つ目は，法線の推定において Specular-free 画像を用いている点である．Specular-free 画像は単一の画像から生成することができ，陰影情報を保持したまま，鏡面反射成分を除去することができる．そのため，広い範囲で鏡面反射成分が観測され，拡散反射成分のみが観測されるピクセルを探すことが困難である場合であっても，Specular-free 画像を用いて鏡面反射成分を除去することによって，ロバストに推定をおこなうことができる．

2つ目は，法線や拡散反射パラメータの推定において解の候補となるベクトルが複数存在する場合に，外れ値を取り除いて解ベクトルを決定している点である．複数の解候補ベクトルに対して，それぞれの類似度を計算することによって，モデルと実物の形状の差異や計測誤差などによるノイズのために，誤って推定されたベクトルを除去することができる．

## 第6章 結論

## 6.1 まとめ

本論文において筆者は、二色性反射モデルに基づき反射の解析をおこなった。3章では単一の画像から高速に反射成分を分離する手法を提案した。4章ではポリゴンメッシュモデルを利用することで、光源の向きおよび逆二乗則を考慮した多視点 Photometric stereo により正確な法線および反射パラメータを推定する手法を提案した。5章では、4章の手法を一般的な実物体に適用するために、鏡面反射成分の有無や反射特性の複雑さに依存しないロバストな法線および反射パラメータ推定手法を提案した。またこれらの手法を用いて実験および評価をおこなった。

高速反射成分分離手法は、偏光板や複数の画像を用いず、一様な光源下で撮影された単一の画像だけを用いて、RGB 色空間から hue, saturation, intensity の空間へ線形に変換し、光源色と鏡面反射成分が同じであること (NIR 仮定) を利用して、鏡面反射成分の分離をおこなった。このとき一つの hue には一つの surface color しかないことを仮定することで、縦軸を intensity, 横軸を saturation とした hue を一定とする平面上において、最小二乗法を用いた直線近似によって反射成分の分離をおこなえるため、従来法に比べ非常に高速に処理を可能にした。

本手法は撮影時に特別な装置を用いたり、特別な処理をしていなくても、単一の画像データだけから鏡面反射成分を分離することができるため、既存の画像に対しても適用できるといった利点がある。一つの hue に複数の surface color が存在する場合には、拡散反射率まで変化してしまうという問題点があるものの、高速に鏡面反射成分を除去できるため、2次元画像を扱うアプリケーションへの様々な応用が期待される。

多視点 Photometric stereo による正確な法線および反射パラメータ推定手法は、幾何データの取得の際にはそれぞれの計測方法の長所を生かし、距離データをレーザレンジセンサ、法線データを Photometric stereo 法によって求める。このとき光源の向きや逆二乗則を考慮することで、より正確な法線および反射パラメータの推定をおこなうことができる。また正確な法線データを取得することによって、疎な形状データであっても十分に形状を表現することができる。

提案手法の評価として、反射パラメータが均一であるという仮定の下で実験をおこない、シミュレーション実験では、本手法によって非常に精度良く反射パラメータの推定がおこなわれること、入力として与える初期幾何形状が疎な形状データであっても推定精度やレンダリング結果の画像に影響がないことを確認した。

しかし実物体を扱う場合は、相互反射やノイズなどの影響により、反射パラメータが均一であると見なせそうな場合であっても、均一として推定をおこなうことが難しいことがわかった。また、物体表面が粗く鏡面反射成分が広がって観測される場合は、注目しているピ

クセルに鏡面反射成分が含まれているかどうかを見分けることが難しいため、鏡面反射成分やノイズの影響を受けにくいロバストな手法が必要となった。

そこで筆者らは、5章において、これらの問題点を踏まえてロバストに推定をおこなう手法を提案した。鏡面反射成分の有無によらず正確な推定をおこなうために、法線の推定には specular-free 画像を用いた。また物体表面上に定義した微小領域のそれぞれにおいて拡散反射パラメータの推定をおこなった。法線や拡散反射パラメータの色ベクトルの推定の際には複数の解候補ベクトルの中からロバストに最適な解ベクトルを推定した。鏡面反射パラメータの推定では、クラスタリングをおこなうことで鏡面反射成分が観測されにくい部分を補い、反射パラメータの局所的な変化にも対応した。

実験によって、本手法が4章では推定精度良く推定できなかった物体に対しても、法線および反射パラメータを正確かつロバストに推定することができることを確認した。また複数の色を持つ物体や複雑なテクスチャを持つ物体、比較的大きな物体に対しても提案手法が有効であることが示された。

4章と5章をまとめると本手法は以下のような特徴がある。

- 形状と法線を分けて考え、それぞれについて最適な方法によりデータを正確に取得する。
- 形状を介することで Photometric stereo を多視点に拡張し、光源の向きや逆二乗則を考慮して、より正確な推定をおこなう。
- 正確な法線マップを推定することにより、初期の形状データが粗い場合でも精度良く推定ができ、ポリゴンメッシュモデルのデータを削減できる。
- 二色性反射モデルに基づき反射成分を分けて考えることで、正確に反射パラメータの推定をおこなう。
- Specular-free 画像を多視点 Photometric stereo 法の入力とすることで、鏡面反射成分の広がり具合やその有無、相互反射の specular-specular 成分によらず正確に法線を求めることができる。
- 法線や拡散反射パラメータを求める際に、複数の解候補の中から外れ値を取り除いて最適な解を得る。

このように、本手法は正確かつロバストに反射パラメータを推定することができる。

## 6.2 今後の展望

今後の展望として以下のようなことが考えられる。

まず初めに取り組みたいことは、相互反射の考慮である。本論文では相互反射は無視できるものとして推定をおこなった。しかし、図 5.12(e) の結果などから、凹物体では相互反射の影響が少なからず見られ、より正確な推定をおこなうためには無視することができないと考えられる。そのため少なくとも 2 次的な相互反射までは考慮したモデルが必要である。

また、今後は光源環境が複雑な場合や未知の場合についても考慮したいと考えている。本稿では光源分布は既知として手法を構築し、実験においても一様な光源や、暗室でカメラのフラッシュのみを光源とした理想的な光源環境下で推定をおこなった。しかし実用の面から考えると、このような理想的な光源環境下で計測できることは少なく、一般的な照明下や屋外でも推定をおこなえるような手法へと改良していくことを考えている。

さらに対象物体については、完全な金属物体や二色性反射モデルに従わない物体を扱うことを考えている。4 章、5 章では法線データを推定するために、拡散反射成分から Photometric stereo の原理によって法線を推定した。しかし、完全な金属物体の反射は一般的に鏡面反射成分のみで拡散反射成分が存在しないため、本手法によって法線を求めることができない。また鏡面反射成分が強い場合、レーザレンジセンサを用いて計測することも難しい。よって鏡面反射成分だけを解析することによって金属の形状および反射特性を推定する手法が必要である。

# 付録A

## A.1 カメラパラメータ

カメラパラメータは位置，姿勢，焦点距離，画像中心などのカメラに関するデータである．カメラパラメータは外部パラメータと内部パラメータにより構成されており，以下のようなパラメータが存在する [37] ．

外部パラメータ

- 外部の世界座標に対するレンズの中心座標 (平行移動ベクトル)
- 世界座標に対するレンズの光軸方向 (回転行列)

内部パラメータ

- 焦点距離
- 画像中心座標
- 画素サイズ
- レンズのひずみ係数

外部パラメータとは対象物体とカメラの位置関係を表すパラメータであり，内部パラメータとは各カメラごとに設定するカメラ固有のパラメータである．

カメラシステムには，三次元空間上で対象物体が定義されている座標 (世界座標) と，カメラ視点ごとに三次元空間が定義されるカメラ座標，および二次元画像が投影される画像座標がある．図 A.1 にこれら 3 つの座標の関係を示す．世界座標  $O_W$  における点 P の座標を  $(x_w, y_w, z_w)$ ，カメラ座標  $O_C$  における点 P の座標を  $(x_c, y_c, z_c)$  と表す．ただし  $O_C$  はレンズ中心を表し， $z_C$  軸はレンズの光軸に一致するように設定する．

次に  $x_C y_C$  平面に平行で  $z$  座標が  $f$  の位置に画像中心が  $O_i$ ，座標軸が  $XY$  の画像平面を考える．理想的なピンホールカメラの場合には，点 P の座標  $(x_c, y_c, z_c)$  は画像平面上において  $(X_u, Y_u)$  と表されるが，レンズの幾何学的なひずみにより実際の画像平面上では  $(X_d, Y_d)$  の位置に対応するものとする．

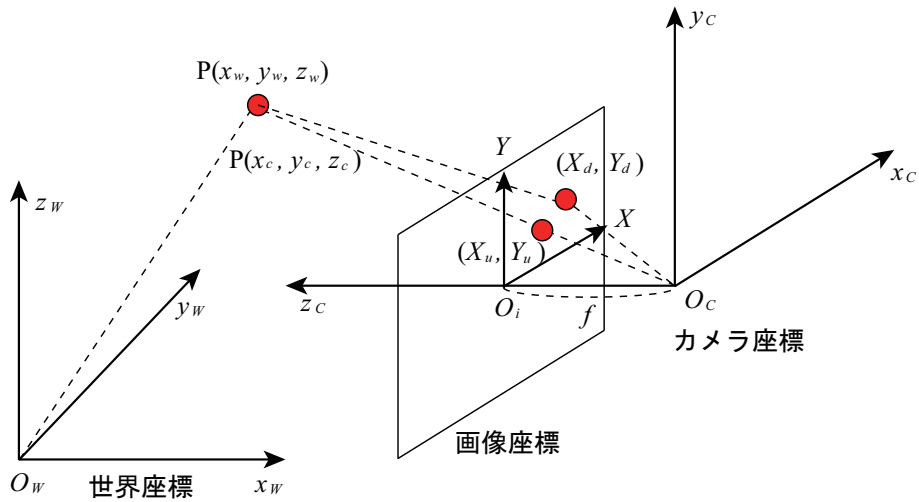


図 A.1: 世界座標と画像座標の関係

点 P の世界座標  $(x_w, y_w, z_w)$  とその点の画像座標  $(X_d, Y_d)$  の関係は以下のようにして導かれる。まず  $(x_w, y_w, z_w)$  から  $(x_c, y_c, z_c)$  への変換は、回転行列  $\mathbf{R}$  と平行移動ベクトル  $t$  を用いて次式で表される。

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & t \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix}$$

次に透視変換による  $(x_c, y_c, z_c)$  から  $(X_u, Y_u)$  への変換は、焦点距離  $f$  を用いて以下のように表される。

$$X_u = f \frac{x_c}{z_c}$$

$$Y_u = f \frac{y_c}{z_c}$$

さらに  $(X_u, Y_u)$  から  $(X_d, Y_d)$  への変換は次の通りである。

$$X_d + D_x = X_u$$

$$Y_d + D_y = Y_u$$

ただし、 $D_x, D_y$  はレンズの半径方向のひずみ係数  $\kappa_1, \kappa_2$  を用いて次のように表す。

$$D_x = X_d(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4)$$

$$D_y = Y_d(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4)$$

$$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2}$$

以上のように，点 P の世界座標  $(x_w, y_w, z_w)$  とその点の画像座標  $(X_d, Y_d)$  を関係付けることができる．

本論文の 4 章および 5 章の多視点 Photometric stereo では，ポリゴンメッシュモデルはレーザレンジセンサの座標系で表されているが，これを世界座標と見なし，カメラで取得した画像座標系での画像位置と関係付けることによって，物体表面上の点が画像内のどの位置に対応するかを求める．

## A.2 Specular-free 画像

ここでは specular-free 画像の生成方法について説明し，specular-free 画像が鏡面反射成分を含まず，かつ陰影情報を保存することを証明する．

Specular-free 画像は光源色が既知であれば単一の入力画像からピクセル単位で計算して求めることができる．ただし，specular-free 画像を生成するためには入力画像が次の条件を満たす必要がある．

- 光源色は一色であること
- 光源色と同じ色相 (hue) の拡散反射成分が存在しないこと

これらの条件を満たすとして，3 章の 3.2.2 節で示した色空間を用いて specular-free 画像の生成方法を説明する．

白色板を計測した単位色ベクトルを  $(l_r \ l_g \ l_b)$ ，光源色の大きさを  $E$  とすると，光源色は  $E(l_r \ l_g \ l_b)$  と表される．また対象となる物体のピクセルの輝度値  $I$  は二色性反射モデルに基づいて以下のように表すことができる．

$$\mathbf{I} = E \begin{pmatrix} l_r \alpha_r \\ l_g \alpha_g \\ l_b \alpha_b \end{pmatrix} \cos \theta + s E \begin{pmatrix} l_r \\ l_g \\ l_b \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

ただし拡散反射成分の反射率を  $\alpha_r, \alpha_g, \alpha_b$  とし，鏡面反射成分は NIR 仮定に基づくとして光源の単位色ベクトルと鏡面反射成分の反射率  $s$  によって表した．また  $\cos \theta$  は Lambertian の陰影を表し  $\theta$  は光源方向ベクトルと法線ベクトルのなす角である．

まず，3.2.2 節の色空間に射影するために，3.2.3 節で示したように光源の色ベクトルによって光源を白色に正規化した場合の色  $\mathbf{I}'$  を考えると，式 (A.1) は次のように表される．

$$\mathbf{I}' = \begin{pmatrix} \alpha_r \\ \alpha_g \\ \alpha_b \end{pmatrix} \cos \theta + s \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$



ここで式 (A.2) を 3.2.2 節の色空間に射影すると，

$$\begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix} \mathbf{I}' = \begin{pmatrix} (\alpha_r - \frac{1}{2}\alpha_g - \frac{1}{2}\alpha_b) \cos \theta \\ (\frac{\sqrt{3}}{2}\alpha_g - \frac{\sqrt{3}}{2}\alpha_b) \cos \theta \\ s + (\frac{1}{3}\alpha_r + \frac{1}{3}\alpha_g + \frac{1}{3}\alpha_b) \cos \theta \end{pmatrix}$$

Specular-free 画像はこの色空間において次のように表すことができる．

$$\begin{pmatrix} m'_1 \\ m'_2 \\ m'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ a\sqrt{m_1^2 + m_2^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\alpha_r - \frac{1}{2}\alpha_g - \frac{1}{2}\alpha_b) \cos \theta \\ (\frac{\sqrt{3}}{2}\alpha_g - \frac{\sqrt{3}}{2}\alpha_b) \cos \theta \\ \frac{a}{\sqrt{2}}\sqrt{(\alpha_r - \alpha_g)^2 + (\alpha_g - \alpha_b)^2 + (\alpha_b - \alpha_r)^2} \cos \theta \end{pmatrix}$$

ただし  $a$  は任意の定数である．さらにこの結果の specular-free 画像を RGB 色空間に射影しなおすと，その各成分  $(r' \ g' \ b')^T$  は次の式で表される．

$$\begin{pmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3}\alpha_r - \frac{1}{3}\alpha_g - \frac{1}{3}\alpha_b + \frac{a}{\sqrt{2}}\sqrt{(\alpha_r - \alpha_g)^2 + (\alpha_g - \alpha_b)^2 + (\alpha_b - \alpha_r)^2} \\ -\frac{1}{3}\alpha_r + \frac{2}{3}\alpha_g - \frac{1}{3}\alpha_b + \frac{a}{\sqrt{2}}\sqrt{(\alpha_r - \alpha_g)^2 + (\alpha_g - \alpha_b)^2 + (\alpha_b - \alpha_r)^2} \\ -\frac{1}{3}\alpha_r - \frac{1}{3}\alpha_g + \frac{2}{3}\alpha_b + \frac{a}{\sqrt{2}}\sqrt{(\alpha_r - \alpha_g)^2 + (\alpha_g - \alpha_b)^2 + (\alpha_b - \alpha_r)^2} \end{pmatrix} \cos \theta \quad (\text{A.3})$$

式 (A.3) は鏡面反射成分の大きさ  $s$  には無関係であり，また  $\cos \theta$  が各成分に共通して乗算されている．式 (A.2) に対応させて考えると， $s = 0$  かつ  $\alpha_r = \frac{2}{3}\alpha_r - \frac{1}{3}\alpha_g - \frac{1}{3}\alpha_b + \frac{a}{\sqrt{2}}\sqrt{(\alpha_r - \alpha_g)^2 + (\alpha_g - \alpha_b)^2 + (\alpha_b - \alpha_r)^2}$  と拡散反射成分の反射率のみが変化したものであると考えることができる．つまり specular-free 画像は鏡面反射成分が存在せず，陰影情報が保存されていることを示している．

次に 3 章の拡散反射成分画像と specular-free 画像との違いについて説明する．言うまでも無く拡散反射成分画像は物体の拡散反射成分のみを正しく表した画像であり，一方 specular-free 画像は異なる拡散反射パラメータを用いて拡散反射成分を表した画像である．3.2.2 節の色空間で考えると，hue が一定で saturation を横軸，intensity を縦軸とした平面上において，拡散反射成分を表すピクセルは図 A.2(a) に示すように比例直線上に分布する．一方 specular-free 画像は直線の傾きを任意の値とした画像である (図 A.2(b))．ただし specular-free 画像における直線の傾きは式 (A.3) などにおける  $a$  で表される．

3 章の高速反射成分分離手法では，サンプルデータピクセルから最小二乗法を用いて正確な拡散反射パラメータとなる傾き  $a$  を求めている．一方 specular-free 画像は傾き  $a$  を任意に設定して作成することができるため，高速反射成分分離手法よりもさらに高速にピクセル単位で処理をおこなうことができるが，拡散反射パラメータは正確でないため，拡散反射成分の色が変化してしまう．しかし，5.2.1 節では法線を求めることが目的であるため，陰影が保存されていさえすれば，拡散反射成分の色が変化していても問題は無い．そのため入力として拡散反射成分画像ではなく specular-free 画像で十分であると考えられる．

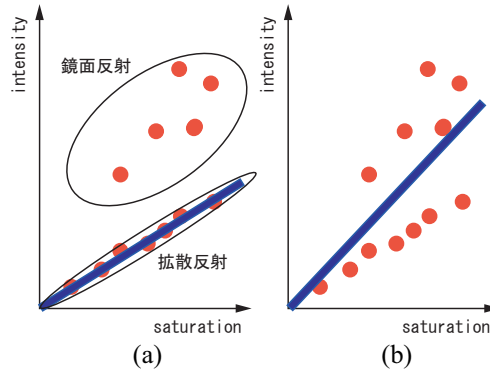


図 A.2: Specular-free 画像の生成  
 (a) : 拡散反射成分画像の生成 (3 章) , (b) : Specular-free 画像の生成

このように specular-free 画像は本手法の入力画像として非常に有益である．ただし拡散反射成分の色相 (hue) が光源の色相と等しい場合，色空間に射影されたデータ点は intensity を表す縦軸上に分布してしまい，直線の傾きは非常に不安定になる．そのため specular-free 画像を定義することが不可能である．そこで本論文の 5.2.1 節では specular-free 画像を定義できない場合には，入力画像をそのまま入力として用いて，鏡面反射成分が観測されやすいと考えられる場合を入力から取り除いた上で法線の推定をおこない，法線ベクトルの解候補から 5.2.2 節で述べた方法によって，外れ値を取り除くことで最適な解ベクトルを決定する．

### A.3 相互反射の種類

本論文では相互反射は考慮しないものとしているが，実際には光源からの光が物体表面で反射し，その反射光が再び物体表面で 2 次反射，3 次反射と相互に影響を及ぼしながら反射を起こす場合がある．このような反射を相互反射と言う．

相互反射は幾何学的にも複雑な反射をしているため，解析することが困難である．また，2 次以降の反射であるため，その明るさは直接の反射光に比べて小さく，その影響を無視して考える場合も多い．

相互反射の 3 次以降の反射を無視して 2 次的な反射のみを考え，二色性反射モデルに基づいてその反射方法に関して分類すると，図 A.3 の (a) ~ (d) に示すような 4 種類に分けて考えることができる．

光源  $I$  が面 A に入射し，その反射光が面 B に入射した後，2 次的な反射光として観測される場合を考える．それぞれの面において，拡散反射成分の反射率を  $K_{D,A}$  および  $K_{D,B}$ ，鏡面反射成分の反射率を  $K_{S,A}$  および  $K_{S,B}$  とし，面 A と面 B の距離を  $d_{AB}$ ，面 B と観測点の距離を  $d_{BV}$  とする．さらに鏡面反射成分は空間的に広がりのないものと仮定する．

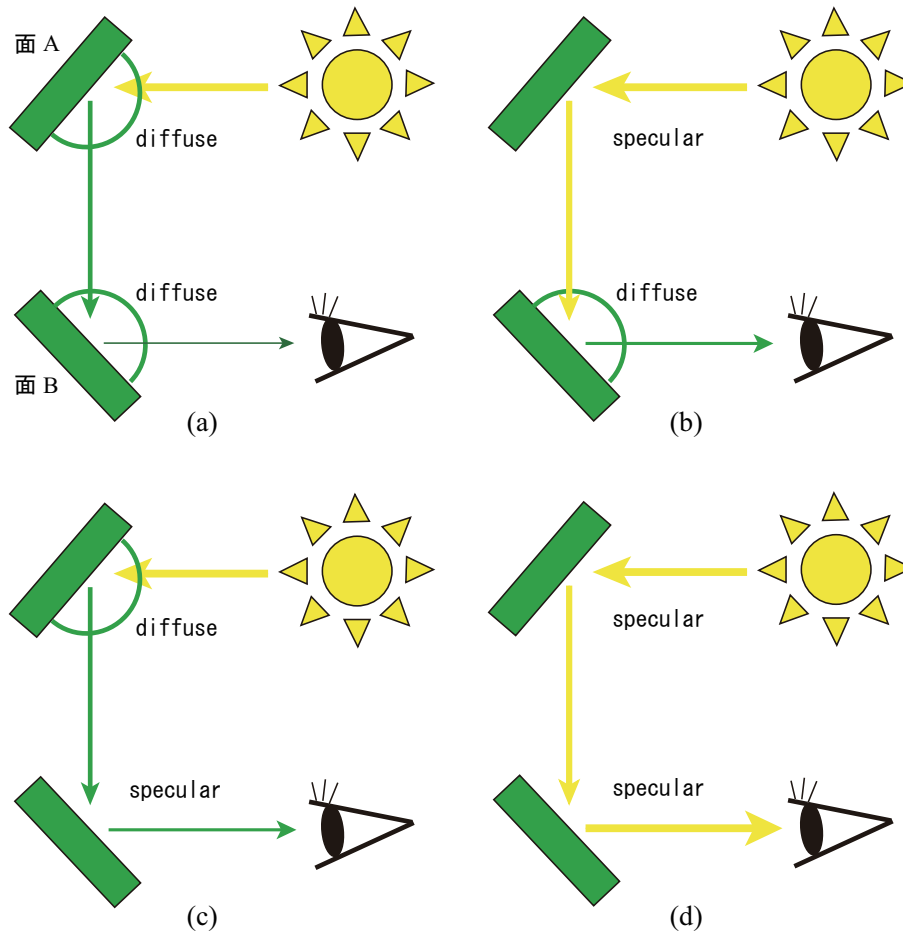


図 A.3: 相互反射の種類

(a) : Diffuse-diffuse 型 , (b) : Specular-diffuse 型 , (c) : Diffuse-specular 型 , (d) : Specular-specular 型

図 A.3(a) は面 A での反射光の拡散反射成分が面 B でも拡散反射成分として観測された場合で , diffuse-diffuse 型の相互反射である . その 2 次的な反射光の明るさ  $I_{dd}$  は

$$I_{dd} = I \frac{K_{D,A}}{d_{AB}^2} \frac{K_{D,B}}{d_{BV}^2}$$

(b) は面 A での反射光の鏡面反射成分が面 B で拡散反射成分として観測された場合で , specular-diffuse 型の相互反射である . その 2 次的な反射光の明るさ  $I_{sd}$  は

$$I_{sd} = I K_{S,A} \frac{K_{D,B}}{d_{BV}^2}$$

(c) と (d) も同様に diffuse-specular 型 , specular-specular 型の相互反射であり , その明るさ  $I_{ds} I_{ss}$  は

$$I_{ds} = I \frac{K_{D,A}}{d_{AB}^2} K_{S,B}$$

$$I_{ss} = I K_{S,A} K_{S,B}$$

と表せる．

またこれらの反射光の色について考えると，2.3 節で示したように拡散反射成分はその物体内部での吸収によって色が変わり，鏡面反射成分は入射光と同じ色となる．したがって  $I_{ss}$  は光源色と同じであるため，Specular-free 画像によってその影響を取り除くことができる．

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、素晴らしい研究環境と適切な助言・ご指導をいただいた池内克史教授に心から感謝いたします。会議や打ち合わせなどでお忙しい中でも、毎週のようにミーティングをしていただき、集中して研究に取り組むことができました。

共同研究者として研究開始当初からご指導頂いた宮崎大輔さんに深く感謝いたします。ご自身の研究でお忙しい中、新人研修や研究計画などを立てていただき、大変お世話になりました。

また同じグループとして共に研究に取り組んだ光学部屋の皆様に感謝いたします。いつも最初に相談に乗っていただいた川上玲さん、スペクトルなどの知識やプログラムについて教えてくださった猪狩壮文さん、3dsmax の使い方や授業の TA でもお世話になった角田哲也さん、研究や計測だけでなく日頃から興味深い話をしてくれた森本哲郎さん、いつも夜中まで共に研究に取り組んだ Lu Boun Vinh さん、イタリア計測では一緒に作業した大蔵苑子さん、向かいの席で何かと世話になった Zhao Hongxun さん、毎週のミーティングや光学勉強会では皆様と様々な有益な議論を交わすことができました。皆様のおかげで楽しくかつ有意義なメリハリのある研究生活を送ることができました。

高松淳さん、大石岳史さん、工藤俊亮さん、阪野貴彦さん、小野晋太郎さん、小川原光一さんには、異なるグループでありながらも、様々な助言・ご指導をいただきました。またご自身の研究だけでなく池内研スタッフとして裏から研究室を支えていただきました。深く感謝いたします。

また助教の影澤政隆さん、技術職員の長谷川仁則さん、秘書の元木恵子さん、松浦芳子さん、菊地薫さんには会議の運営や事務面からも力強く支えていただきました。深く感謝の意を述べさせていただきます。

同じ学年の仲間として共に助け合い励ましあった鎌倉真音さん、Masmei Ulinta Ginting さん、中尾一貴さんには大変お世話になりました。ありがとうございました。

この他にも当研究室の皆様には色々な面で助けていただきました。本当にありがとうございました。

そして最後に、研究生生活を精神的にも経済的にも支えてくれた家族と、ビタミン不足を補ってくれた地元愛媛県産みかんに心から感謝します。

2008年2月4日 肥後 智昭

## 参考文献

- [1] D. Goldman, B. Curless, A. Hertzmann, and S. Seitz. Shape and Spatially-Varying BRDFs from Photometric Stereo. *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, 1:341–348, 2005.
- [2] R. Basri, D. Jacobs, and I. Kemelmacher. Photometric Stereo with General, Unknown Lighting. *International Journal of Computer Vision*, 72(3):239–257, 2007.
- [3] M. Chandraker, S. Agarwal, and D. Kriegman. ShadowCuts: Photometric Stereo with Shadows. *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1–8, 2007.
- [4] W. MARTIN and J. AGGARWAL. Volumetric descriptions of objects from multiple views. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 5:150–158, 1983.
- [5] A. Laurentini. How far 3 D shapes can be understood from 2 D silhouettes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(2):188–195, 1995.
- [6] L. Wolff. Using polarization to separate reflection components. *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 363–369, 1989.
- [7] S. Nayar, X. Fang, and T. Boult. Separation of Reflection Components Using Color and Polarization. *International Journal of Computer Vision*, 21(3):163–186, 1997.
- [8] T. Shibata, T. Takahashi, D. Miyazaki, Y. Sato, and K. Ikeuchi. Creating photorealistic virtual model with polarization-based vision system. *Proceedings of SPIE*, 5888:588804, 2005.
- [9] D. Miyazaki, M. Kagesawa, and K. Ikeuchi. Transparent surface modeling from a pair of polarization images. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(1):73–82, 2004.
- [10] R. Swaminathan, S. Kang, R. Szeliski, A. Criminisi, and S. Nayar. On the motion and appearance of specularities in image sequences. *Proceedings of European Conference on Computer Vision*, 1:508–523, 2002.

- [11] Y. Sato and K. Ikeuchi. Temporal-color space analysis of reflection. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 11(11):2990–3002, 1994.
- [12] S. Lin and H. Shum. Separation of diffuse and specular reflection in color images. *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, 1:341–346, 2001.
- [13] Y. Mukaigawa, Y. Ishii, and T. Shakunaga. Analysis of photometric factors based on photometric linearization. *Journal of the Optical Society of America A*, 24(10):3326–3334, 2007.
- [14] S. Shafer. Using Color to Separate Reflection Components. *COLOR Research and Application*, 10(4):210–218, 1985.
- [15] G. Klinker, S. Shafer, and T. Kanade. Color Image Analysis With An Intrinsic Reflection Model. *Computer Vision., 1988. Second International Conference on*, pages 292–296, 1988.
- [16] R. Bajcsy, S. Lee, and A. Leonardis. Detection of diffuse and specular interface reflections and inter-reflections by color image segmentation. *International Journal of Computer Vision*, 17(3):241–272, 1996.
- [17] P. Tan, S. Lin, L. Quan, and H. Shum. Highlight Removal by Illumination-Constrained Inpainting. *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, 1:164–169, 2003.
- [18] R. Tan and K. Ikeuchi. Separating reflection components of textured surfaces using a single image. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(2):178–193, 2005.
- [19] R. T.Tan and K. Ikeuchi. Reflection Components Decomposition of Textured Surfaces Using Linear Basis Functions. *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, 1:125–131, 2005.
- [20] K. Ikeuchi and K. Sato. Determining Reflectance Properties of an Object Using Range and Brightness Images. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(11):1139–1153, 1991.
- [21] Y. Sato, M. Wheeler, and K. Ikeuchi. Object shape and reflectance modeling from observation. *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 379–387, 1997.
- [22] H. Lensch, J. Kautz, M. Goesele, W. Heidrich, and H. Seidel. Image-based reconstruction of spatial appearance and geometric detail. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 22(2):234–257, 2003.

- [23] T. Yu, N. Xu, and N. Ahuja. Recovering Shape and Reflectance Model of Non-lambertian Objects from Multiple Views. *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, (2):226–233, 2004.
- [24] N. Birkbeck, D. Cobzas, P. Sturm, and M. Jagersand. Variational Shape and Reflectance Estimation under Changing Light and Viewpoints. *Proceedings of European Conference on Computer Vision*, 2006.
- [25] S. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade. Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives. *Radiometry*, 1992.
- [26] P. Beckmann and A. Spizzichino. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. *Norwood, MA, Artech House, Inc., 1987, 511 p.*, 1987.
- [27] K. Torrance and E. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of Optical Society of America*, 57(9):1105–1114, 1967.
- [28] B. Phong. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*, 18(6):311–317, 1975.
- [29] J. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. *Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 192–198, 1977.
- [30] X. He, K. Torrance, F. Sillion, and D. Greenberg. A comprehensive physical model for light reflection. *Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 175–186, 1991.
- [31] G. Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 26(2):265–272, 1992.
- [32] E. Lafortune, S. Foo, K. Torrance, and D. Greenberg. Non-linear approximation of reflectance functions. *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 117–126, 1997.
- [33] M. Ashikhmin and P. Shirley. An anisotropic phong BRDF model. *Journal of Graphics Tools*, 5(2):25–32, 2000.
- [34] D. Miyazaki, R. Tan, K. Hara, and K. Ikeuchi. Polarization-based inverse rendering from a single view. *Proceedings of International Conference on Computer Vision*, pages 982–987, 2003.



- [35] R. Woodham. Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optical Engineering*, 19(1):139–144, 1980.
- [36] H. Hayakawa. Photometric stereo under a light source with arbitrary motion. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 11(11):3079–3089, 1994.
- [37] Y. TSAI. A Versatile Camera Calibration Techniaue for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses. *IEEE JOURNAL OF ROBOTICS AND AUTOMATION*, 3(4):323, 1987.

## 発表文献

- [1] 肥後智昭, 宮崎大輔, 池内克史, 二色性反射モデルに基づくリアルタイム鏡面反射成分除去, 情報処理学会研究報告. CVIM(コンピュータビジョンとイメージメディア), 2006, Vol.2006 (93), 211-218
- [2] 肥後智昭, 宮崎大輔, 池内克史, 多視点フォトメトリックステレオを用いた全体形状と反射パラメータの同時推定, *The Journal of Three Dimensional Images*, 2007:6, Vol.21(2), 3-9
- [3] 肥後智昭, 宮崎大輔, 池内克史, 陰影からの形状と反射パラメータの同時推定, 第 10 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007), 2007, 581
- [4] 肥後智昭, 宮崎大輔, 池内克史, 物体の全体形状と反射パラメータの同時推定, 画像ラボ, 日本工業出版, 2007, Vol.18(11), 31-36
- [5] T. Higo, D. Miyazaki, K. Ikeuchi, “3D Modeling Laser range sensor + Photometric stereo,” *Proceedings of The 3rd International Joint Workshop of KAIST-RCV and U-Tokyo-Ikeuchi Lab. on Robust Vision Technology*, 2007:11