筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

# 卒業研究論文

光源配置の最適化による2変数BRDF測定の改良

橋本 泰輔

指導教員 金森 由博、遠藤 結城、三谷 純

2017年1月

#### 概要

実世界の物体のデジタル化は、コンピュータグラフィックスにおける大きな目標のひとつ である。その中でも、物体の見た目を忠実に再現するために、物体表面の反射率の取得が盛 んに研究されている。しかし、反射率の取得には多数の方向から光を当てながら撮影せねば ならず、大規模な撮影システムが必要となる。そこで本研究では、必要な光源の数を削減す るため、物体の形状ごとに最適な光源の配置を見つける手法を提案する。具体的には、候補 となる光源位置の集合から、効率よく反射率を取得できる光源の組み合わせを選ぶ組み合わ せ最適化問題として定式化した。これにより、精度を保ちつつ使用する光源の数を抑えるこ とができた。さらに、取得時に外れ値を除外する手法を組み込んだ。また、複数の材質から なる物体の場合は物体表面を材質ごとに分類する必要があるが、分類の誤りの影響を低減す る手法も提案した。以上により既存手法よりも精度よく反射率を取得できることを示す。

# 目 次

第1章	はじめに	1
第2章	関連研究	4
2.1	BRDFの表現に関する研究	4
2.2	<b>BRDF</b> 取得に関する研究	7
第3章	Tingdahl らの手法	8
3.1	反射率取得の概要...............................	8
3.2	画素ごとの反射率マップの取得	9
3.3	クラスタリング	9
3.4	マテリアルごとの反射率マップの取得..............	12
3.5	レンダリング	12
第4章	提案手法	13
4.1	提案手法の概要	13
4.2	光源配置の最適化による光源数の削減............................	13
	4.2.1 組み合わせ最適化問題の定式化	14
	4.2.2 動的計画法による近似解法	16
4.3	反射率マップの取得時の不具合の低減.............................	16
	4.3.1 対角線について	17
	4.3.2 重要度を用いた反射率マップの取得	20
4.4	クラスタリングの誤りの影響の低減...........................	20
	<b>4.4.1</b> 収縮演算による改良	22
	4.4.2 メディアンフィルタの追加	22
第5章	結果	24
5.1	実験環境	24
5.2	光源配置の最適化による光源数の削減	24
0.2	5.2.1 対象の 3D モデル	24
	<b>5.2.2</b> 既存の光源配置	25
	5.2.2 光源 紀 2.2.1 光源 紀 2.1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	26
	5.2.5 完性的輕価	20
		20

	5.2.5 定量的評価	31
5.3	反射率マップの取得時の不具合の低減.......................	34
	5.3.1 仮定の検証	34
	5.3.2 定性的評価	34
	5.3.3 定量的評価	41
5.4	クラスタリングの誤りの影響の低減........................	43
	5.4.1 評価	43
第6章	まとめと今後の展望	47
6.1	まとめ	47
6.2	今後の展望	47
	謝辞	48
	参考文献	49

# 図目次

1.1 1.2	機械的に光源、カメラ、標本を動かすアプローチの例	3 3
2.1 2.2	既存研究により提案された BRDF 表現	5 6
3.1	Tingdahl らの手法における反射率取得の流れ	10
4.1	形状が似た対象群の例	14
4.2	光源配置と反射率マップの関係	15
4.3	埋まるか埋まらないかを記録した二値マップとその二値ベクトル.....	15
4.4	既存研究における2変数 BRDF 取得の結果とサンプル数・分散の可視化結果	18
4.5	マップ位置に対する法線・光線・視線の関係..............	19
4.6	重要度を用いた加重平均により複数のマテリアルから反射率マップを取得した	
	結果	21
4.7	クラスタリング結果への収縮処理	23
5.1	反射率取得の対象となる 3D モデル	25
5.2	等間隔な光源配置の作成方法...........................	25
5.3	光源配置の可視化における視点の位置..................	26
5.4	等間隔な光源配置の可視化結果.............................	26
5.5	最適化された光源配置の可視化結果.........................	27
5.6	球から取得した反射率マップとレンダリング結果による光源配置の比較	29
5.7	クッションから取得した反射率マップとレンダリング結果による光源配置の比較	30
5.8	球のレンダリング誤差による光源配置の比較.............	32
5.9	クッションのレンダリング誤差による光源配置の比較	33
5.10	取得した反射率マップによる反射率取得方法の比較 (平滑化なし)	35
5.11	取得した反射率マップによる反射率取得方法の比較(平滑化あり)	36
5.12	Lambert マテリアルのレンダリング結果による反射率取得方法の比較	37
5.13	Blinn マテリアルのレンダリング結果による反射率取得方法の比較	38
5.14	光沢のないマテリアルのレンダリング結果による反射率取得方法の比較	39
5.15	光沢のあるマテリアルのレンダリング結果による反射率取得方法の比較	40
5.16	レンダリングの誤差による反射率取得方法の比較 (平滑化なし)	41

5.17	レンダリングの誤差による反射率取得方法の比較 (平滑化あり)	42
5.18	複数のマテリアルから取得した反射率マップによる処理の有無の比較	44
5.19	複数マテリアルのレンダリング結果による処理の有無の比較	45
5.20	レンダリングの誤差による処理の有無の比較...........	46

# 第1章 はじめに

実世界の物体のデジタル化は、コンピュータグラフィックス (CG) における大きな目標のひ とつである。デジタル化した物体を CG で再現することで、リアリティの高い映画やゲーム などを実現できる。また、文化資源を劣化なく保存し、多くの人に公開する方法としても用 いられている。さらに、近年普及が進んでいる拡張現実においても、実世界上に CG を投影 する上でリアリティのある再現が求められ、デジタル化がより重要な技術になっている。

実世界の物体を外観を CG で忠実に再現したい場合、物体表面の光学的特性が重要となる。 一般に、この光学的特性は物体表面の材質によって異なる。本論文のこれ以降の記述におい て、特定の材質とその光学的特性を区別せず、マテリアルと呼ぶことにする。

材質ごとの光学的特性のうち特に、反射率を計測する研究が盛んに行われている。反射率と は、物体の表面に対し、ある方向から光が入射したとき、それぞれの方向へどれだけの光が反 射されるかを表したものである。これは主に、双方向反射率分布関数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function: BRDF) でモデル化される。BRDF を取得するためには、対象の面に対 し、様々な光源方向と観測方向の組み合わせについて、反射光を取得する必要がある。これ に対するひとつのアプローチとして、図1.1のように機械的に光源、カメラ、標本を動かすと いう方法が提案されている [1] [2] [3] [4]。ここで標本とは主に、取得したい単一のマテリア ルを持つ、平坦な正方形の板を指す。このアプローチは、モータで動かす必要があるため、取 得に時間がかかるという問題がある。もうひとつのアプローチとして、図 1.2 のように、光源 やカメラを多数並べて撮影する方法が提案されている [5]。これにより取得の時間が短くなっ たが、188 個という多数の光源や複数のカメラを用いるため、金銭的なコストが非常に高くな るという問題がある。Tingdahlらは、本来は4変数で記述される BRDF を単純化した2変数 BRDF [6] を用い、物体表面上の異なる法線を持った複数箇所を同時に測定することで、ひと つのカメラ、比較的少ない光源数での取得を可能にした [7]。また、標本を用意する必要がな く、複数のマテリアルを持つ実世界の物体から取得できる。しかし彼らの手法は、(1)撮影に 必要な光源数がそれでもなお 87 個以上と多い、(2) 2 変数 BRDF の表現力の限界から不具合 が生じる場合がある、(3) クラスタリングの精度が低い、などの問題がある。

そこで本研究では、Tingdahl らの手法の前述の問題点を改善した手法を提案する。まず(1) 光源数の削減の基本アイディアは、形状の似た複数の物体を撮影する場合において、その形 状に適したより少ない光源の配置を事前に求めておく、というものである。どの方向の平行 光を用いるかという組み合わせ最適化問題を解くことによって、光源数を減らしてもほぼ同 程度の精度で反射率が得られることを示す。形状ごとに最適な光源配置を求めるのは、我々 が知る限り、本研究が初めての試みである。次に、(2)2変数 BRDF では誤差が生じやすい光 源と視点の配置の影響を減らすため、測定値ごとに重要度を導入し、重要度に基づいて反射 率を計算する。これにより、反射率の取得結果に発生する不具合を低減できることを示す。2 変数 BRDF の問題点とその改善案を議論したのも、本研究が初めてである。そして (3) クラス タリングの誤りが生じやすい、異なる反射率を持つ部分の境界付近の画素に対策を施す。以 上により、提案手法はより少ない光源数でより精度よく反射率を取得できることを示す。 本研究による貢献を以下にまとめる。

- 形状ごとに最適な光源配置を求めるという新たな試みを行い、ほぼ同等の精度で、光源数を削減できることを示した。
- 2 変数 BRDF では完全に表現できない物体から 2 変数 BRDF を取得する際に起きる問題 点を初めて指摘し、改善案により不具合を低減した。
- 複数のマテリアルを持つ物体からの反射率取得において、クラスタリングの誤りによる 影響を低減する手法を提案し、精度の向上を行った。



(a) Hauth らの提案したシステム [8]

(b) Li らの提案したシステム [4]

図 1.1: 機械的に光源、カメラ、標本を動かすアプローチの例。(a) は、光源を固定し、標本を ロボットアーム、カメラをレールで動かしている。(b) は、測定器を固定し、光源と標本を3 つのモータで動かしている。このアプローチは機械的に動かす時間が発生するため、反射率 の取得に時間がかかる。 図 (a) の画像の出典: 文献 [8], 図 (b) の画像の出典: 文献 [4]



図 1.2: 光源やカメラを多数並べるアプローチの例 [5]。このアプローチは高速な取得が可能だ が、使用する光源数が多いため金銭的コストが高い。 画像の出典: 文献 [5]

# 第2章 関連研究

本研究では、反射率の取得を容易にするため、一般的な BRDF とは異なる 2 変数 BRDF を 用いている。そのため、まず 2.1 節で BRDF の表現に関する既存研究を述べる。その後、2.2 節で BRDF の取得についての既存研究を紹介する。

# **2.1 BRDF**の表現に関する研究

BRDF は、一般的に図 2.1(a) に示す 4 変数で表現される。この 4 変数は、 $\theta$  を仰角、 $\phi$  を方 位角とした球面座標系で、光源方向 l を表現する 2 変数 ( $\theta_l$ ,  $\phi_l$ ) と、視線方向 v を表現する 2 変数 ( $\theta_v$ ,  $\phi_v$ ) を意味する。ここで、光源方向 l と視線方向 v は単位ベクトルである。

Rusinkiewicz らはこれに対し、ハーフベクトル h を用いた再パラメータ化を行った [9]。こ こで、ハーフベクトルとは l と v の中間方向を表すベクトルである。これにより、BRDF の パラメータを  $(\theta_l, \phi_l, \theta_v, \phi_v)$  から  $(\theta_h, \phi_h, \theta_d, \phi_d)$  に変換している。新しく定義された 4 変数を、 図 2.1(b) に示す。  $(\theta_h, \phi_h)$  はハーフベクトル h の向きを表現する 2 変数であり、 $(\theta_d, \phi_d)$  はハー フベクトル h と視線方向 v のなす角を表現する 2 変数である。

また、取得しようとしている BRDF に対して、法線 n を軸に光源方向 l と視線方向 v を回転させても取得する値が変化しない性質 (等方性)を仮定することで、情報量を落とすことなく  $(\theta_h, \phi_h, \theta_d, \phi_d)$  から  $(\theta_h, \theta_d, \phi_d)$  への射影が可能である。これにより変数が少なくなるため、 BRDF の取得に必要な装置の自由度が 1 つ下がり、測定回数も減少する。実際に、次節で紹介する BRDF 取得に関する研究の多くが、この射影を用いている。射影後の BRDF 表現を図 2.1(c) に示す。

さらに Romeiro らは、ハーフベクトル h を軸に光源方向 l と視線方向 v を回転させたとき、 取得する値が変化しないことを仮定し、( $\theta_h$ ,  $\theta_d$ ,  $\phi_d$ ) から ( $\theta_h$ ,  $\theta_d$ ) への射影を検討した [6]。こ れを、図 2.1(d) に示す。彼らは、代表的な BRDF のデータベースである MERL BRDF データ ベース [10] を用いて精度の検証を行っており、データベース内のほぼすべてのマテリアルを、 2 変数で大きな誤差なく表現できることを示した。この表現を、2 変数 BRDF と呼ぶ。

本研究では、変数が少ないほど取得が容易になるため、Romeiro らが提案した2変数 BRDF を扱う。また本論文では以後、図 2.2 に示す2変数 BRDF の実測値を格納した RGB チャネルの2次元配列のことを、反射率マップと呼ぶ。



(c) 等方性を仮定した BRDF 表現 (3 変数)

(d) Romeiro らによる BRDF 表現 (2 変数) [6]

図 2.1: BRDF 表現。法線 n と接線 t に対する光源方向 l と視線方向 v の関係を角度パラメー タによって表現している。なお、ハーフベクトル h を含めたすべてのベクトルは単位ベクト ルである。(a) が一般的な表現であり、(b) では再パラメータ化を行っている。ここまでは4 変 数での表現だが、等方性を仮定することで(c) のように 3 変数で表現することが可能であり、 さらに Romeiro らは(d) のようにこれを 2 変数で表現した。



(a) Lambert 反射のマテリアルの例

(b) 鏡面反射成分を持つマテリアルの例

図 2.2: 反射率マップの例。図 2.1(d) の $\theta_h$ を横軸、 $\theta_d$ を縦軸とした RGB チャネルの 2 次元配 列に、対象から取得される実測値を格納することで作成する。全体を埋めるためには、様々な 光源方向と視線方向の組み合わせについて取得を行う必要がある。(a) は Lambert 反射を表現 した反射率マップであるため、光源方向と視線方向に関わらず均一の反射率マップとなって いる。それに対し、(b) は鏡面反射を表現しているため、光源方向と視線方向によって値が大 きく変化している。図 (b) の画像の出典: https://hal.inria.fr/hal-01016531v2/file/presentation.pdf

# **2.2 BRDF**取得に関する研究

BRDFを取得するためには、対象の面に対し、様々な光源方向と視線方向の組み合わせについて、反射光を取得する必要がある。これを実現するため、様々な手法が提案されてきた。

多くの手法は、機械的に光源、カメラ、標本を動かすというアプローチを取っている [1] [2] [3] [4]。 取得には図 1.1 に示すような装置を用い、標本の表面に対し、相対的な光源およびカメラの方 向を、それぞれ独立に変化させる。このアプローチでは、ほぼ任意の光源方向と視線方向の 組み合わせにおいて、反射光の取得が可能である。しかし、機械的に動かす時間が発生する ため、取得時間が長いという問題がある。

この問題に対し、より効率的に取得する工夫が行われてきた。Ward らは、半球面状の鏡と 魚眼レンズを用いることで、ひとつのカメラで多数の方向から同時に観測することを可能に し、取得時間を数分に短縮した [11]。また、円柱や球のように曲面形状を持つ標本を用いる ことで、複数の法線方向からの反射光を一度に取得する方法も提案されている [12] [3]。通常 は BRDF のパラメータ数に応じた装置の自由度が必要になるが、これらの研究は工夫によっ て必要な自由度を下げている。実際に取得時間が大幅に短くなっているが、結局は機械的な 要素が残り、動かす時間がなくなるわけではないため、高速化には限界がある。

異なるアプローチとして、図 1.2 のように光源やカメラを多数並べる方法が提案されている [5]。このアプローチでは、高速な取得が可能であるが、188 個という多数の光源や複数の カメラを必要とするため、金銭的コストが高いという問題がある。

また、ここまでは標本に対し BRDF 取得を行う方法を紹介したが、照度差ステレオ法という枠組みで、複数のマテリアルをもつ任意の物体から BRDF を取得する研究も行われている。 これらの研究も、図 1.2 のように光源を配置し、複数光源下の画像から BRDF を取得する。 Tingdahl らは、2 変数 BRDF を用い、物体表面上の異なる法線を持った複数箇所を同時に測 定することで、ひとつのカメラ、比較的少ない光源数での取得を可能にした [7]。しかし、彼 らの手法はそれでもなお 87 個以上もの光源数を使用している。

標本を用いる用いないにかかわらず、光源数が多いとその分金銭的コストが高くなる。本 研究では、光源の配置に着目し、光源数を減らす方法を検討した。

# 第3章 Tingdahlらの手法

本研究は、Tingdahl らの手法 [7] をベースとしているため、本章でより詳しく説明する。な お、Tingdahl らの手法では、反射率の取得前に法線の推定を行っているが、ここでは、本研 究で用いている反射率取得とレンダリングの手法を説明する。はじめに、3.1 節で反射率取得 の概要を述べ、3.2、3.3、3.4 節で個別の処理を説明する。また、反射率取得後のレンダリン グに関する処理を 3.5 節で説明する。

### **3.1** 反射率取得の概要

入力は、対象をひとつの固定カメラから撮影した画像群 *I*<sub>1</sub>, *I*<sub>2</sub>, ..., *I*<sub>M</sub> である。ここで、*M* は入射方向が既知である平行光源の数であり、画像1枚につき光源1つを用いて撮影する。また、入力された画像群から、画素ごとの法線を記録した法線マップが推定できているものと 仮定する。この法線マップも反射率の取得に用いる。

Tingdahl らの手法では、カメラが平行投影であることと、光源が平行光源であることを仮定している。これらの仮定は、撮影対象のサイズが、対象からカメラや光源までの距離と比較して小さいことに基づいた仮定である。加えて、撮影対象のマテリアルが2変数 BRDF モデルで表現可能であると仮定している。

反射率取得の流れを、以下と図 3.1 に示す。

手順 1: 表面上の点 (画素) ごとに、低解像度の反射率マップを作成

手順 2: 低解像度の反射率マップを特徴とし、表面上の点 (画素)をクラスタリング

手順 3: クラスタごとに、高解像度の反射率マップを作成

手順 4: 反射率マップの補間・平滑化

撮影対象の表面上の各点 (画像上の各画素) を似た反射率でクラスタリングし (手順1~2)、そ の後クラスタごとに反射率マップを取得する (手順3)。ここで、どのような特徴に基づいてク ラスタリングを行うかが重要であるが、Tingdahl らの手法では、この特徴として低解像度 (彼 らの手法では3×3 画素)の反射率マップを用いている。低解像度である理由は、画素ごとに 高解像度 (彼らの手法では50×50 画素)の反射率マップを作成しようとしても、最大でも光源 数と同じ画素数しか埋まらず、あまりにも疎になってしまうためである。一方、図 2.2(b)の 反射率マップを3×3 画素で表現しようとすると反射率の細かい変化が表現できない。このよ うに、最終的なレンダリングを行う際には低解像度の反射率マップは分解能が不十分である。 そのため、クラスタリング前とクラスタリング後で別々に反射率マップを取得する必要があ る (手順1および3)。クラスタごとの反射率マップの取得後は、ガウシアンカーネルを用い て、値のない部分の補完と平滑化を行う (手順4)。以上により、最終的なクラスタごとの反射 率マップが得られる。

また、同じクラスタに属する表面上の点(画素)は、似た反射率を持つことから、同じマテ リアルだとみなす。よって、「クラスタごと」は「マテリアルごと」と同義である。

# 3.2 画素ごとの反射率マップの取得

表面上の点 (画素) ごとに反射率マップを作成する方法を述べる。撮影された *M* 枚の画像 群  $\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2, ..., \mathcal{I}_M$  のうち、撮影対象を含む各画素に着目すると、光源方向ごとの RGB 測定値 の集合が得られていることになる。この測定値の集合を $\mathcal{C} = \{c_1, c_2, ..., c_M\}$ とする。 この $\mathcal{C}$ と各光源方向に加え、カメラ方向と法線方向を用いて、 表面上の点 (画素) ごとに反射率マッ プを次の手順で作成する。はじめに、カメラの方向と *M* 個の光源方向を、図 2.1(d) に示す球 面座標系に変換する。これによって、 $\mathcal{C}$  の各測定値について、角度座標のペア ( $\theta_h, \theta_d$ ) が定ま る。次に、角度空間を  $W \times H \in \mathbb{N}^2$  のグリッドに離散化し、角度座標のペア ( $\theta_h, \theta_d$ ) が示す セルに各測定値を記録していく。最後に、同じセルに記録された複数の測定値の平均をとり、 反射率マップに格納する。ただし、入射角度に依存して、表面の微小領域あたりの光の量が 変化することから、正規化のため各測定値を  $\cos \alpha$  で割る必要がある。ここで、 $\alpha$  は入射方向 と法線のなす角である。以上の処理により、各画素について  $W \times H$  画素の反射率マップが得 られる。

実際に取得を行う際は、反射率マップがあまりにも疎になることを防ぐため、比較的小さ いグリッドとして W = H = 3 を設定している。しかし、それでも一部が埋まらない場合が あるため、反射率マップは疎であるとして以後の処理を行う。

クラスタリングの前処理として、反射率マップを特徴ベクトル d ∈ ℝ<sup>3WH</sup> に次の手順で変 換する。まず、サンプリングした反射率マップを、光の三原色である RGB よりも色の差が人 間の知覚に近い CIE1976 L\*a\*b\*色空間 [13] に変換する。その後、反射率マップの各画素の L\*、a\*、b\*を一列に並べることで特徴ベクトル化する。なお、反射率マップが疎であるため、 特徴ベクトル d も疎なベクトルとなる。

# 3.3 クラスタリング

特徴ベクトルをクラスタリングするため、k-means を用いる。k-means はクラスタ数が既知 であることが前提だが、実世界の物体から取得を行う際、これは未知である。そこで彼らは、 クラスタ数を変えながら反復的に k-means を行い、最終的なクラスタ数を決める手法を提案 した。以下で、1 回の試行ごとに行う処理と、繰り返し条件について詳しく述べていく。

はじめに、1回の試行ごとに行う処理を説明する。k-means は以下の手順で行われる。



図 3.1: Tingdahl らの手法における反射率取得の流れ。入力画像上の赤、青、橙の四角は、画素ごとの低解像度の反射率マップの3つの例を作成する際に用いる画素を示している。

手順 1: 各特徴ベクトルにランダムなクラスタを割り当てる (初期化)

手順 3: 各特徴ベクトルと各クラスタ中心の距離を求め、最も近い中心のクラスタに割り 当て直す

手順4: クラスタの割り当てが変化しなくなるまで、手順2,3を繰り返す

ただし、特徴ベクトル d は疎であるため、クラスタ中心 c の計算 (手順 2) と距離の計算 (手順 3) で、欠損値を考慮する必要がある。クラスタ j の中心の i 番目の要素 c<sub>j,i</sub> を、以下の式で求 める。

$$c_{j,i} = \frac{1}{\sum_{j} g(d_{j,i})} \sum_{j} g(d_{j,i}) d_{j,i}, \quad 1 \le i \le 3WH$$

$$g(d_{j,i}) = \begin{cases} 1 & \text{if } d_{j,i} \text{ exists} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$(3.1)$$

また、特徴ベクトル d とクラスタ中心 c の距離は、どちらかのベクトルで欠損した要素は含めず、共通して存在する要素のみを用いた平均二乗ユークリッド距離で計算する。

dist
$$(\mathbf{d}, \mathbf{c}) = \frac{1}{\sum_{i} g(d_i) g(c_i)} \sum_{i=1}^{3WH} g(d_i) g(c_i) (d_i - c_i)^2$$
 (3.2)

ここで、特徴ベクトルは疎であるため、式 3.2 を用いて 2 つの特徴ベクトル  $\mathbf{d}_a, \mathbf{d}_b$  間の距離 dist( $\mathbf{d}_a, \mathbf{d}_b$ )を求めようとすると、 $\mathbf{d}_a$  と  $\mathbf{d}_b$  に共通して存在する要素がなく計算できない場合 がある。これに対し、クラスタ中心は複数の特徴ベクトルの平均値であり特徴ベクトルに比 べてより密になるため、特徴ベクトルとクラスタ中心間の距離計算は可能である。k-means で は特徴ベクトル間の距離計算を必要とせず、特徴ベクトルとクラスタ中心間の距離のみを用 いるため、疎な特徴ベクトルについても適用可能である。なお、k-means は初期化 (手順 1) に 依存する手法であるため、初期化を 25 回行い、誤差 E が最低となるクラスタの割り当てを 1 回の試行による結果とする。誤差 E は以下のように、各特徴ベクトルと対応するクラスタ中 心間の距離を足し合わせることで算出する。

$$E = \sum_{\mathbf{d}} \operatorname{dist}(\mathbf{d}, \operatorname{center}(\mathbf{d}))$$
(3.3)

ここで、center(d) は特徴ベクトル d が所属するクラスタの中心ベクトルを返す関数である。

次に、繰り返し条件について述べる。真のクラスタ数を K、求める最中の可変なクラスタ数を k とすると、k < Kの場合、kを増やすごとに誤差 E が小さくなる。これに基づき、kの初期値を 1 として、1 つ増やすごとに k-means を行い、E の変化が小さくなったところで最適なクラスタ数に達したと判断する。Tingdahl らは、 $E_{k+1}/E_k > 0.9$ を満たすまで反復を続

けている。なお、 $E_{k+1}/E_k > 1.0$ となる場合は誤差が増えているため、その時点のkから1 引いた数を最終的なクラスタ数とする。また、クラスタ数を求める際には、オリジナルの画 像ではなくダウンサンプリングした画像 (彼らの手法では 300 × 300 画素) を用い、クラスタ 数が決まってから改めてオリジナルの画像を用いる。

# 3.4 マテリアルごとの反射率マップの取得

マテリアルごと、つまりクラスタごとの反射率マップの取得方法を述べる。基本的には画素ごとの反射率マップ取得と同様である。違いは、同じクラスタに属する複数の画素でひとつの反射率マップを作成する点と、より大きなサイズのグリッドを用いる点である。大きなサイズのグリッドを用いるのは、3.1 節で述べたように、最終的なレンダリングには分解能が必要なためであり、Tingdahl らは W = H = 50 としている。

さらに、ガウシアンカーネルを用いて、値のない部分の補完と平滑化を行う。これによって、マテリアルごとの最終的な反射率マップ群  $\mathbf{B} = \{B_1, B_2, ..., B_K\}$ が得られる。

# 3.5 レンダリング

取得した反射率マップによるレンダリングを説明する。マテリアルjの RGB 値は、法線 n、 光源方向 l、視線方向 v を引数とする関数 $b_j(\mathbf{n}, \mathbf{l}, \mathbf{v})$  から得られる。これを用いると、画素値 は法線、光源方向、視線方向、マテリアルのインデックスを引数とする関数として以下のよ うに表現できる。

$$\hat{p}(\mathbf{n}, \mathbf{l}, \mathbf{v}, j) = b_j(\mathbf{n}, \mathbf{l}, \mathbf{v}) \cos \alpha$$
(3.4)

反射率マップに格納されている値に、マップ取得時に割っていた cos α を掛けることで、画素 値を得ている。

# 第4章 提案手法

本章では、本研究が提案する反射率の取得方法について述べる。はじめに、4.1 節で提案手 法の概要を説明する。その後、4.2 節で光源配置の最適化について述べ、4.3、4.4 節で Tingdahl らの手法 [7] に対する改良部分を説明する。

### **4.1** 提案手法の概要

提案手法では、反射率を取得する前に、対象の形状に対し最適となるような光源配置を見 つける。これによって、少ない光源数での取得を可能にしている。その後、最適な光源配置 を用いて、Tingdahl らの手法をベースにした反射率の取得を行う。ここで、Tingdahl らの手 法に対し、反射率マップの作成方法自体の改良と、クラスタリングの誤りに対する処理の追 加を行っている。

提案手法全体における仮定を述べる。提案手法では、光源については Tingdahl らと同様平 行光を仮定しているが、カメラについては透視投影であることを仮定している。また、平行 投影の場合は一回の撮影でひとつの視線ベクトルの情報しか得られないが、透視投影の場合 は撮影した画像の各画素において視線ベクトルが異なるため、一回の撮影で複数の視線ベク トルの情報が得られる。

提案手法の入力を述べる。光源配置を見つける際の入力は、対象となる物体の法線マップ とデプスマップである。反射率取得における入力は、方向が既知である複数の光源をひとつ ずつ切り替え、照らされた対象をひとつの固定カメラから撮影した画像群と、対象となる物 体の法線マップとデプスマップである。Tingdahl らの手法の入力に加えデプスマップが必要 なのは、透視投影を仮定しているためである。

# **4.2** 光源配置の最適化による光源数の削減

光源数を削減するためには、少ない光源で効率的に反射率マップを埋める必要がある。そ こで本研究では、形状ごとに効率的に反射率マップを埋める光源の配置があるというアイディ アに基づき、光源数を削減する手法を提案する。本節では、光源の配置の効率化を組み合わ せ最適化問題として定式化し(以降、この最適化を光源配置の最適化と呼ぶ)、動的計画法を 用いた近似解法を示す。

光源の配置を決める前提として、例えば図 4.1 に示すマネキンに着せた衣服など、形状の似た複数の物体を撮影する場合を考える。ここで、形状が似ていれば、共通の光源配置を使え

るという仮定をおくと、事前に1つの形状に対して最適化した光源の配置を、形状の似た他 の物体の撮影にも用いることができる。また、対象の物体表面に複数のマテリアルが存在す る場合、各マテリアルが対象の物体表面上に広く分布しており、反射率マップを埋めるのに 十分なサンプル数が得られるものと仮定する。この仮定のもとでは、複数マテリアルと単一 マテリアルを区別せずに、形状情報のみを用いて光源配置の最適化が可能である。



図 4.1:形状が似た対象群の例

#### 4.2.1 組み合わせ最適化問題の定式化

光源の配置の効率化を組み合わせ最適化問題として定式化する上での考え方を、図 4.2 を 用いて説明する。光源の配置を求める際は、入力として対象のデプスマップと法線マップが 与えられているため、対象に対しある方向から光を当てたとき、反射率マップのどこに測定 値が格納されるかを求めることができる。測定値がひとつ以上格納される画素群を埋まる領 域、測定値がひとつも格納されない画素群を埋まらない領域とし、①、②、③の方向から光を 当てると、それぞれの方向について、反射率マップの埋まる領域が定まる。さらに、①と② の光源方向を用いる場合と、②と③の光源方向を用いる場合を比較すると、前者の方がマッ プのより広い領域を埋めていることがわかる。このように、同じ光源数であっても、反射率 マップの埋まりやすい光源方向の組み合わせが存在する。よって本研究では、指定された光 源数の下で、最も反射率マップが埋まるように光源方向の組み合わせを選ぶ。これを、光源 数を変えながら繰り返し、ユーザが求める精度に応じて最小の光源数を決定する。

具体的な手順を説明する。はじめに、候補となる光源方向(以降、候補方向と呼ぶ)を、単 位球面上の点として密にサンプリングしておく。次に、各候補方向について、反射率マップ の各画素が埋まるか埋まらないかを記録した二値マップ(図4.3(a))を計算し、各画素を一列 に並べることで二値ベクトル(図4.3(b))を求める。そして、候補方向ごとの二値ベクトルの 論理和を求めることで、候補方向の組み合わせを表現する。ここで、指定された光源数を*M*、



図 4.2: 光源配置と反射率マップの関係。物体に①、②、③の方向から光を当てると、それぞれの方向について反射率マップの埋まる領域が定まる。さらに、①と②の光源方向を用いる場合と、②と③の光源方向を用いる場合を比較すると、前者の方がマップのより広い領域を埋めていることがわかる。



(a) 二値マップ

図 4.3: 埋まるか埋まらないかを記録した二値マップとその二値ベクトル。

候補方向の数を N、二値ベクトルの長さを  $H \times W$ 、各候補方向での埋まり具合を表す二値ベクトルを  $\mathbf{b}_1, ..., \mathbf{b}_N \in \{0, 1\}^{H \times W}$  とする。さらに、候補方向 *i* を使用するかしないかを表す二値ベクトルを  $\mathbf{x} = (x_i, x_2, ..., x_N) \in \{0, 1\}^N$  とすると、候補方向の組み合わせ最適化は以下で定式化される。

maximize 
$$\left| \bigcup_{i=1}^{N} \mathbf{b}_{i} x_{i} \right|$$
 (4.1)

subject to 
$$|\mathbf{x}| = M$$
 (4.2)

ここで、|x|は二値ベクトルxに含まれる1の数を意味する。

#### 4.2.2 動的計画法による近似解法

前節で定式化した問題の解法を述べる。まず、全探索を行うことを考えると、N 個の候補 方向から M 個を光源方向として選択することから、組み合わせの数は<sub>N</sub>C<sub>M</sub> となる。例えば、 わずか 100 個の候補点から 30 個を選ぶとしても、約  $2.94 \times 10^{25}$  通りとなり、組み合わせ数が 膨大になる。そこで、本研究では、動的計画法を用いることで解を求める。入力として、各候 補方向に対する二値ベクトル  $\mathbf{b}_1, ..., \mathbf{b}_N$  を、それぞれ変数  $\mathbf{b}[0], ..., \mathbf{b}[N-1]$  に格納する。光源 数 M について、以下の漸化式を用いることで、使用する候補方向の選択を行った。

$$\mathbf{dp}[0][j] = \mathbf{0} \qquad (0 < j \le M) \tag{4.3}$$

$$d\mathbf{p}[i][0] = \mathbf{0} \qquad (0 \le i \le N - 1) \tag{4.4}$$

$$\mathbf{dp}[i+1][j] = \max(\mathbf{dp}[i][j], \mathbf{dp}[i][j-1] \cup \mathbf{b}[i]) \quad (0 \le i \le N-1, 0 < j \le M) \quad (4.5)$$

$$\max(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \begin{cases} \mathbf{a} & \text{if } |\mathbf{a}| > |\mathbf{b}| \\ \mathbf{b} & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで、|x|は二値ベクトルxに含まれる1の数を意味する。式(4.5)では、i番目までの候補 方向から、光源数がj以下となるように選んだ時の、1の数(マップの埋まっている画素数)が 最多となる二値ベクトルの論理和を格納している。動的計画法では、ある順番で並んでいる N個の二値ベクトルを最初から順番に調べて1のビット数が最も多くなるような光源の集合 を選ぶが、そのような集合は二値ベクトルの並び順によって変わるため、大域最適解を得る にはすべての並び順を考慮しなければならない。提案手法では1つの並び順しか考慮してい ないので、動的計画法で得られるのは局所最適解である。

# 4.3 反射率マップの取得時の不具合の低減

反射率マップを作成する際、既存手法では、同じマップ位置にサンプリングされる値の平 均値をマップに格納する。これは、対象のマテリアルが2変数 BRDF で完全に表現可能な場 合、同じマップ位置にサンプリングされる値はすべて等しいため、問題ない。しかし、実世界 の物体の反射率は2変数では表現力が足りない場合があり、このような反射率を2変数 BRDF で表現する際、単純な平均では反射率マップの左下から右上に線状の模様ができる場合があ る(図 4.4)。本論文ではこの線を対角線と呼び、対角線の影響を低減した反射率マップの作成 方法を提案する。

#### 4.3.1 対角線について

手法の説明をする前に、なぜ対角線が生じるのかを述べる。本研究では原因を調べるため、 反射率マップを作成する際の、各マップ位置におけるサンプル数と分散を可視化した。それ ぞれをサンプル数マップ、分散マップと定義し、結果を図 4.4 に示す。分散マップは、R,G,B チャンネルごとに分散を計算し、それぞれの分散値を R,G,B チャンネルに格納した画像であ る。この結果から、サンプル数マップと分散マップにも対角線があることが確認できる。この 可視化結果をもとに、対角線上で何が起こっているかを考える。なお、本研究では、 $\theta_h \ge \theta_d$ の範囲を  $[0^\circ, 90^\circ]$  としていることから、対角線は  $(\theta_h, \theta_d) = (0^\circ, 90^\circ)$  から  $(\theta_h, \theta_d) = (90^\circ, 0^\circ)$ にかけての直線である。

例として、対角線上の  $(\theta_h, \theta_d) = (45^\circ, 45^\circ)$  で、法線・光線・視線がどのような関係になる のかを、図 4.5 に示す。ここで、2 変数 BRDF モデルで法線・光線・視線の関係を表現してい ることから、光線と視線をハーフベクトルを軸に回転させても、同じマップ位置になる。こ れが、対角線の原因を理解する上で重要である。

サンプル数マップに対角線が生じる原因を調べるため、サンプル数が多い ( $\theta_h$ ,  $\theta_d$ ) = (45°, 45°) とサンプル数が少ない ( $\theta_h$ ,  $\theta_d$ ) = (45°, 55°) で何が異なるのかを考える。図 4.5 に示すように、 ( $\theta_h$ ,  $\theta_d$ ) = (45°, 55°) の場合、光線と視線をハーフベクトルを軸に回転させると、光線か視線の どちらかが面の裏側から当たるような状況が発生する。しかし現実には面の裏側から光が当 たったり裏側から面を見たりすることはないので、その場合の値は使うことができない。こ れに対し、( $\theta_h$ ,  $\theta_d$ ) = (45°, 45°) では、このような状況は発生しない。この例から、面の裏側か ら光線や視線が当たる状況が発生することによってサンプル数が減少していることがわかる。 幾何学的に考えると、( $\theta_h$ ,  $\theta_d$ ) = (0°, 90°) から ( $\theta_h$ ,  $\theta_d$ ) = (90°, 0°) にかけての直線を境に、こ の状況が発生することから、これがサンプル数マップの対角線の原因であると考えられる。

分散マップに対角線が生じる原因を調べる。法線・光線・視線の関係において、光線と視線を ハーフベクトルを軸に回転させたとき、マップ上では同じ位置を示すことから、取得する値が すべて同じであることが望ましい。これは、対角線上の例である図 4.5 の ( $\theta_h$ ,  $\theta_d$ ) = (45°, 45°) についても同様である。しかし、分散マップを見ると特に対角線から右下部分でばらつきが 大きくなっており、異なる値が同じ画素に記録されていることがわかる。これより、対角線 付近、つまり光線や視線が法線に対して垂直に近い場合があると、異なる値が計測される可 能性があると考えられる。また、対角線の左上の領域では光線や視線が法線に対して垂直に なることがないのに対し、右下の領域では垂直になることがあり、実際に分散が大きいこと がわかる。

ここまでで、サンプル数マップと分散マップに対角線が生じる原因について述べた。サン プル数マップの対角線は幾何学的性質に由来するもので、反射率マップに影響を及ぼすもの



図 4.4: 既存研究における 2 変数 BRDF 取得の結果とサンプル数・分散の可視化結果。対象 とした物体は、上から、Lambert モデルによるマテリアル、Blinn モデルによるマテリアル、 mental ray の Arch&Design を用いた光沢のないマテリアル、光沢のあるマテリアルである。既 存の手法は、2 変数 BRDF で表現しきれないマテリアルの場合、左下から右上にかけて線の ようなものが発生する問題がある。



図 4.5: マップ位置に対する法線・光線・視線の関係。赤・黄・灰・青の円柱は、それぞれ法線・光線・視線・ハーフベクトルを意味する。上段は、マップ上で  $(\theta_h, \theta_d) = (45^\circ, 45^\circ)$  となる配置の例である。幾何学的には異なる配置であるが、2 変数 BRDF 表現では値を持つ配置だと見なされる。下段は、光線が面の裏から当たる場合の例である。光線や視線が面の裏から当たることは現実にはあり得ないので、このような場合は値が記録されない。

ではない。しかし、分散マップについては、反射率マップへ格納する際に平均をとるため、反 射率マップに不自然な値が格納される原因となる。そこで、本研究では、分散マップで見つ けた問題に対策を行うことで、対角線の影響を低減した反射率マップの取得方法を提案する。

#### 4.3.2 重要度を用いた反射率マップの取得

前節では、光線や視線が法線に対して垂直に近い際、対角線が発生すると述べた。そこで、 光線や視線が法線に対して垂直に近い際の影響を減らすため、測定値ごとに以下の重要度 *p* を導入する。

$$p = \cos \alpha \cdot \cos \beta \tag{4.6}$$

ここで、 $\alpha$ は法線と光線のなす角度、 $\beta$ は法線と視線のなす角度である。 $\alpha$ 、 $\beta$ はそれぞれ、 図 2.1(a)における  $\theta_l$ 、 $\theta_v$ と等価である。なお、90°を超えると面の裏側から当たることになる ため、値の範囲は [0°, 90°] である。光線や視線が法線に対して垂直に近い状況とは、光線や 視線と法線のなす角度が 90°に近い状況である。そこで、[0°, 90°] という範囲で、角度が小さ いほど値が大きく、角度が大きいほど値が小さくなる関数として、cosを採用する。これによ り、光線や視線が法線に対して垂直に近いほど重要度が低く、遠いほど重要度が高くなる。

反射率の取得を行う際、どのように重要度を用いるのか説明する。本研究では、2つの方法 を検討した。1つは重要度が最大となる値をマップに格納する方法である。もう1つの方法は 重要度を用いた加重平均である。重みとして、重要度の差がより反映されるように、重要度 を γ 乗した値を用いる。本研究では、経験的に γ = 10 としてすべての結果を出力している。

# 4.4 クラスタリングの誤りの影響の低減

Tingdahl らの手法と改良手法を用いて複数マテリアルから反射率を取得したところ、図4.6 に示すように、明らかに不正確なマップが取得された。この結果を見ると、本来は他のクラ スタに含まれるべき値が混入していることが考えられ、実際にクラスタリング結果から誤り が確認できる。そこで本節では、クラスタリングの誤りによる反射率マップへの影響を低減 する仕組みを提案する。Tingdahl らの手法に提案する処理を追加した反射率取得の流れを以 下に示す。追加した処理は、手順3と、手順5のノイズ除去である。

手順1:表面上の点(ピクセル)ごとに、低解像度の反射率マップを作成

手順 2: 低解像度の反射率マップを特徴とし、表面上の点 (ピクセル) をクラスタリング

手順3: クラスタリング結果の境界部分を除去

手順 4: クラスタごとに、高解像度の反射率マップを作成

手順 5: 反射率マップの補完・ノイズ除去・平滑化



(a) 対象の物体





(c) 取得された反射率マップ

図 4.6: 重要度を用いた加重平均により複数のマテリアルから反射率マップを取得した結果。 対象の物体 (a) は mental ray の Arch&Design によるチェック模様のテクスチャを用いた光沢 のないマテリアルである。クラスタリング結果 (b) から、マテリアルの境界に対するクラスタ リングが不安定であることがわかる。また、取得された反射率マップ (c) には、別のマップの 値が混入している。これらは Tingdahl らの手法でも発生する問題である。図 (c) の 3 行目は、 図 (b) のクラスタごとの色に対応している。

#### 4.4.1 収縮演算による改良

図 4.6(b) のクラスタリング結果を見ると、マテリアルの境界で誤りが発生していることが わかる。この例では、レンダリング時のアンチエイリアシング処理によってマテリアルの境 界がボカされ、画像上では境界が曖昧になっていることが原因である。実世界の物体を撮影 する場合も、物体表面上では明確にマテリアルの境界があったとしても、画素に記録される際 には同様の原理で境界がボケてしまう。この問題への対処として、クラスタリング結果に対 し図 4.7 のように収縮処理を行う。具体的には、クラスタごとに二値マップを作成し、各画素 について、近傍領域に含まれる画素の画素値が全て1であれば1、そうでなければ0を格納す る。本研究では、近傍領域として2×2のカーネルを用いており、注目画素自体と上・左・左 上の4つの画素の値を用いて注目画素の値を決めている。その後、収縮された二値マップご とに反射率マップの取得を行うことで、マテリアルの曖昧になった境界付近の値をできるだ け使わずにマップを作成できる。なお、レンダリングを行う際は、収縮処理を適用する前の クラスタリング結果を用いる。

#### 4.4.2 メディアンフィルタの追加

反射率マップ取得後に補完と平滑化を行っているが、これら処理には不正確な値の混入が 考慮されていない。そこで、不正確な値をノイズとし、除去することを考える。このノイズ は、クラスタリングの誤りによるものであり、位置や値の大きさが不規則である。このよう なノイズはごま塩ノイズと呼ばれ、メディアンフィルタが有効であることが広く知られてい る。そこで、メディアンフィルタによる処理を追加する。本研究では、近傍領域として 5×5 のカーネルを用いている。メディアンフィルタを追加した補完と平滑化の流れを以下にまと める。

手順 1: pull-push [14] を用いてマップの欠落部分を補完

手順2:メディアンフィルタを用いてノイズを除去

手順 3: ガウシアンフィルタを用いて平滑化



(a) クラスタリング結果への収縮処理



(b) クラスタごとの二値画像に対する収縮処理

図 4.7: クラスタリング結果への収縮処理。図 (b) の 3 行目は、図 (a) のクラスタごとの色に対応している。

# 第5章 結果

はじめに 5.1 節で実験環境について述べ、その後、提案手法の各項目について個別に結果を 示す。5.2 節で光源配置の最適化、5.3 節で反射率取得方法自体の改良、5.4 節で複数マテリア ルの際のクラスタリングの誤りへの対処について述べる。なお、5.2 節と 5.4 節の結果を得る 際にも、改良した反射率取得方法を用いている。

### 5.1 実験環境

提案システムは、C++言語で実装し、ライブラリとして、画像処理にOpenCV、ベクトル/行 列演算に Eigen を用いた。実験に用いた法線マップ、デプスマップ、任意の方向から光を当て た画像は、3DCG ソフトウェア 3ds Max を用いて作成した。多数の方向から光を当てレンダ リングする際は、MAX Script を用いてバッチ処理を行っている。なお、これら画像は 480 × 480 画素の OpenEXR 形式で出力した。OpenEXR 形式は HDR (High Dynamic Range) 画像形 式のひとつであり、本論文へ載せる際には LDR (Low Dynamic Range) 画像へ変換する必要が ある。この処理は、Photoshop を用いて行った。また、画像の元となる 3D モデルは、3D モデ ル素材配布サイト TurboSquid のものを用いている。反射率マップは、2 変数  $\theta_h, \theta_d \in [0^\circ, 89^\circ]$ を 50 × 50 画素の画像に格納することで作成した。こちらも、画像形式として OpenEXR を 用いた。

## 5.2 光源配置の最適化による光源数の削減

最適化された配置によって得られた反射率マップとそのマップによるレンダリング結果を 示し、一様な光源配置と比較を行う。まず 5.2.1 節で、反射率を取得する対象を示し、5.2.2 節 で比較対象である一様な光源配置について述べる。その後、5.2.4 節で一様な光源配置と提案 手法による光源配置で取得した反射率マップとそのレンダリング結果を示す。5.2.5 節では、 得られた結果に対し誤差計算を行い提案手法の評価を行う。

#### 5.2.1 対象の 3D モデル

反射率を取得する対象として、図 5.1 に示す、球・クッションの 3D モデルを用いた。マテ リアルは、図 4.4 でも用いた mental ray の Arch&Design によって作成した光沢のあるマテリ アルである。



(a) 球

(b) クッション



#### 5.2.2 既存の光源配置

反射率取得の既存研究では球面上で等間隔になるよう光源を配置している。球面上の等間 隔な頂点は、図 5.2 のように、正二十面体をベースに再帰的に三角形に分割し、それらの頂 点を単位球面に射影すること繰り返して得られる。ここで得られた球面上の各頂点が、ひと つの平行光源の方向に対応する。本研究では、この方法によって求めた頂点を等間隔な光源 配置とし、この配置と最適化による配置の比較を行う。なお、このやり方で光源数を増やす 場合、三角形の分割回数でしか制御できないため、連続的に光源数を増やすことはできない。 本研究では、光源数 12 と 42 について実験を行った。ただし、定量的評価の際には光源数 162 の結果も出力している。



### 5.2.3 光源配置の可視化

球面上に配置された光源を、緯度を縦軸、経度を横軸とし、図 5.3 に示す視点を原点とした 2 次元平面に投影することで、可視化を行った。等間隔な光源配置の可視化結果を図 5.4、最 適化された光源配置の可視化結果を図 5.5 に示す。



図 5.3: 光源配置の可視化における視点の位置。



図 5.4: 等間隔な光源配置の可視化結果。



(a) 球に対する最適化結果





図 5.5: 最適化された光源配置の可視化結果。

#### 5.2.4 定性的評価

実際に得られた反射率マップとそのマップを用いたレンダリング結果を図 5.6、5.7 に示す。 レンダリング結果は、正面から平行光で照らした際のものである。補完と平滑化適用する前 の反射率マップを見ると、最適化した配置は等間隔な配置よりもマップの広い範囲を埋めてい ることが確認できる。よって、より正確に反射率マップを取得できると考えられる。これは 実際に、レンダリング結果から確認できる。等間隔な配置の際、光源数 12 の結果は正解画像 に比べて鏡面反射の成分が鈍くなっている印象を受ける。これに対し最適化された配置の際、 光源数 12 の結果は正解画像に比較的近いことがわかる。また、誤差を可視化した誤差マップ を見ることで、違いがより明らかになる。この誤差マップは、5.2.5 節で定義する Δ*E*<sub>Lab</sub> を用 いて、以下の手順で作成している。

手順 1: レンダリング結果の各画素について正解画像からの誤差 ΔE<sub>Lab</sub> を算出

手順 2:最大の  $\Delta E_{Lab}$  で各画素の  $\Delta E_{Lab}$  を割り、誤差を [0,1] の範囲に正規化

手順 3: [0,1] を HSV 色空間における H (Hue; 色相) の [240°, 0°] に線形に対応させる

なお、複数枚で比較を行う場合は、すべての画像の中で最大の誤差  $\Delta E_{Lab}$  で各画像の各画素 値を割ることで、正規化を行う。



(c) 正解画像 (レンダリング結果)

図 5.6: 球から取得した反射率マップとレンダリング結果による光源配置の比較。





(c) 正解画像 (レンダリング結果)

図 5.7: クッションから取得した反射率マップとレンダリング結果による光源配置の比較。

#### 5.2.5 定量的評価

取得した反射率マップの評価方法を説明する。理想的には正解となる反射率マップとの誤 差を算出する方法が考えられる。しかし、4.3節で述べた通り、現実のマテリアルの多くは2 変数 BRDF で厳密に表現することはできず、正解となる反射率マップを用意できない。そこ で、取得した反射率マップを用いてレンダリングを行い、その結果画像の誤差に基づいて評 価を行う。誤差の計算には、正解画像として、3DCG ソフトウェアを用いてレンダリングし た画像を用いる。

誤差の計算方法についてより詳しく述べる。最も容易なのは、反射率マップを用いて、あ る一方向のみから光を当てたレンダリング画像を作成し、正解画像との誤差計算を行う方法 である。しかし、それでは反射率マップの一部しか使われず、反射率マップ全体の評価がで きないため、様々な方向から光を当てて撮影した複数枚の画像を用いて誤差を計算する。こ の際、光の様々な入射方向を偏りなく考慮するため、等間隔な光源配置を用いる。等間隔な 配置の各光源方向ついて反射率マップを用いたレンダリングと 3DCG ソフトウェアによるレ ンダリングを行い、複数枚からなる画像セット間の誤差をひとつの NCD (Normalized Color Difference) [16] で表現する。NCD とは、国際照明委員会 (CIE) が定めた、人間の知覚と均等 な尺度を持つ CIE1976 L\*a\*b\*色空間 [13] での誤差を表す評価指標である。これにより、色の 三原色である RGB での平均二乗誤差 (Root Mean Squared Error; RMSE) よりも人間の知覚に 近い誤差評価が可能である。複数枚からなる画像セット間の NCD は、評価に用いる画像枚数 (つまり光源数)を *M*、画素数を *N* としたとき、以下の式を用いて計算できる。

NCD = 
$$\frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \max(j) \|\Delta E_{Lab}\|}{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \max(j) \|E_{Lab}^{*}\|}$$
(5.1)

$$\Delta E_{Lab} = \sqrt{(L(i,j) - \hat{L}(i,j))^2 + (a(i,j) - \hat{a}(i,j))^2 + (b(i,j) - \hat{b}(i,j))^2}$$
(5.2)

$$E_{Lab}^* = \sqrt{L(i,j)^2 + a(i,j)^2 + b(i,j)^2}$$
(5.3)

ここで、L(i, j)はi枚目の正解画像でのj番目の画素の明度、a(i, j), b(i, j)は彩度を意味し、  $\hat{L}(i, j), \hat{a}(i, j), \hat{b}(i, j)$ はレンダリング画像群について同様の値を意味する。また、mask(j)は 撮影対象の物体が含まれていない画素を誤差計算に含めないためのものであり、j番目の画素 が撮影対象の物体を含むなら1、そうでなければ0となる。なお、本研究では評価に用いる画 像枚数 Mを 162 枚としてすべての評価を行った。

等間隔な配置と最適化された配置について、誤差計算を行った結果を図 5.8、5.9 に示す。等 間隔な配置については、5.2.2 節で述べた通り、光源数を連続的に変化させることができない。 この結果から、光源数が多い場合は配置による差があまりないが、光源数が少ないときに精 度が大きく異なることが確認できる。それぞれのグラフより、最適化された光源配置の場合 は光源数を 10 個程度用いれば十分であることがわかる。



光源数 等間隔な光源配置		最適化した光源配置	
4	-	0.142	
6 -		0.083	
8 -		0.073	
10	-	0.059	
12	0.092	0.057	
22	-	0.060	
32	-	0.059	
42	0.058	0.058	
162	0.059	0.059	

図 5.8: 球のレンダリング誤差による光源配置の比較。



光源数	等間隔な光源配置	最適化した光源配置
4	-	0.073
6	-	0.057
8	-	0.051
10	-	0.053
12	0.064	0.053
22	-	0.052
32	-	0.051
42	0.054	0.049
162	0.050	0.049

図 5.9: クッションのレンダリング誤差による光源配置の比較。

# 5.3 反射率マップの取得時の不具合の低減

4.3節で提案した反射率マップ取得方法の結果を示し、評価を行う。反射率取得を行う対象の 形状として、シンプルな形状である球を用いる。マテリアルは、図4.4でも使用した、Lambert モデル、Blinn モデル、mental ray の Arch&Design を用いた光沢のない反射モデル、同じく Arch&Design を用いた光沢のある反射モデルの4つを用いている。また光源配置には、十分 な光源数として、642 個の等間隔な光源配置を用いる。

#### 5.3.1 仮定の検証

また、4.1 節で述べた「対象の形状が似ている場合、共通の光源配置を使える」という仮定 について検証を行った。まず、クッション1、クッション2、球、ボウリングピンの3Dモデ ルを用意し、それぞれの形状に対して、光源数を12として光源配置の最適化を行った。その 後、得られた各光源配置でクッション1から反射率を取得した(図5)。クッション2がクッ ション1の埋まり具合に近いことから、似た形状では共通の光源配置を使えると判断できる。

#### 5.3.2 定性的評価

実際に取得した反射率マップを図 5.10、そのマップによるレンダリング結果の例を図 5.12、 5.13、5.14、5.15 に示す。レンダリング結果は、物体の手前上方と奥上方からそれぞれ平行光 で照らした際のものである。ここで、通常は反射率マップを取得した後に平滑化を行うが、対 角線による影響を分かりやすくするため、平滑化を用いずにレンダリングを行っている。ま た、レンダリングには使用していないが、参考として取得後に平滑化を行った反射率マップ を図 5.11 に示す。

はじめに、取得した反射率マップの比較を行う。図 5.10 の 1 行 2 列目を見ると、Lambert モ デルについては既存手法でも問題ないことがわかる。これは、Lambert モデルが 2 変数 BRDF で完全に表現可能なモデルであるためだと考えられる。しかし、2~4 行 2 列目の他のマテリ アルについては、2 変数 BRDF では完全に表現できないため、4.3.1 節で述べた対角線の影響 が出ている。これに対し、3,4 列目の、提案した最大重要度と加重平均では、すべてのマテリ アルについて対角線の影響を受けずに反射率マップを取得できていることが確認できる。な お、最大重要度の結果にノイズが多いのは、画素ごとにひとつの値しか記録しておらず、そ の値が反射率マップにおける隣接画素間で必ずしも連続的に変化しないためである。

次に、取得した反射率マップを用いたレンダリング結果の比較を行う。図 5.12 の Lambert モデルの結果を見ると、レンダリング結果についても、既存手法で問題がないとわかる。こ れは、反射率マップと同様に、Lambert モデルは 2 変数 BRDF で完全に再現可能であるため である。これに対し、図 5.13、図 5.14 図 5.15 に示す他のマテリアルについては、不自然に黒 くなっている領域や不連続な部分が確認できる。これは、誤差マップを見ると明らかである。



図 5.10: 取得した反射率マップによる反射率取得方法の比較(平滑化なし)。



図 5.11: 取得した反射率マップによる反射率取得方法の比較(平滑化あり)。



図 5.12: Lambert マテリアルのレンダリング結果による反射率取得方法の比較。



図 5.13: Blinn マテリアルのレンダリング結果による反射率取得方法の比較。



図 5.14: 光沢のないマテリアルのレンダリング結果による反射率取得方法の比較。



図 5.15: 光沢のあるマテリアルのレンダリング結果による反射率取得方法の比較。



対象のマテリアル 平均 最大重要度 加重平均 Lambert 0.004 0.004 0.004 Blinn 0.044 0.037 0.037 光沢のないマテリアル 0.061 0.019 0.018 光沢のあるマテリアル 0.047 0.078 0.067

図 5.16: レンダリングの誤差による反射率取得方法の比較(平滑化なし)。

### 5.3.3 定量的評価

5.2.5 節と同様の方法で、レンダリング結果による評価を行う。162 個の等間隔な配置の各 光源方向ついて、反射率マップを用いたレンダリングと 3DCG ソフトウェアによるレンダリ ングを行い、複数枚からなる画像セット間の誤差をひとつの NCD として求めた。反射率マッ プ取得後に平滑化を行わなかった場合の結果を図 5.16、平滑化を行った場合の結果を図 5.17 に示す。



対象のマテリアル	平均	最大重要度	加重平均
Lambert	0.004	0.004	0.004
Blinn	0.044	0.037	0.037
光沢のないマテリアル	0.062	0.019	0.019
光沢のあるマテリアル	0.070	0.051	0.059

図 5.17: レンダリングの誤差による反射率取得方法の比較(平滑化あり)。

# 5.4 クラスタリングの誤りの影響の低減

4.4節で提案した収縮処理とメディアンフィルタの追加によって、結果がどのように変わる かを示す。反射率取得を行う対象には、5.3節と同様にシンプルな形状である球を用いる。マ テリアルは、mental ray の Arch&Design を用いた光沢のない反射モデルをベースとし、拡散 反射としてチェック模様のテクスチャを用いている。また光源配置として、最適化された 30 個の光源配置を用いる。

#### 5.4.1 評価

実際に取得した反射率マップを図 5.18 に示す。ここでは、違いをわかりやすくするため平 滑化前の結果を示している。この結果から、収縮処理・メディアンフィルタと処理を追加す るごとに不正確な値が除去できていることが確認できる。更に、図 5.19 に示すレンダリング 結果からも、不自然な部分が少なくなっていることがわかる。レンダリング結果は、物体の 手前上方と奥上方からそれぞれ平行光で照らした際のものである。

5.2.5 節と同様の方法で、レンダリング結果による定量的評価を行う。162 個の等間隔な配置の各光源方向ついて、反射率マップを用いたレンダリングと 3DCG ソフトウェアによるレンダリングを行い、複数枚からなる画像セット間の誤差をひとつの NCD として求めた。結果を図 5.20 に示す。この結果から、処理を加えるごとに誤差が減少していることが、定量的に確認できる。



(a) 既存手法



# (b) 収縮処理を追加



(c) 収縮処理・メディアンフィルタを追加

図 5.18: 複数のマテリアルから取得した反射率マップによる処理の有無の比較。



図 5.19: 複数マテリアルのレンダリング結果による処理の有無の比較。



図 5.20: レンダリングの誤差による処理の有無の比較。

# 第6章 まとめと今後の展望

#### 6.1 まとめ

反射率の取得において、比較的少ない光源数での取得を可能にした Tingdahl らの手法に対 し、3 つの問題点を指摘し改善を行った。1 つ目に、反射率の取得における光源の配置を、組 み合わせ最適化問題として定式化し、動的計画法によって最適化することで、必要な光源数を 減らすことができた。2 つ目に、2 変数 BRDF の測定方法について、誤差が生じやすい光源と 視点の配置の影響を減らすことで、2 変数 BRDF の表現力の限界により生じる不具合を低減 できた。3 つ目に、複数の種類の反射率を持つ対象の際、異なる反射率の境界付近の画素を用 いないようにし、外れ値処理を行うことで、反射率マップへのクラスタリングの誤りの影響 を低減できた。以上から、提案手法はより少ない光源数でより精度よく反射率を取得できた。

### 6.2 今後の展望

複数マテリアルを取得する際に、対象が光沢のあるマテリアルである場合、クラスタリン グの誤りが多発するという問題がある。これは、クラスタリング前に取得する低解像度の反 射率マップに原因がある。反射率マップの解像度が低すぎると値の変化を十分に表現でない ため正確にクラスタリングできなくなる。一方、解像度が高すぎると反射率マップがあまり にも疎になってクラスタ中心も疎になり、クラスタ中心と特徴ベクトル間での距離計算が困 難になる。そこで、クラスタ中心を求める際、最終的なマップ取得と同様に補完や平滑化を 行うことを検討している。これにより、高解像度の反射率マップであってもクラスタリング が可能になり、光沢のあるマテリアルのクラスタリングが可能であると考える。

また、組み合わせ最適化問題を解くために動的計画法を用いたが、この解法により得られ るのは、4.2.2 節で述べた通り、大域的最適解ではない。大域的最適解またはそれにより近い 解を得られるよう、他のアルゴリズムも引き続き、調査、検討していきたい。

本研究ではシミュレーションを行ったが、本研究の最終的な目標は、実際にシステムを構 築し、実物体から反射率を取得することである。そのため、実際のシステムを作り、シミュ レーション結果を検証し、その上で研究を進めていきたいと考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導をいただきました金森由博助教、遠藤結城助教、三谷純 教授に深く感謝いたします。特に金森助教には、研究だけでなく発表や論文執筆まであらゆ る面で丁寧なご指導、ご助言をいただきました。本当にありがとうございました。また、本 研究への協力やご助言をいただいた非数値処理アルゴリズム研究室の皆様に、感謝を申し上 げます。特に、発表、論文執筆、アルゴリズムなどで日ごろから相談させていただいた菊池 敬済先輩、田中慎一先輩、大垣雅人先輩に心から感謝いたします。ありがとうございました。

# 参考文献

- [1] Sing Choong Foo. A gonioreflectometer for measuring the bidirectional reflectance of material for use in illumination computation. PhD thesis, Cornell University, 1997.
- [2] Stephen R. Marschner, Stephen H. Westin, Eric P. F. Lafortune, Kenneth E. Torrance, and Donald P. Greenberg. Image-based BRDF measurement including human skin. In *Rendering Techniques'99*, pp. 131–144. Springer, 1999.
- [3] Stephen R. Marschner, Stephen H. Westin, Eric P. F. Lafortune, and Kenneth E. Torrance. Image-based bidirectional reflectance distribution function measurement. *Applied Optics*, Vol. 39, No. 16, pp. 2592–2600, 2000.
- [4] Hongsong Li, Sing-Choong Foo, Kenneth E Torrance, and Stephen H Westin. Automated three-axis gonioreflectometer for computer graphics applications. *Optical Engineering*, Vol. 45, No. 4, pp. 043605–043605, 2006.
- [5] Christopher Schwartz, Ralf Sarlette, Michael Weinmann, and Reinhard Klein. Dome II: A parallelized BTF acquisition system. In Proc. of the Eurographics 2013 Workshop on Material Appearance Modeling: Issues and Acquisition, pp. 25–31. Eurographics Association, 2013.
- [6] Fabiano Romeiro, Yuriy Vasilyev, and Todd Zickler. Passive reflectometry. In Proc. of European Conference on Computer Vision, pp. 859–872. Springer, 2008.
- [7] David Tingdahl, Christoph Godau, and Luc Van Gool. Base materials for photometric stereo. In *Proc. of European Conference on Computer Vision*, pp. 350–359. Springer, 2012.
- [8] M. Hauth, O. Etzmuss, B. Eberhardt, R. Klein, R. Sarlette, M. Sattler, K. Daubert, and J. Kautz. Cloth animation and rendering. In *Proc. of Eurographics 2002 Tutorial*. Eurographics Association, 2002.
- [9] Szymon M. Rusinkiewicz. A new change of variables for efficient BRDF representation. In *Rendering techniques*'98, pp. 11–22. Springer, 1998.
- [10] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Matt Brand, and Leonard McMillan. A data-driven reflectance model. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 22, No. 3, pp. 759–769, July 2003.

- [11] Gregory J. Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Vol. 26, No. 2, pp. 265–272, 1992.
- [12] Rong Lu, Jan J. Koenderink, and Astrid M. L. Kappers. Optical properties (bidirectional reflection distribution functions) of velvet. *Applied Optics*, Vol. 37, No. 25, pp. 5974–5984, 1998.
- [13] Alan R. Robertson. The CIE 1976 color-difference formulae. *Color Research & Application*, Vol. 2, No. 1, pp. 7–11, 1977.
- [14] Steven J. Gortler, Radek Grzeszczuk, Richard Szeliski, and Michael F. Cohen. The lumigraph. In *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 43–54. ACM, 1996.
- [15] Ross Heikes and David A. Randall. Colorado state university general circulation model - spherical geodesic grids. http://kiwi.atmos.colostate.edu/rr/groupPIX/ross/ross1/ross1.html (参照 2016-1-15).
- [16] Konstantinos Plataniotis and Anastasios N. Venetsanopoulos. *Color image processing and applications*. Springer Science & Business Media, 2013.