

信州大学審査学位論文

分光情報と光反射モデルに基づいた
物体表面の反射特性推定と 3DCG 再現

2015年3月

望月 宏祐

目 次

第1章 序論	1
1. 1 研究の背景と目的	2
1. 2 本論文の構成	6
第2章 光反射のモデル化と反射特性の定量化	8
2. 1 光反射モデル	9
2. 2 本研究で使用する光反射モデル	13
2. 3 不均質誘電体の反射モデル	14
2. 4 金属の反射モデル	15
第3章 RGB カメラによる全方位画像計測と IBL への応用	17
3. 1 本章の概要	18
3. 2 実シーン照明環境における分光分布	19
3. 3 カメラモデル	21
3. 3. 1 カメラの幾何モデル	21
3. 3. 2 カメラ出力の分光モデル	22
3. 4 光源の分光分布の推定	23
3. 4. 1 分光分布の推定手法	23
3. 4. 2 基準カメラのシステム変換マトリックス	23
3. 5 未校正カメラを用いた分光分布の推定	24
3. 5. 1 基準カメラの分光感度の推定	24
3. 5. 2 未校正カメラを用いた分光分布推定法	25
3. 6 全方位分光分布を用いたレンダリング	26
3. 6. 1 光反射モデル	26
3. 6. 2 拡散反射成分の計算	27
3. 6. 3 鏡面反射成分の計算	27
3. 6. 4 GPU 上での画像生成手法	28
3. 7 実験	32

3. 7. 1	基準カメラの較正	32
3. 7. 2	未較正カメラによる色信号の推定結果	32
3. 7. 3	全方位分光画像の推定結果	37
3. 8	まとめ	41
第4章	分光画像圧縮に基づいた分光ベースレンダリングの高精細化	42
4. 1	本章の概要	43
4. 2	分光的な反射モデルと映像生成手法	45
4. 2. 1	分光ベースの光反射モデル	45
4. 2. 2	放射照度マップを用いた環境光源下でのレンダリング	46
4. 2. 3	人間の視覚系が受ける色刺激からデバイス RGB への変換	46
4. 3	分光画像データの圧縮と復号	47
4. 3. 1	従来法	47
4. 3. 2	提案手法による分光画像圧縮の原理	47
4. 3. 3	圧縮・復号アルゴリズム	47
4. 4	提案手法によるレンダリング手法と GPU への実装	49
4. 4. 1	提案手法の GPU への実装方法	49
4. 4. 2	データ圧縮	49
4. 4. 3	GPU を用いた分光画像の復号とレンダリング処理	50
4. 5	環境光源の空間分布（全方位の分光画像）の獲得	50
4. 5. 1	屋外（太陽光）の全方位画像の獲得	51
4. 5. 2	室内（蛍光灯）の全方位画像の獲得	51
4. 6	実験	51
4. 6. 1	屋外（太陽光）でのレンダリング	51
4. 6. 2	室内（蛍光灯）でのレンダリング	52
4. 7	まとめ	53
第5章	分光レイトレーシング法に基づいた相互反射の色再現手法	65
5. 1	本章の概要	66
5. 2	分光ベースの光反射モデルによる映像生成	68

5. 2. 1	物体表面の光反射のモデル化	68
5. 2. 2	人間の視覚系の応答とディスプレイへの表示	69
5. 3	レンダリングパイプラインへの光反射モデルの実装	70
5. 4	分光ベースのレイトレーシング	71
5. 4. 1	レイトレーシングのアルゴリズム	71
5. 4. 2	GPU へのレイトレーシング法の実装	72
5. 4. 3	レイトレーシング法的高速化	72
5. 5	分光画像圧縮によるレンダリング的高速化	74
5. 5. 1	データ圧縮アルゴリズム	75
5. 5. 2	GPU を用いた分光画像の復号とレンダリング	75
5. 6	照明環境を考慮した光反射計算	76
5. 6. 1	放射照度マップを利用した光反射計算	76
5. 6. 2	相互反射の計算	78
5. 6. 3	透過の計算	79
5. 7	実験	80
5. 8	まとめ	87
第 6 章 絹織物のデジタルアーカイブ手法		88
6. 1	本章の概要	89
6. 2	絹織物表面の光反射モデル	89
6. 3	絹織物表面の反射特性計測	90
6. 4	絹織物表面の反射特性推定	91
6. 5	絹織物表面の法線ベクトル推定	91
6. 6	画像生成手法	92
6. 6. 1	分光的な光反射モデルに基づいた画像生成システム	92
6. 6. 2	照明環境の計算手法	93
6. 7	実験	95
6. 7. 1	絹織物表面の光反射モデルパラメータ推定	95
6. 7. 2	絹織物表面の法線ベクトル推定	95
6. 7. 3	絹織物の分光ベース画像生成	95

6. 8	まとめ	96
第 7 章	スマートフォンを用いた分光反射率推定法	104
7. 1	本章の概要	105
7. 2	スマートフォンの分光カメラモデル	106
7. 3	画像からの分光関数の推定アルゴリズム	107
7. 3. 1	計測画像から分光関数を推定する手法	107
7. 3. 2	スマートフォンの撮影画像から分光関数を推定	108
7. 3. 2. 1	基準カメラの較正法	110
7. 3. 2. 2	基準カメラを用いたスマートフォンからの分光反射率の推定	111
7. 4	実験	112
7. 5	まとめ	119
第 8 章	結論	120
	謝辞	124
	参考文献	125

第 1 章

序 論

第 1 章 序論

1. 1 研究の背景と目的

近年では、美術品や文化遺産のデジタルアーカイブにコンピュータグラフィックス(CG)技術が用いられるようになってきている。こういった分野では映画やゲームなどのエンターテインメント分野と異なり、色の再現精度が重要な問題となる。こういったことは従来の CG 技術が十分に発展できていなかった分野である。たとえば従来のコンピュータグラフィックス技術で、実在するさまざまな物体を映像再現しようとするディスプレイやプリンタ上の映像と実物の色に大きな違いが生じる[1]。これは色再現精度が重要となる応用分野では致命的な問題となることが知られている。こういった問題を追及していくと、主に(1)反射モデルの精度、(2)RGB カラー情報に基づいた画像生成、という 2 つの大きな原因があることが知られてきた [1]。

まず物体の見えは物体表面の光反射に依存する。光反射を数学的にモデル化したものが光反射モデルである。CG で物体を 3 次元的に画像生成するためには、この反射モデルが必要となるが、物体の再現精度はこの光反射モデルの性能に依存する。また、このモデルに与えるモデルパラメータは対象物体の個々の特性に対応するため、物体の個々の特性に応じて精密に決定しなければならない。つまり、モデルベースで対象物体を精密に画像再現するためには光反射モデルとそのモデルパラメータをどのように決定するのかに大きく依存する。

たとえば光反射のモデル化が重要な例としては、絹などは独特の光沢をもち、それが視覚的に大きな特徴となっていることが挙げられる。これは絹がそれ独自の光反射特性を持つからである。このため絹を CG 再現しようとしても通常の光反射モデルでは、その反射特性を記述できないため実物と再現 CG の間で大きな視覚的違いとなって現れる。そして、仮に高精度な光反射モデルができたとしても個々の対象ごとに織り方や絹糸の太さ、染色方法等の個々の特性によっても見え方が異なる。これは光反射モデルに与える数値パラメータの違いとなって現れる。また、絹に限らず織物表面は織構造による複雑な光反射が生じるため、従来の CG 技術では精密に CG 再現することが難しいことが知られていることから、その反射特性を精密に表現する手法が求められている。

次に、2 つ目の問題として RGB カラー情報は映像デバイスや照明環境に依存するという問題がある。たとえば、撮影するカメラや表示するディスプレイが変われば画像の色が変わる。図 1.1 は実物と 2 つのデジタルカメラでそれぞれ撮影した画像の色の違いを比較したものである。この画像からデジタルカメラの特性によって表示される色が異なることが視覚的にわかる。図 1.2 は実物と三つのディスプレイデバイスの色の違いを比較したものである。この画像から同じ画像を表示してもディスプレイの色特性により再現色が異なっていることが視覚的に確認できる。これは RGB カラー情報が個々のデバイスの特性に依存することか

ら物理的根拠がないためデバイスごとに色が変わってしまうことが原因である。また、照明光の種類を太陽光から白熱電球というように変更しても画像上の色は変わってしまう。この場合、物体の色の見え方もシーン環境に依存するため、シーンの影響を考慮しなければどの色も正しく対象を再現できていないといえる。

こういった色再現の問題に対しては色の表現方法から言及しておく必要がある。まず一般のカラーデバイスにおいては色の三原色説に基づいて3つの原色 RGB(Red, Green, Blue)あるいは、その補色 CMY(Cyan, Magenta, Yellow)といった三つの色の合成ですべての色の表現を行う。こういった三原色による色の表現は従来の映画やゲームといった目的では十分な表現性能を持っていたが精密な色再現においてはその限界が指摘されている[2]。こういった問題に対して、精密な色再現のために分光情報に基づいて色再現手法が提案されるようになってきた[2]。通常の RGB カラー情報は Red, Green, Blue の3次元の要素によって色の表現や計算が行われるが、分光情報は電磁波の可視波長域での電力スペクトルの分布で表現される。通常、コンピュータではこれらの情報は波長に対して離散化して使用する。分光情報は RGB などの三原色情報と比較して圧倒的に多くの情報を持つ上、さらには光源の分光分布や物体の分光反射率などの分光情報は、それぞれ物体固有の物理特性であるのでデバイスや照明光源には依存しないという利点がある。

これまでも分光情報に基づいた画像生成手法[3]が提案されているが、それらの多くは主に薄膜の干渉光や虹などの特殊な物理現象の表現に用いられてくることが多く、色再現に使われた例は少ない。

本研究ではこういった背景に基づいて様々な光反射特性を持つ美術品を高精度に3次元コンピュータグラフィックス(3DCG)で再現するためのデジタルアーカイブ手法を提案する。デジタルアーカイブとは美術品や文化財の情報をデジタルデータとして記録することである。デジタル情報は経年等で劣化することなく情報を半永久的に保存できる。美術品を記録する場合、その記録方法はデバイス依存する情報を記録するのではなく、客観的な物体固有の物理情報で記録することが望ましい。

本論文では、文化財や美術品の情報を高精度かつ客観的な情報としてデジタル記録・画像再現することを目的として、計測データと分光情報に基づく3次元コンピュータグラフィックスの生成手法を提案する。特に従来では難しかった織物のような複雑な光反射特性を持つ物体のデジタルアーカイブを目指す。

本提案では、高精度な画像再現をするために光反射モデルを用いて、それに与えるモデルパラメータは光反射計測に基づいて推定する[4]。さらに構築する光反射モデルはデバイスや照明環境に依存しない分光情報に基づいたモデルを提案する[5]。このとき分光情報に基づくレンダリングは計算量が莫大に増えるため、提案手法を Graphics Processing Unit(GPU)と呼ば

れるグラフィックス処理専用ハードウェアに実装する手法を提案する。また、この GPU に最適化したレンダリングアルゴリズムを提案する[7]。そして、光反射特性を計測するための手法と計測系を設計し、高精度に反射モデルパラメータを推定する。

それから本論文では実際の美術品として絹織物を対象として 3 DCG 再現する手法を述べる。絹織物独特の光沢を記述できる光反射モデルを構築し、そのモデルパラメータを決定する計測手法を提案する。このとき色の計測精度を向上させるために通常の RGB カメラによる画像計測に加え、くし型分光透過フィルタを用いた 6 バンドマルチカメラを用いた計測系の試作と推定手法を提案する。

この研究成果による応用範囲は美術品のデジタルアーカイブだけではなく、ファッション分野などでのデザイン支援や化粧分野、工業的な利用目的のための高精度な色再現にも応用が可能である。また、本手法は光源の演色性も含む物体の CG 再現が可能となる。たとえば、ファッションショーをする際のいわゆる演色性が高い光源や、波長変動の激しい蛍光灯、近年普及している LED ランプ、単色スペクトル光のナトリウムランプなど、従来の RGB カラーベースでは色再現が難しい光源環境での物体の画像再現に応用することができる。このことから、本研究では研究成果の応用例として、物体固有の分光反射率をスマートフォンで撮影した画像から推定するための手法を提案する。

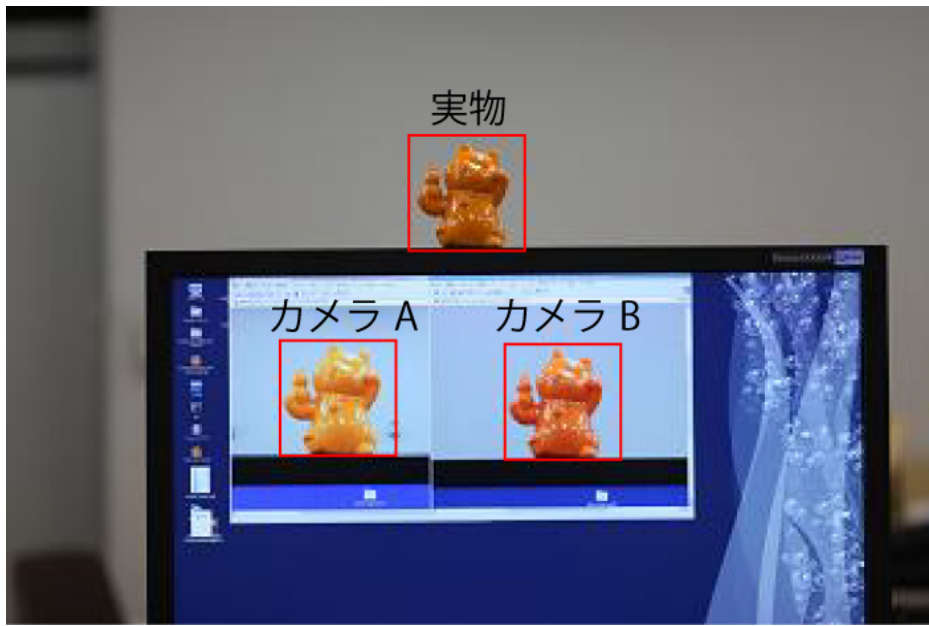


図 1.1 実物と二つのカメラで撮影した画像の比較

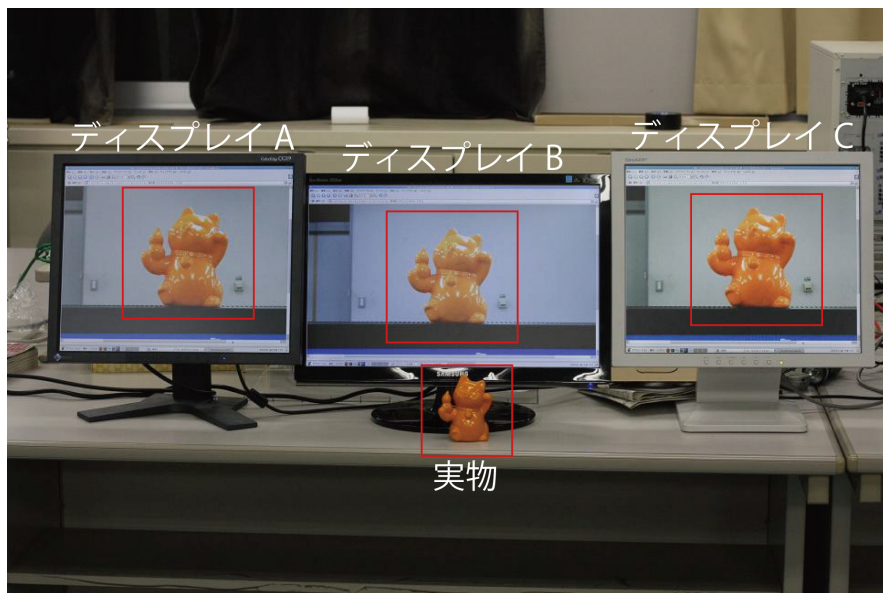


図 1.2 ディスプレイの違いによる色の比較

1. 2 本論文の構成

本論文は織物のような美術品の CG 再現を目標として美術品を分光情報と光反射モデルに基づいて 3DCG 再現するために必要な知見を述べる。全体を 8 つの章に分けて構成している。

序論では、本研究における背景、目的、本論文の構成について述べる。

第 2 章ではまず CG 分野でよく用いられる光反射モデルについて述べる。本研究の分光情報に基づいた光反射モデルの構築を提案する。まず、物体表面の光反射のプロセスについて幾何モデルを用いて述べる。次にプラスチックなどの不均質誘電体や鉄などの金属物体におけるそれぞれの反射の特性について述べ、構築した光反射モデルの特徴を述べる。

第 3 章では、物体の CG 再現に必要な照明環境情報を全方位の分光画像として推定する手法を提案する。魚眼レンズと RGB カラーカメラで計測した全方位画像から、全方位分光画像を簡便に推定する手法を提案する。この方法では分光的に較正したカメラの情報を再利用することで、特別な計測装置を用いずに他の分光感度が未知の RGB カメラで簡易的に全方位の分光分布を推定する。ここでは第 1 に基準となるカメラを分光放射輝度計とカラーチャートを用いて分光的に較正する。そして、第 2 に任意の RGB カメラを用いて全方位画像とカラーチャートを計測する。その画像を基準カメラの色空間へ変換することで任意の RGB カメラで計測した画像から全方位の分光画像を推定する。第 3 に推定した全方位分光分布を用いた Image Based Lighting (IBL) によるレンダリング手法を提案する。そのレンダリング性能を向上させるために全方位のシーン照明環境の放射照度マップを作成し、Graphics Processing Unit (GPU) 上に実装する手法を述べる。さらに物体をレンダリングするために全方位の光源分布と Torrance-Sparrow モデルに基づいた分光ベースの光反射計算手法を示す。最後に太陽光、白熱電球光、蛍光灯のそれぞれの照明環境下でシーン内の色信号を推定し、その精度を検証する。また、実際のシーンの全方位分光画像を計測し、IBL により分光的に照明された物体を CG 再現し、その精度を視覚的に検証する。

第 4 章では、分光ベースの反射モデルに基づいた物体の画像再現を高精細に行うための手法を提案する。そのために必要な環境光源を考慮した光反射モデルの拡張について述べる。次に分光画像の統計的性質に基づいた分光情報に適した圧縮方法を提案する。本手法の有効性に関しては、まずいくつかの基底関数で分光情報が記述できるかを調べ、圧縮率とともに圧縮前と圧縮後の分光画像の画質の比較をする。さらに、実際に GPU 上で分光画像をマッピングしながら 3DCG を生成して、圧縮前と圧縮後のレンダリングした際の実速度を検証し、本手法の総合的な有効性は提案手法でのレンダリングを行って視覚的に検証する。

第 5 章では、透過や多重反射を含む物体を精密かつ高速に CG 再現することを目的として、GPGPU (General Purpose Graphics Processing Unit) を用いた分光ベースのレイトレーシング手法を提案する。分光ベースの反射モデルに基づいて GPU 上のフラグメントシェーダにレイトレ

ーシング法を実装する。そして、分光画像を用いた IBL による全方位照明光源下でのレンダリングは速度を高速化するために放射照度マップを用いて行う。本研究では GLSL と呼ばれるシェーディング言語を用いてグラフィックス API のレンダリングパイプラインに依存しない分光ベースのレイトレーシング法を実装する手法を述べその速度を検討する。

第 6 章では、前章で述べた手法に基づいた具体的な美術品の 3 次元デジタルアーカイブの応用の一つとして絹織物を対象とする。絹織物は独特の光沢を持つため、その表面の反射特性を定量的に示すことが難しい。この理由は絹織物の蚕糸独特の光反射特性に加え、織構造により織物表面の光反射が複雑になるためである。従来法では、定量的なモデル化手法が存在しないため、こういった複雑な光反射光強度分布について、その Bidirectional Reflection Distribution Function(BRDF)を全方位について計測して、それを直接用いる方法が多く使われているが、これは計測データが膨大になる上に計測時と同じ条件でしか光反射を再現できないという問題点がある。本研究では、絹織物を精密に CG 再現するために分光感度が未知のマルチバンドカメラと光反射計測系を用いて物体表面の分光反射率と反射モデルを同時に推定する手法を提案する。この方法は色票などから構築した分光反射率のデータベースから少数の基底関数で物体表面の分光反射率が記述できる性質を利用し、分光反射率とカメラ出力の間のシステム変換マトリックスを求める。このシステム変換マトリックスは、カメラデバイスの分光感度特性と照明光源の分光分布の影響を含んでいるため、これらの影響を除去して純粋な分光反射率だけを推定できる。次に物体表面の反射特性として反射モデルパラメータは様々な照明と受光角度に対する画像計測から推定する。最後に提案手法の妥当性は、推定した値を用いて実際の物体を実際のシーンの照明環境下で CG 再現して、実物と再現 CG を比較により検証する。

第 7 章では第 6 章までに述べたアルゴリズムを用いたスマートフォン用の簡易的な分光反射率推定手法を提案する。ここでは応用例として、デザイン材料の視覚的特性を分析するデザインサポートツールを開発することを想定する。画像からデザイン材料の様々な情報を得るために、物体固有の物理情報である分光反射率を用いる。本研究では有限次元線形モデルと基準カメラを用いた較正法に基づいたスマートフォンのハードウェアに適した分光反射率の推定アルゴリズムを提案する。このアルゴリズムは分光光度計のような特殊なハードウェアを用意しなくてもスマートフォンで分光反射率が推定できる。最後に、分光反射率の提案手法による推定結果と分光光度計で直接計測した計測値を比較する。

第 8 章では、本研究の結論を述べる。

第 2 章

光反射のモデル化と反射特性の定量化

第2章 物体表面の光反射モデル構築

2.1 光反射モデル

物体が見える原理は，光源から出た光が物体表面で反射し，それが視覚系に到達し，その光の刺激を脳が色として認識することである．この光反射のプロセスを数学的に記述したものは光反射モデルと呼ばれる．本研究では，物体表面の光反射の特性を物理的に詳細に求めるために分光情報に基づいた光反射モデルで記述する．本研究では主に不均質誘電体と金属物体それぞれについてモデル化を行う．不均質誘電体の物体の光反射は拡散反射成分と鏡面反射成分で構成される2色性反射特性を持つ．また，金属表面は鏡面反射のみで構成される一色性反射特性を持つ．本章ではこれら2つの対象のモデル構築を行う．光反射モデルは主に光源，物体，視覚系の三者の幾何情報と物体表面の反射特性により構築される．このとき物体表面の幾何情報は形状データとして与える必要がある．図2.1は3次元形状データをポリゴンメッシュで表現した例である．コンピュータ上での物体の画像再現は，このような3次元形状データに光反射モデルを適用して色の計算を行う．

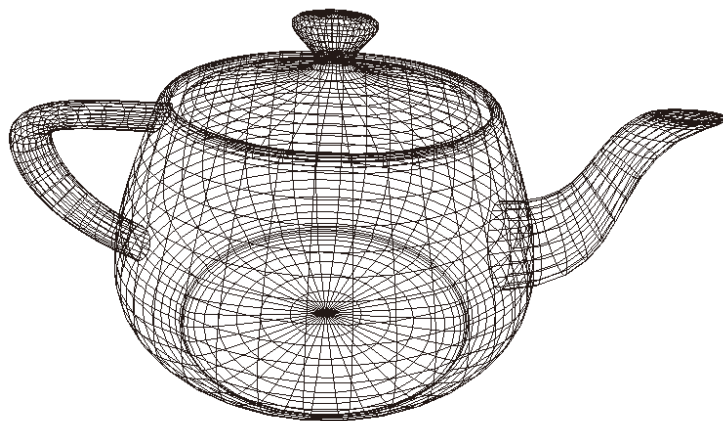


図 2.1 物体のポリゴンメッシュ

(1) 拡散反射モデル

拡散反射は光源から物体表面に到達した光が一度物体内部に入り、乱反射して再度物体表面に出てきたものである。反射光は全方位に均等に反射する。このとき物体表面内の色素により、光の特定の波長成分が吸収され分光分布に偏りができ、これが物体固有の色となる。反射光が全方位に均等に反射することから反射光強度は視線方向ベクトルに依存せず、照明方向ベクトルのみに依存することが特徴である。視覚的には物体色として見る事ができる。図 2.2 は拡散反射モデルを用いて再現した画像である。このように光沢を含まない艶を消した物体表面が確認できる。理想的な拡散物体の反射特性を記述した反射モデルは Lambert モデルである。これは一般に知られている Lambert の余弦則で光反射をモデル化したものである。図 2.3 は拡散反射の幾何モデル図である。また図 2.4 はこの拡散反射を Lambert モデルで記述した光束の幾何モデル図である。この図では物体の法線ベクトルは \mathbf{N} 、光束の幅は l 、物体表面に投影された光束による照射幅は l' である。 l と l' のなす角が θ_i である。この図からわかるとおり垂直入射では $l=l'$ となり入射角度が大きくなると l' が大きくなる。光束が持つ光子の量は一定であるため l' が大きくなると、 l と l' の比率により照射面が暗くなる。この入射角度に応じて照射面が暗くなっていく現象は物体表面の陰影として確認できる。このような Lambert モデルに基づいて拡散反射成分を分光的に記述すると(2.1)式ようになる。

ここで $C(\lambda)$ は視覚系に到達する色信号、 $S(\lambda)$ は物体表面の分光反射率、 $E(\lambda)$ は光源の分光分布である。 λ は光の波長を示す。 α は拡散反射成分の重み係数である。

$$C(\lambda) = \alpha \cos \theta_i S(\lambda) E(\lambda) \quad (2.1)$$

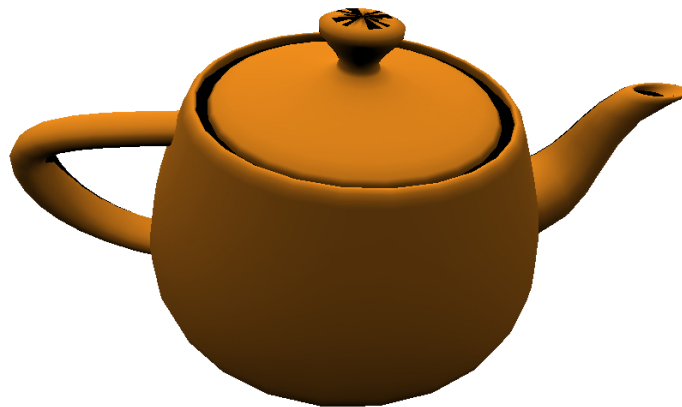


図 2.2 拡散反射の例

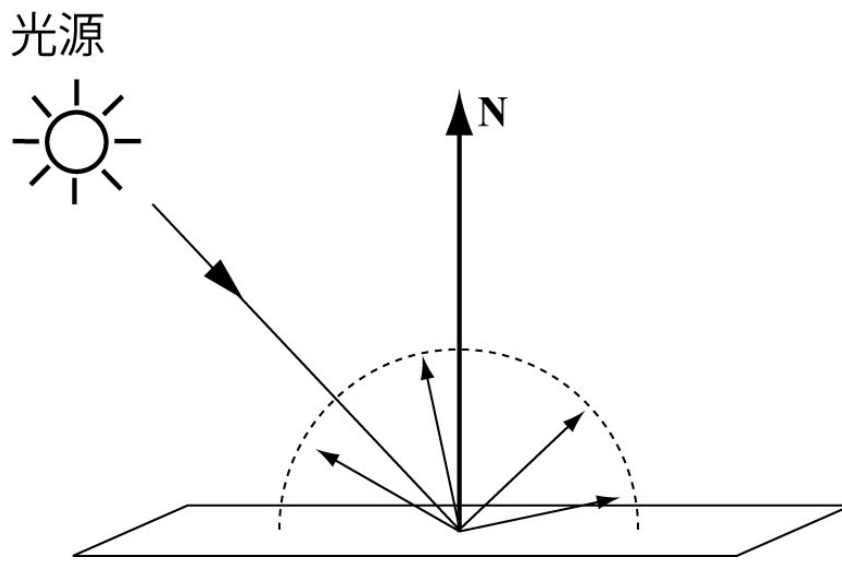


図 2.3 拡散反射の幾何モデル図

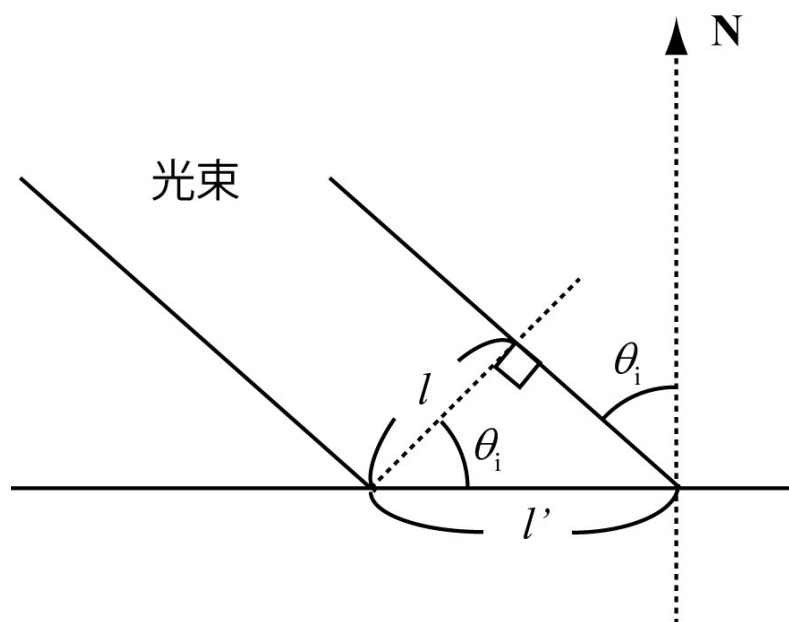


図 2.4 光束の幾何モデルで示した Lambert モデル

(2) 鏡面反射モデル

鏡面反射は光源から物体表面に到達した光が物体表面で直接反射したものである。照明方向ベクトルと視線方向ベクトルの両方に依存して反射する光のことである。滑らかな面であれば、光源から到達した光束は反射点における法線ベクトルに対して正確に正反射方向に反射する。この反射の様子は視覚的には鏡に映る像として確認できる。しかし、多くの物体は表面が粗い面として成り立っており、反射光はある一定の範囲に分散する。これは視覚的にはハイライトとして確認できる。このような分布を持つ鏡面反射は照明方向ベクトルの正反射方向ベクトルであるとき最も強い反射強度となる。この光反射のプロセスを表現するための光反射モデルとして CG 分野では Phong モデルがよく用いられている。Phong モデルは Phong が鏡面反射成分の反射の様子を経験的に求めたものであり、物理的な根拠が乏しいという問題点が指摘されているが、簡易なモデル式で比較的リアルな映像生成が可能である。図 2.5 は Phong モデルの幾何モデル図である。ここでは視線方向ベクトルは \mathbf{V} 、物体の法線ベクトルは \mathbf{N} 、照明方向ベクトルは \mathbf{L} 、照明方向ベクトルの正反射方向ベクトルは \mathbf{L}' で表す。 \mathbf{L}' と \mathbf{V} のなす角が φ である。Phong モデルを分光的に記述すると(2.2)式のようなになる。ここで β は鏡面反射成分の重み係数である。 n は鏡面反射の指数である。 λ は光の波長を示す。Phong モデルは反射光分布を指数で表現するため簡易なモデルということができる。

$$C(\lambda) = \beta \cos^n \varphi E(\lambda) \quad (2.2)$$

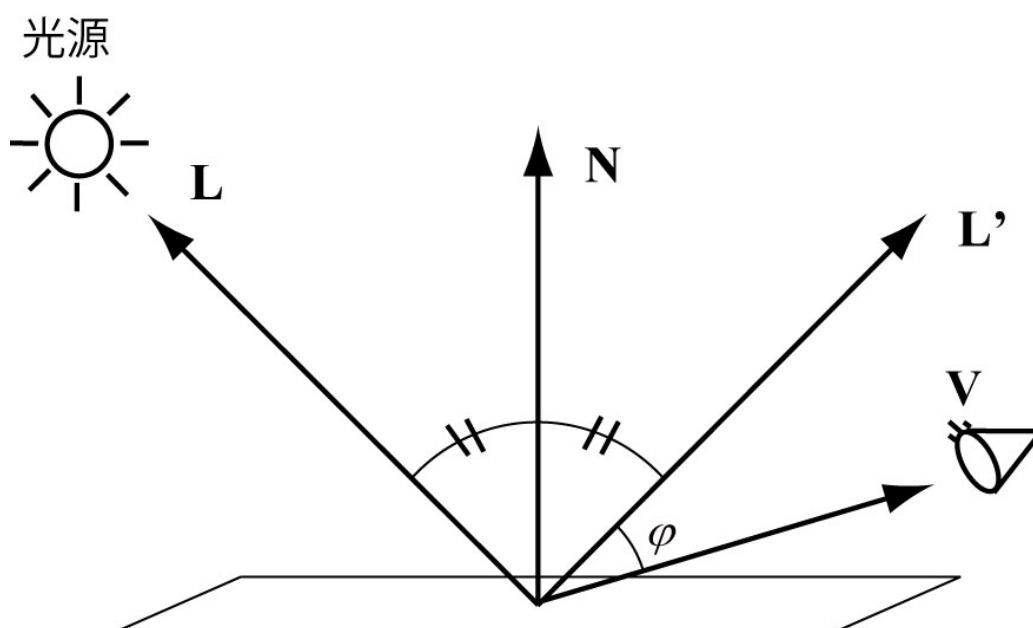


図 2.5 Phong モデルの幾何モデル図

2.2 本研究で使用する光反射モデル

先にも述べたとおり Phong モデルは物理的に光反射のプロセスを記述しているものではないため、本研究が目的とする精密な色再現には不向きである。特に入射角や受光角といった幾何条件が大きく変化するような状況下では、実際の物体表面で発生する光反射の変化に追従できない。つまり、Phong モデルではこういった幾何的な条件が変化するような環境下では物体の精密な画像再現が難しくなる。

そこで本研究は光学的に精密な光反射の物理モデルとして開発された Torrance-Sparrow モデル[6]を採用する。このモデルは粗い表面を対象に光束をモデル化して反射光強度を記述している。そのためこのモデルでは幾何条件が大きく変化するような環境下であっても正確に光反射強度を再現することができる。しかしながら、このモデルは物理的に詳細であるため複雑な構造を持つモデルとなり、また必要なパラメータの数も多いため、複数のパラメータを安定的に求めることが必要となる。

図 2.6 は Torrance-Sparrow モデルに基づいて構築した光反射の幾何モデルである。反射の幾何モデルは、照明、物体、視覚系の 3 者の幾何的な関係で記述する。ここでは視線方向ベクトルは \mathbf{V} 、物体の法線ベクトルは \mathbf{N} 、照明方向ベクトルは \mathbf{L} で表す。このとき \mathbf{N} と \mathbf{L} のなす角は θ_i 、 \mathbf{N} と \mathbf{V} のなす角は θ_r となる。また、このモデルでは物体表面が微細な凹凸で構成されていると仮定しており、微小面の法線ベクトルは \mathbf{H} である。 \mathbf{L} と \mathbf{H} のなす角は θ_H である。 \mathbf{N} と \mathbf{H} のなす角が ϕ である。

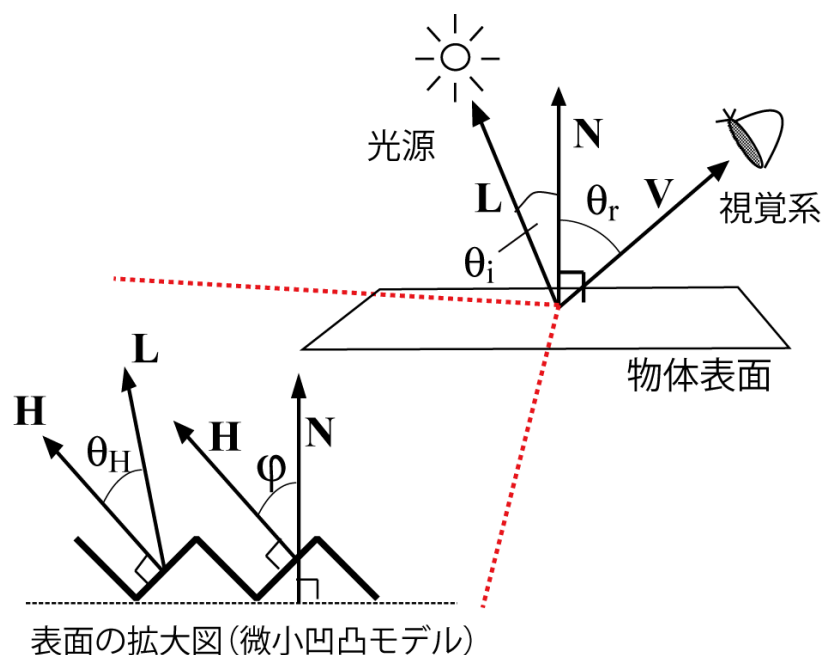


図 2.6 反射の幾何モデル

2.3 不均質誘電体の反射モデル

プラスチック、革製品、塗料、木材などの多くの物体が持つ表面反射は、物体色として見える拡散反射成分とハイライトとして見える鏡面反射成分によって構成されている。図 2.3 は不均質誘電体を示す画像である。黄色く見える物体色と、鏡面反射成分である白いハイライト部分があるのがわかる。一般的な不均質誘電体は、このように2つの反射成分を持つ。この物体表面の光反射のプロセスを Torrance-Sparrow モデルで記述すると(2.3)式のようになる。ここで右辺第1項は拡散反射成分を示し、第2項は鏡面反射成分を示す。 $C(\lambda)$ は視覚系に到達する色信号、 $S(\lambda)$ は物体表面の分光反射率、 $E(\lambda)$ は光源の分光分布である。 λ は光の波長を示す。 α 、 β はそれぞれ拡散反射成分、鏡面反射成分の重み係数である。 n は物体表面の屈折率である。 F は Fresnel 関数であるが、ここでは不均質誘電体用に簡略化したものを用いた。 D は表面の滑らかさを表す微小面の分布関数である。 G は微小面による幾何的減衰係数である。ここで粗さパラメータ μ を導入して表面の粗さを表現する。

$$C(\lambda) = \alpha \cos \theta_i S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(n, \theta_H) D(\mu, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_r} E(\lambda) \quad (2.3)$$

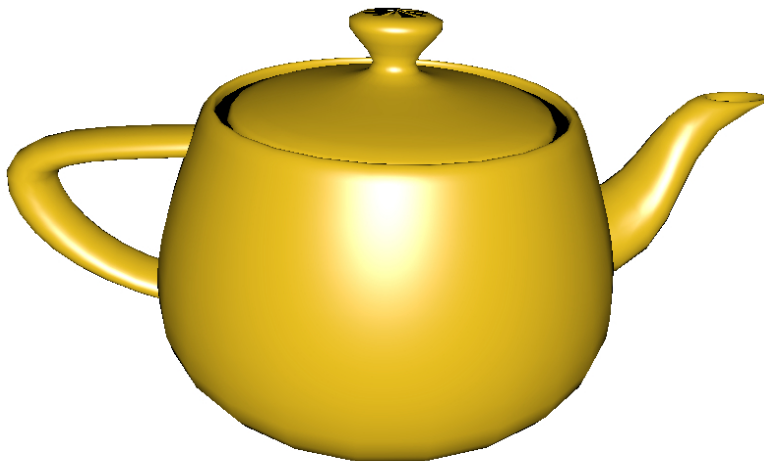


図 2.7 不均質誘電体の例

2.4 金属の反射モデル

人間の視覚系において金属光沢は、単色では認識できないことが一般に知られている。たとえば、金属が写っている画像から、その部分の任意の一画素をサンプリングし、その画素の RGB 値を用いてカラーパッチ等を作成して表示しても金属物体には見えない。図 2.8 は、たとえば、そのカラーパッチは金なら黄土色、銀や鉄なら灰色、銅なら茶色に見え、人間の視覚は金属とは認識することが難しくなる。しかし、再びサンプリングした色で元の物体だけでなく、別の物体を 3 次元的にレンダリングすると、人間の視覚はそれらの物体を金属と認識する。このことから人間の視覚は、単に色だけでなく、金属独特の 3 次元的な反射の様子から対象を金属であると認識していると考えられる。つまり、金属物体の表示には単色表示ではなく 3 次元的な表示が必要であるといえる[5]。

ここでは、さらに提案モデルを金属反射にも適用できるように改良する。金属は鏡面反射成分のみを持つ 1 色性の反射特性を持つ。こちらにも不均質誘電体と同様に粗さにより 2 種類の鏡面反射が存在する。金属は極めて強い反射率を持ち、さらに入射する光の角度により色の変位するカラーシフトと呼ばれる現象が発生する。金属表面はその表面に存在する自由電子の励起により金属独特な光沢が生じる。また金色や銅色などの金属固有の色は、励起と呼ばれる金属表面の自由電子のエネルギー準位が高位の準位に変わることにより発生する。このときエネルギー準位を変えるために入射光から特定の波長成分のエネルギーが奪われるが、これにより金属光沢は発色する。3DCG で画像生成を行う時は直接これらの自由電子の励起をシミュレートするのではなく、Fresnel 反射モデルを用いて幾何的に金属反射を記述する。このとき自由電子の励起によって発生する金属光沢の波長依存性は Fresnel 反射モデルに与える波長毎の複素屈折率によって記述する。屈折率は電磁気学分野というよりもむしろ幾何学分野において見いだされたものであるが、この屈折率は物体表面の誘電率など電磁気学的性質と高い関係性があることが知られている。これにより Fresnel 反射モデルにより金属表面における鏡面反射成分の反射率が波長ごとに異なる性質でカラーシフトを含めて記述できる。このように金属の色は鏡面反射の色で決定される。このときの金属表面で光が反射し、視覚系に到達したときの色信号 $C(\lambda)$ は(2.4)式のように記述できる。

ここで金属の場合は屈折率が波長に依存し、複素数としての屈折率を持つ。屈折率は波長 λ の関数として、実数項は $n(\lambda)$ 、虚数項は $k(\lambda)$ となる。ただし、 $k(\lambda)$ は吸収係数とも呼ばれる。ただし実際の物体表面は微細な凹凸が存在し、その表面粗さは多様である。この微細な凹凸により幾何的に反射光強度が変化する。ここで粗さパラメータ μ を導入して表面の粗さを表現する。

$$C(\lambda) = \beta \frac{F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_H) D(\mu, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_r} E(\lambda) \quad (2.4)$$



図 2.8 金属の単色表示の例（左から金，鉄，銅）

第 3 章

RGB カメラによる全方位分光画像計測と IBL への応用

第3章

3.1 本章の概要

実シーンを照明する光源環境を知ることは重要である[8,9]. 物体の見え方は物体そのものだけでなく、その周囲の光源環境に大きく依存する. 任意のシーン内で物体を精密にCG再現するためには、そのシーン内の複雑な照明情報を知ることが必要である. このような問題に対してコンピュータグラフィックス(CG)の分野では Image Based Lighting(IBL)と呼ばれる手法が一般的に使われている[10]. この手法は画像情報を直接的に光源の空間分布として利用する. IBLでは周囲の環境光源を画像計測し、その情報に基づいてCG内の仮想物体を照明するが、照明光源の空間分布は画像情報として保持するため高い空間解像度で照明情報を使用することができる. 通常IBLはデジタルカメラと鏡面球や魚眼レンズなどの全方位計測系とを組み合わせ、全方位の光源情報を画像として獲得する手法である[9-12].

このとき従来のRGBベースのIBLでは美術品のデジタルアーカイブや化粧品開発などでの色再現精度を重要視した分野での利用が難しい. 一般的に用いられるRGBカラー情報は、単純に情報量が不足するという問題だけでなく、カメラの感度特性などの撮影環境の影響を大きく受けるという問題が生じる[9,13,14]. つまり、撮影により得られたRGB情報が計測機器の特性に依存するため、実物をCGとして再現した場合、その機器の特性によって色のずれや色再現精度の低下が生じてしまうという問題がある. そういった問題に対して、分光情報は物理情報であるため機器の特性には依存しないという利点がある. このためIBLで使用する全方位画像に分光画像として獲得できれば、色再現が重要となる分野においてIBLの応用が飛躍的に広がることが期待できる[12].

このとき通常のカメラはRGBカラー情報しか得られないため、分光情報などの高次元情報の計測が難しい. 特に分光画像計測にはカメラの分光感度特性を事前に調べて、その影響を除去するための較正作業(キャリブレーション)が必要である[9,13,15]. また、カメラも通常RGBカラーカメラではなくマルチバンド化することが一般的である[9,14]. このカメラ感度特性の較正は分光放射輝度計とモノクロメータを用いた大掛かりな計測設備と労力が必要になるという問題があるため、一般に分光画像計測は手軽にできない. これまでも全方位の分光画像計測手法は提案されているが、こういった較正の難しさの問題は解決されていない[9]. このため広く普及している市販のデジタルカメラで簡便に全方位の分光分布が推定できれば極めて有用である. さらに、このときシーンが変われば、光源が異なることが想定される. そこで異なる光源環境においても、一度計測した別のシーンの情報を再利用して、分光画像計測できることが求められる.

本研究では、一般的な未較正のRGBデジタルカメラを用いてIBLに必要な全方位の光源分布を分光画像として獲得する手法を提案する[16]. 本研究の特徴は分光分布推定の容易さ

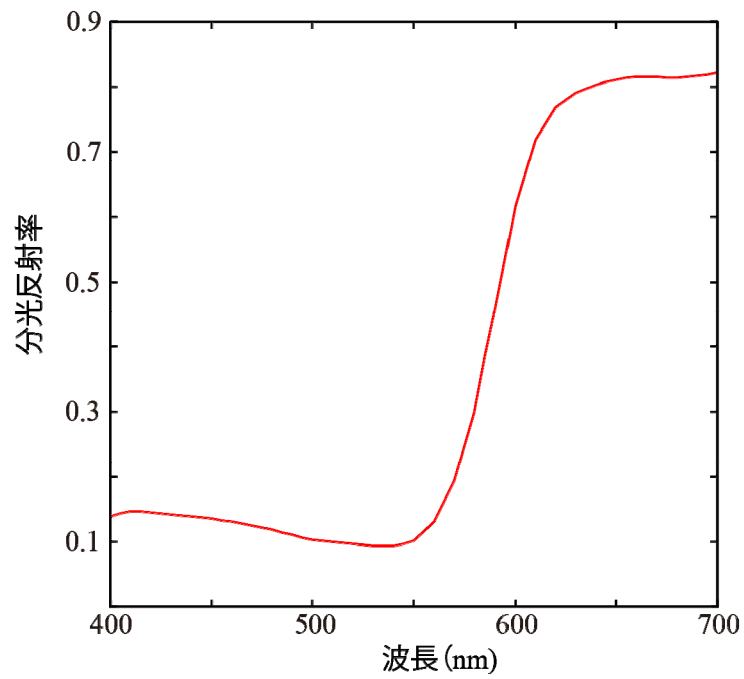
に加えて、別の種類の光源を持つシーンに対しても大規模な追加計測をすることなく容易に対応できる点である。そして、その推定した全方位分光画像を用いて、分光ベースの IBL を実現する手法を提案する。

最初に全方位の分光画像計測では、シーン中の太陽光等の主たる光源（支配的な光源）の種類が一種類と仮定することでシーン内の全方位分光画像計測を簡便化する手法を提案する。提案する手法は、①事前にカラーチャートと分光光度計を用いて基準となるデジタルカメラの RGB 出力から分光分布のシステム変換マトリックスを構築、②Macbeth 24 色のカラーチャートを用いて任意のデジタルカメラの RGB 出力を基準カメラの RGB 空間に変換、という 2 つのステップから成る。この時、①の手順では分光放射輝度計等の特殊な計測機器が必要となるが、一度較正を行えば構築したシステム変換マトリックスは②の手順とは独立しており依存関係がないため、異なる光源下においても利用可能となる。本手法の特徴的な点は、一般に使用される任意の未較正 RGB カラーカメラを用いながら、基準カメラのシステム変換マトリックスを用いることで全方位の分光画像を簡便に推定できることである。ただし、本研究では分光画像計測の簡便さを向上させることが目的であるため、カメラメタメリズム [15]（カメラ出力の色恒常性）の問題は取り扱わない。

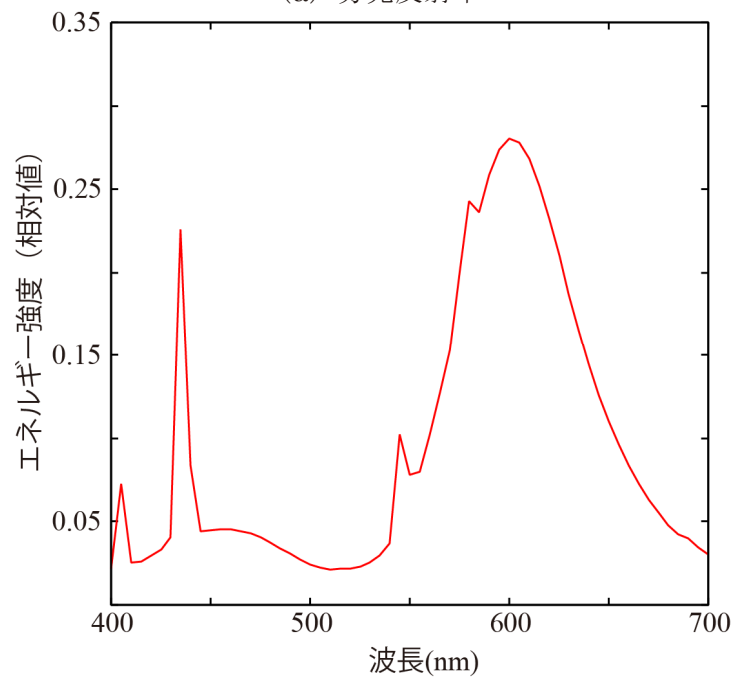
さらに本研究では推定した全方位の分光画像で分光ベースの IBL を実現した上で、物体を 3DCG 再現する手法を提案する。本手法の妥当性は、分光放射輝度計で直接計測した分光分布と提案手法により推定した分光分布の推定値を比較することによって示す。最後に提案手法で計測した全方位の分光画像を用いた IBL により分光ベースレンダリングで実際の物体を CG 再現して、その再現精度を確認する。

3.2 実シーン照明環境における分光分布

全方位の照明光分布は、光源からの直接光だけでなくシーン中に存在する物体表面で反射した間接光も考慮する必要がある。視覚系に到達する光の分光分布は色信号(Color signal)と呼ばれているが、本論文ではカメラ系に入射する分光分布を特に区別して色信号と記述する。このとき一般的な物体の分光反射率は、波長変動が比較的少ないことが知られている。しかし、実シーンにおいてカメラ系に入射する分光分布(色信号)は必ずしも波長変動が滑らかとは限らない。例えば、一般の物体表面の分光反射率は図 3.1(a)で示すように比較的滑らかな特性を持っており、分光情報を低次元情報で計算する場合の前提条件として用いられることが多い[17]。しかし、蛍光灯などの波長変動が激しい光源が存在するシーン中では、図 3.1(a)の分光反射率を持つ物体からの反射光は、視覚系に入射したとき図 3.1(b)のようにスパイク状の色信号が観測される。このことから低次元情報では精度誤差が生じやすくなるため、高次元情報として扱う必要がある。



(a) 分光反射率



(b) 色信号

図 3.1 分光反射率と蛍光灯照明下での物体から得られた色信号の例

3.3 カメラモデル

3.3.1 カメラの幾何モデル

本研究では全方位の分光画像をカメラモデルに基づいて推定する. ここではまず全方位を計測するために用いる魚眼レンズの幾何モデルについて述べる. 魚眼レンズは全方位計測系として幾何補正が容易で鮮明な画像を取得できるという利点がある. 魚眼レンズは一般に $150^{\circ}\sim 200^{\circ}$ の視野角を持つ特殊なレンズであり, 魚眼レンズと一般的なカメラレンズは, 視野角ではなく射影方式で区別される. 一般のレンズが中心射影であるのに対して, 魚眼レンズは等距離射影方式や等立体角射影方式となっている. 魚眼レンズの幾何モデルを図 3.2 に示す. 図 3.2 では魚眼レンズの幾何とともに 3 次元空間 XYZ 上に存在する座標 P が画像上の 2 次元空間 xy 上の座標 p へ射影する様子を示す. 等距離射影の魚眼レンズの射影は $r=f\theta$ で示される. ここで r は画像中の長さ, f は焦点距離, θ は方位角, φ は仰角である. 射影された画像は円形の画像として得られる. 画像中の距離がカメラから見た角度と対応しているため画像からは容易に照明方向角度 θ を推定することができる. これにより魚眼レンズで全方位の画像が計測できれば, 横 $\theta=360$ 度, 縦 $\varphi=180$ 度の全方位画像を生成することができ, 画像上の位置と照明方向の対応付けが容易になる. そして各画素が光源の分光分布 $E(\lambda)$ を持つことで全方位の分光画像となる(図 3.3).

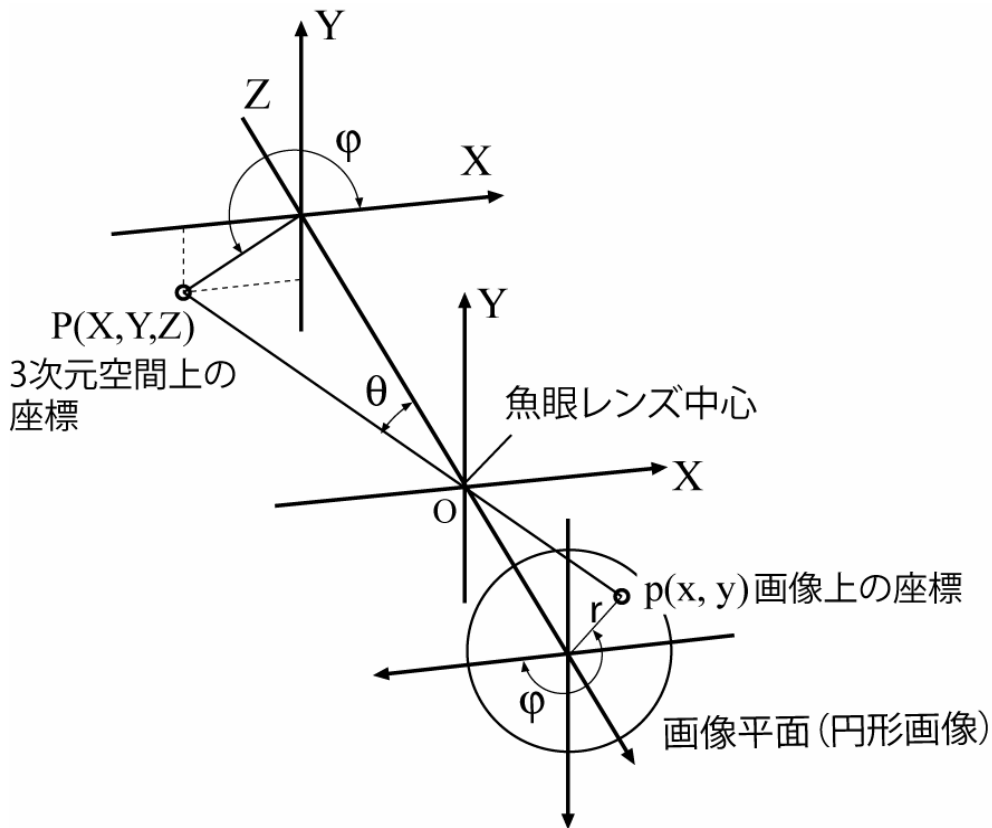


図 3.2 魚眼レンズの幾何モデル

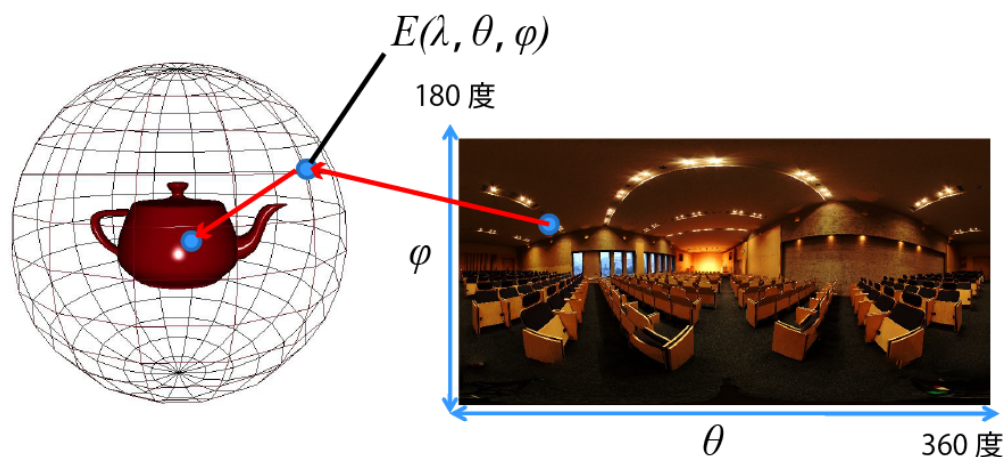


図 3.3 全方位の光源分布と画像の対応関係

3.3.2 カメラ出力の分光モデル

ここでは各画素のカメラ出力(RGB 値)の分光モデルを示す. 図 3.4 はあるシーンを RGB カラーカメラで計測したときのカメラ出力をモデル化したものである. カメラ系に入力する色信号 $C(\lambda)$ は, 光源からの直接光であれば光源の分光分布 $E(\lambda)$ を用いて, 直接光ならば $C(\lambda) = E(\lambda)$ となり, 一度物体に反射した反射光 (間接光) ならば $E(\lambda)$ と物体の分光反射率 $S(\lambda)$ を用いて, $C(\lambda) = E(\lambda)S(\lambda)$ と記述される. このように本研究では, 直接光と反射光などは区別せずに, 全方位画像の画素の値は全て色信号 $C(\lambda)$ として求める. 次に RGB カラーカメラのカメラ出力 ρ は RGB の 3 つの値を持つ 3×1 のベクトルで示し, カメラの分光感度は RGB それぞれのチャンネルに対して $R_R(\lambda), R_G(\lambda), R_B(\lambda)$ で示す. このとき一つの画素に対するカメラ出力 ρ を可視波長域(400nm-700nm)に関してモデル化すると(3.1)式のようなになる.

$$\rho = \int_{400}^{700} C(\lambda) \begin{bmatrix} R_R(\lambda) \\ R_G(\lambda) \\ R_B(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (3.1)$$

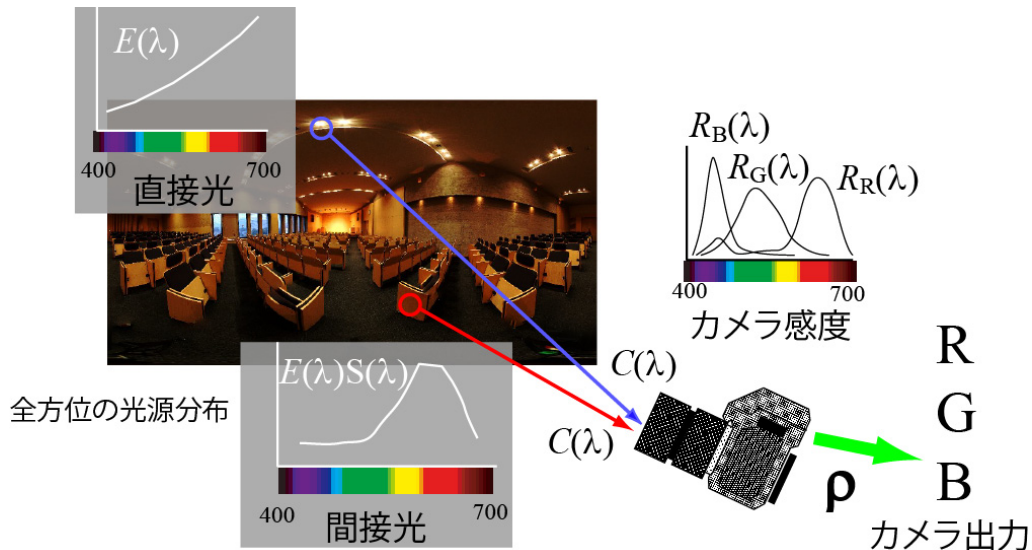


図 3.4 カメラ出力の分光ベースのモデル化

3.4 光源の分光分布の推定

本研究では分光分布の推定を二段階に分けて行う。最初の段階で、特定の光源環境に依存したカメラ較正を行い高精度の分光分布推定を行う。二段階目では、その較正情報を用いて任意のカメラ、任意の照明環境にも適用できるように拡張する。この方法の特徴は、一度基準カメラが求めれば、任意のカメラで撮影した画像をその基準カメラの色空間に変換するだけで分光分布の推定が可能になることである。ここでは第一段階の手法を述べる。

3.4.1 分光分布の推定手法

本研究では太陽光等、シーン中に存在する主たる光源の種類が一種類と仮定することでシーン内の全方位の分光画像計測を簡便化する。本研究で提案する手法ではカメラの分光感度を直接計測するのではなく、カメラ出力から簡易的に推定する。その情報に基づいて直接カメラ出力から分光分布（カメラ系に入射する色信号）を推定する。このときカメラ出力から分光分布への変換は、システム変換マトリックスと呼ばれる線形変換マトリックスが用いられる。このシステム変換マトリックスは、カメラの分光感度特性を含んでいるため、個々のカメラに固有のものとなる。そこであるカメラのシステム変換マトリックスを求める。本研究では、このシステム変換マトリックスが求まっているカメラを基準カメラと呼ぶ。

3.4.2 基準カメラのシステム変換マトリックス

これまでの研究ではカメラ出力から直接分光情報を推定する手法としては、Schmitt らの方法[16]が知られているが、この方法は分光反射率とカメラ出力の関係が線形であると仮定して、多数のカラーパッチを用いて、それらの分光反射率とカメラ出力の組から統計的手法により、変換行列を求める方法である。この変換行列はシステム変換マトリックスと呼ばれ

ている.

本研究でも同様に多数のカラーパッチを用いるが, 分光反射率ではなく色信号を推定する. また, 主たる光源が一つと仮定して分光分布推定を単純化する. まずカメラに入射する色信号からカメラ系のシステム変換マトリックスを推定する. 本研究では蛍光灯などにも適用できるように分光情報は, 可視波長域(400nm-700nm)を 5nm 間隔でサンプリングした. 61 次元のベクトルを扱う. ここで具体的な処理方法を示す. カメラに入射する色信号は 61×1 の行列 \mathbf{c} と示す. カメラの分光応答は RGB3 つの感度関数を持つ場合 61×3 の行列 \mathbf{t} , カメラ出力は 3×1 の行列 \mathbf{p} とする. \mathbf{c} , \mathbf{t} , \mathbf{p} の 3 者の関係は直接光と間接光を区別せずに同じ色信号として扱うことを前提条件とすることで, (3.2)式のように単純化できる.

次に多数の色信号とカメラ出力の組から線形変換のための変換行列を求める. このとき m 個の分光分布の組は $m \times 61$ の行列 $\mathbf{\Lambda}$, それに対応する m 個のカメラ出力の組は $m \times 3$ の行列 \mathbf{P} とすると $\mathbf{P} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{t}$ という関係になる. ただし, 61 次元ベクトルで計算するため $m \geq 61$ でなければ解が求まらない. このとき未知なカメラの分光応答関数 \mathbf{t} は $\mathbf{\Lambda}$ の一般化逆行列 $\mathbf{\Lambda}^+$ を用いて (3.3)式で求める.

次に RGB カラー画像からカメラデバイスの特性を除去し, 純粋にカメラ系に色信号として入力した分光分布情報を獲得するための方法を示す. 本研究の仮定に基づいてカメラの色信号は分光分布と等しいとすると, 光源分光分布の行列 61×1 の \mathbf{e} は $\mathbf{e} = \mathbf{c}$ であるのでカメラ出力 \mathbf{p} と分光応答関数 \mathbf{t} の一般化逆行列 \mathbf{t}^+ を用いて (3.4)式のように単純な式で求めることができる. このとき \mathbf{t}^+ が基準カメラのカメラ出力から分光分布へ変換するためのシステム変換マトリックスとなる. ただし, この \mathbf{t} はカメラの分光応答を示すものであるが, カメラの純粋な分光感度関数ではなく, 光源の分光分布の特性を含んだものとなることに注意する.

$$\mathbf{p}^T = \mathbf{c}^T \mathbf{t} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{\Lambda}^+ \mathbf{P} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{e}^T = \mathbf{p}^T \mathbf{t}^+ \quad (3.4)$$

3.5 未校正カメラを用いた分光分布の推定

ここからは第二段階の分光分布推定手法について述べる. この段階では任意のカメラで撮影した画像の色空間を基準カメラの色空間に変換する. 変換後の画像から, 先に求めた基準カメラのシステム変換マトリックスを用いて色信号を求める.

3.5.1 基準カメラの分光感度の推定

まず未校正カメラを用いて分光分布を推定するために、基準カメラの分光感度を推定する。具体的には基準カメラのシステム変換マトリックスから光源情報を取り除いて純粋な分光感度を求める。その後、先に述べた(3.4)式により照明光源の推定が可能となるが、このままでは基準カメラで推定したシーン以外を推定しようとする、その別のシーンが異なる主たる光源を持つ場合には、光源の分光分布推定ができない。これはシステム変換マトリックス \mathbf{t}^{-1} が主たる光源の分光分布の特性を含んでいるからである。そこで以下の手順で異なる光源にも適用できる基準カメラのシステム変換マトリックスを生成する。

(1) カメラの分光感度関数の推定

まずカメラ出力 \mathbf{P} に対応する分光反射率の組 \mathbf{S} は、基準カメラで計測したシーンの主たる光源の分光分布 $E_0(\lambda)$ を用いて(3.5)式のように計算する。これに対して、カメラの純粋な分光感度関数 \mathbf{r} として計算できる。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} C_1(\lambda)/E_0(\lambda) \\ C_2(\lambda)/E_0(\lambda) \\ \vdots \\ C_m(\lambda)/E_0(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

(2) 異なる光源用のシステム変換マトリックス

一度、分光感度関数 \mathbf{r} が求めれば、(3.5)式で求めた \mathbf{S} と任意のシーンの主たる光源の分光分布から、任意の別の光源を持つシーンにおけるシステム変換マトリックスを生成することができる。ここでは新たに対象としたい別のシーンの主たる光源の分光分布 $E_n(\lambda)$ を用いて、新しい $61 \times m$ の色信号の組の行列 $\bar{\mathbf{A}}$ は $\bar{\mathbf{A}} = E_n(\lambda)\mathbf{S}$ となる。この色信号の組に対応する $m \times 3$ のカメラ出力の組の行列 $\bar{\mathbf{P}}$ は(3.6)式で求める。

これにより新たな光源 $E_n(\lambda)$ に対応したシステム変換マトリックス $\bar{\mathbf{t}}$ は (3.7)式のようになる。この場合、校正時と異なる照明環境下では、そのシーンでの主要な光源の分光分布 $E_n(\lambda)$ の情報が必要となるが、太陽光や白熱電球では、分光分布は国際照明委員会(CIE)で公開されている D65 光や A 光等の分光分布情報が使用でき、また、未知の光源であっても分光照度計のような比較的容易に入手できる計測機で計測できる。

$$\bar{\mathbf{P}} = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{r} \quad (3.6)$$

$$\bar{\mathbf{t}} = \bar{\mathbf{A}}^+ \bar{\mathbf{P}} \quad (3.7)$$

3.5.2 未校正カメラを用いた分光分布推定法

分光分布の推定は、未校正カメラで計測した画像を基準カメラの色空間に変換して、先に述べた基準カメラのシステム変換マトリックス $\bar{\mathbf{t}}$ を使用して行う。

まず k 色のカラーチャートを基準カメラと未校正カメラの両方で撮影する。ただし k は RGB3 原色よりも多い数が必要であるため $k \geq 3$ とする。基準カメラのカメラ出力の組みは $k \times 3$ の行列、未校正カメラのカメラ出力を $k \times 3$ の行列 \mathbf{P}_U とすると \mathbf{P}_U から \mathbf{P}_C への変換は、 3×3 の色変換行列 \mathbf{T} を用いて線形変換 $\mathbf{P}_C = \mathbf{P}_U \mathbf{T}$ により求める。このとき \mathbf{T} は行列 \mathbf{P}_C の一般化逆行列を用いて $\mathbf{T} = \mathbf{P}_U^+ \mathbf{P}_C$ として推定できる。ここで \mathbf{T} を用いて未校正カメラの 3×1 のカメラ出力行列 \mathbf{p}_U から分光画像の各画素に格納される分光分布 \mathbf{e} は(3.8)式のように求めることができる。ここで基準カメラのシステム変換マトリックス \mathbf{r}^{-1} と、色変換用カラーチャートのカメラ出力の組 \mathbf{P}_C は普遍的に使用できるので、事前にこの 2 つの情報を用意しておけば、(8)式より未校正カメラのカメラ出力より分光分布が推定できる。

つまり、本研究では事前に基準カメラのシステム変換マトリックスあるいは、基準カメラの分光感度 \mathbf{r} が入手できれば任意の未校正カメラでも分光分布情報の推定が可能となる。

$$\mathbf{e}^T = \mathbf{p}^T \mathbf{T} \bar{\mathbf{t}}^+ \quad (3.8)$$

3.6. 全方位分光分布を用いたレンダリング

3.6.1 光反射モデル

推定した全方位光源分布を用いて物体をレンダリングする手法を述べる。物体表面で発生する光反射は光反射モデルに基づいて計算する[6]。ここでは不均質誘電体のような 2 色性反射特性を持つ物体を仮定して、反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分に分けて計算方法を述べる。

光反射の幾何モデルは、照明、物体、視覚系の 3 者の幾何的な関係と物体表面の特性で記述する。図 3.5 はこれらの幾何モデルを図で示したものである。ここでは視線方向ベクトルは \mathbf{V} 、物体の法線ベクトルは \mathbf{N} 、照明方向ベクトルは \mathbf{L} で表す。このとき \mathbf{N} と \mathbf{L} のなす角は θ_l 、 \mathbf{N} と \mathbf{V} のなす角は θ_r となる。

本研究では Torrance-Sparrow モデル[6]を用いて分光的な光反射モデルを構築した。このモデルに基づいて物体表面から視覚系に入射する色信号 $C_m(\lambda)$ は(3.9)式ようになる。ここで右辺第 1 項が拡散反射成分を示し、第 2 項が鏡面反射成分を示す。このモデルでは物体表面が微細な凹凸で構成されていると仮定しており、その微小面の法線ベクトルは \mathbf{H} である。 \mathbf{L} と \mathbf{H} のなす角は θ_H であり、 \mathbf{N} と \mathbf{H} のなす角が φ である。 $S(\lambda)$ は物体表面の分光反射率、 $E(\lambda)$ は光源の分光分布である。 F は Fresnel 関数である。 n は物体表面の屈折率である。一般に不

均質誘電体の屈折率は波長に依存しない定数として記述できることが知られている。不均質誘電体表面には自由電子がほとんど存在しないため、一般的な誘電体は波長ごとの鏡面反射成分の反射率がほぼ一定となる。 D は物体表面の滑らかさを表す微小面の分布関数であり、 μ によって滑らかさを決める。 G は物体表面の微小な凹凸により生じる微細な影をモデル化した幾何的減衰係数である。

$$C_m(\lambda) = \alpha \cos \theta_i S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(n, \theta_H) D(\mu, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_r} E(\lambda) \quad (3.9)$$

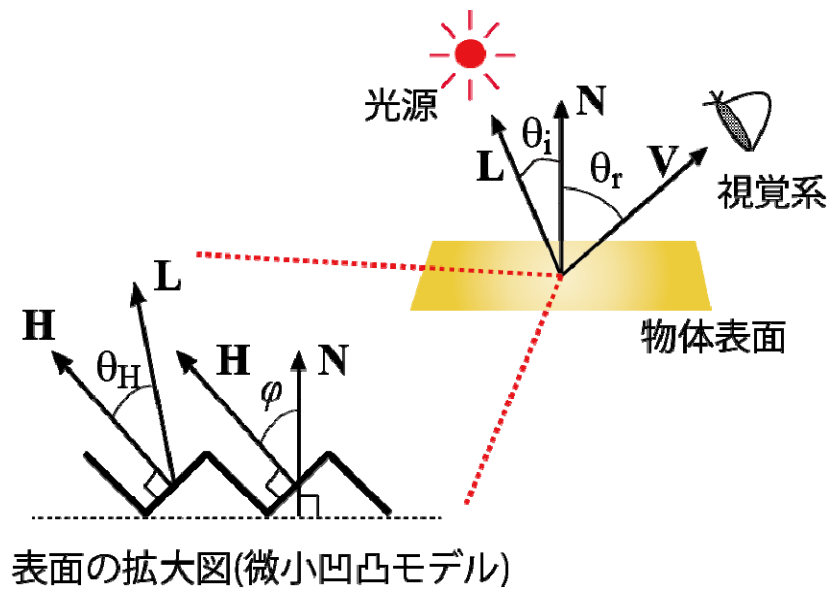


図 3.5 反射の幾何モデル

3.6.2 拡散反射成分の計算

全方位光源分布情報に基づいた光反射モデルの計算は周囲の照明光源の足し込み処理となり、光源の数が増えれば計算量が膨大になるという問題がある。実際に IBL によるレンダリングでは、光源画像一画素につき一回の反射モデル計算をしなければならない。そこで放射照度マップ[20]と呼ばれるシーン空間内の全方位の光反射計算を一種のルックアップテーブルとして利用する方法を採用して処理を高速化する。特に拡散反射は視点に依存しないため、全方位の反射光分布を事前に計算できる。拡散反射成分は、Lambert モデルを仮定するが、本研究では放射照度マップを分光的に拡張して事前に複数の光源による拡散反射処理を全て足し込む。ここで画素 j の光源方向は経度方向を θ_j 、緯度方向を φ_j としたとき、照明光源からの入射角 $\theta_i(\theta_j, \varphi_j)$ における拡散反射光強度 $I_d(\lambda, \theta_j, \varphi_j)$ は(3.10)式によって示される。

$$I_d(\lambda, \theta_j, \varphi_j) = \sum_j \cos \theta_i(\theta_j, \varphi_j) E(\lambda, \theta_j, \varphi_j) \quad (3.10)$$

3.6.3 鏡面反射成分の計算

実シーン内で粗い表面を持った物体を見ると表面の粗さにより映りこみの像やハイライトがぼやけて見える。これは物体表面の粗さにより反射光が拡散しているからであるが、単一光源であればガウス関数などを用いて統計的にハイライトの強さを求める。しかし、全方位光源分布の下では、光源情報は有限個の光源ではなく広がりを持つ分布として得られるため、この方法は使えない。そこで本研究では分散レンダリングによりこの粗さを実現する。 $D(\theta_j, \varphi_j)$ の関数において θ_j, φ_j の値を乱数によりガウス分布となるように一定の範囲で方向を変化させながら、(3.11)式を一画素あたり複数回計算し、正反射方向からのずれ角に対してガウス関数で加重平均を取ることにより物体表面の粗さを表現する。ここでは10回の繰り返し計算を行う。ここでは鏡面反射強度 $I_s(\lambda, \theta_j, \varphi_j)$ は(3.11)式で求める。

$$I_s(\lambda, \theta_j, \varphi_j) = \frac{F(n, \theta_H) D(\theta_j, \varphi_j) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_r} E(\lambda) \quad (3.11)$$

3.6.4 GPU 上での画像生成手法

図 3.6 はこれまでに述べた分光的な反射モデルと放射照度マップを用いたレンダリングのプロセスを示す。全方位の分光分布情報で照明された物体は、これまでに述べた反射モデル $I_d(\lambda, \theta_j, \varphi_j)$ と $I_s(\lambda, \theta_j, \varphi_j)$ により、視覚系に到達する色信号 $C_m(\lambda)$ は(3.12)式のように計算される。

次に視覚系に入射する色信号 $C_m(\lambda)$ から等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ を用いて(3.13)式のように三刺激値 CIE-XYZ を求める。このとき計算される色情報は表示するデバイスの色空間上の色ではなくデバイスに依存しない情報として計算する。ディスプレイに表示する RGB 値は、個々のデバイス特性に合わせて変換マトリックスを構築し、さらに非線形な入出力に関してはトーンカーブ補正を行う。これらの手法は GPU 上に実装してレンダリングを行う[20]。

$$C_m(\lambda) = I_d(\lambda, \theta_j, \varphi_j) + I_s(\lambda, \theta_j, \varphi_j) \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} C_m(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (3.13)$$

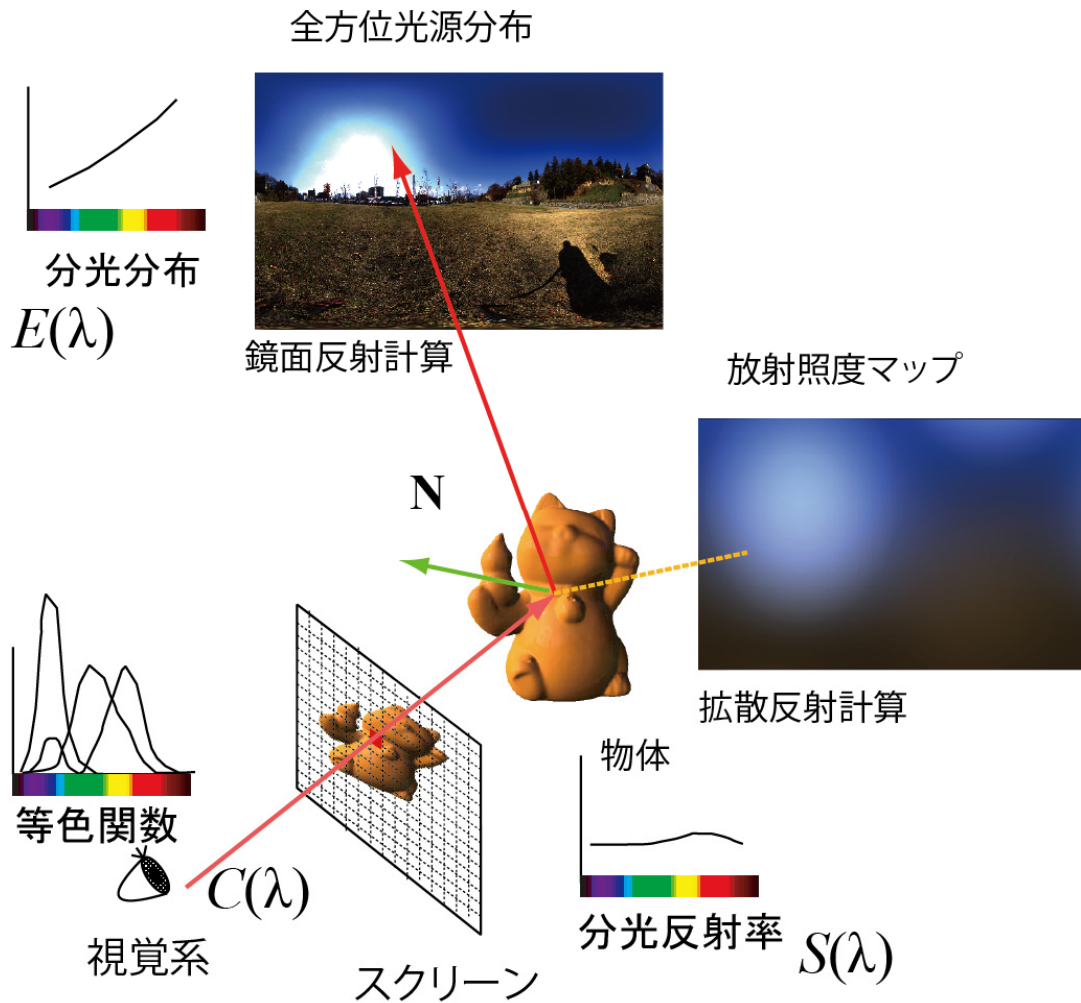


図 3.6 反射モデルと放射照度を用いた分光ベースレンダリング

3.7 実験

本研究では全方位計測系として魚眼レンズと一般的な RGB カラーカメラを用いる。実験では基準カメラとして Canon EOS 5D MarkII，魚眼レンズは Sigma FISHEYE EX DGCIRCULAR 8mm F3.5 を用いた。このカメラは各画素 14bit のダイナミックレンジを持ち 2210 万画素の解像度を持つ。このカメラの撮像素子は 35mm フルサイズの C-MOS である。推定に用いる未校正カメラは、基準カメラと同じような感度特性を持たないように別のメーカーのカメラを用いた。未校正カメラとして Nikon D800E を用いて、それに装着する魚眼レンズは Ai AF Fisheye Nikkor 16mm F2.8D を用いる。このカメラは 14bit のダイナミックレンジを持ち、3630 万画素の解像度を持つ。このカメラの撮像素子は 35mm フルサイズの C-MOS である。ただし、これら 2 つのカメラは暗電流等のノイズ除去のため低輝度側 2bit の情報をソフトウェアで除去しており、実質的には 12bit のダイナミックレンジを持つカメラとして使用している。

較正のときの分光分布(色信号)の計測には分光放射輝度計(トプコンテクノハウス SR-3A-L1)を用いる。基準カメラの較正には Gretag Macbeth カラーチェッカーSG を用いた。未較正カメラの色変換に用いたカラーチャートは Gretag Macbeth カラーチェッカー24色である。図 3.7(左)は基準カメラの較正に用いたカラーチャートであり、同色のものを除くと 96 色となる。図 3.7(右)は未較正カメラの色変換に用いたカラーチャートである。

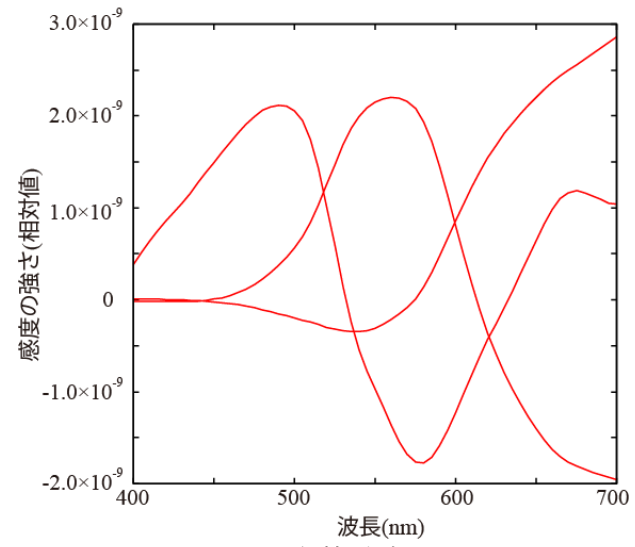


図 3.7 基準カメラの較正に用いたカラーチャート（左）と未較正カメラの色変換に用いたカラーチャート（右）

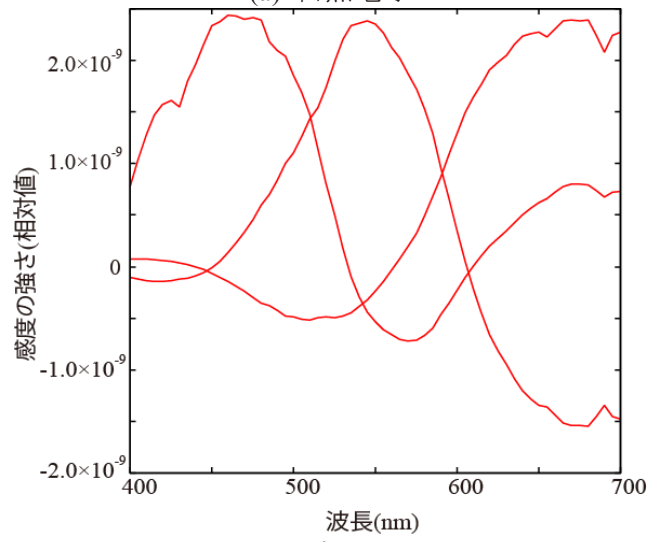
3.7.1 基準カメラの較正

ここでは、まず基準カメラの較正を行った。基準カメラの較正とは、つまりカメラ出力から色信号(光源の分光分布)へのシステム変換マトリックスを求めることである。3.4.2 節の方法を用いて各光源環境下でシステム変換マトリックスを求め、それを波長ごとの応答関数としてグラフ化した結果を図 3.8 に示す。図 3.8 の(a)は白熱電球、(b)は太陽光、(c)は蛍光灯であるが、それぞれ各光源の分光分布の影響が含まれていることがわかる。白熱電球、太陽光、そして蛍光灯光源下でシステム変換マトリックスが得られたことで、各光源下での基準カメラが構築できたことになる。

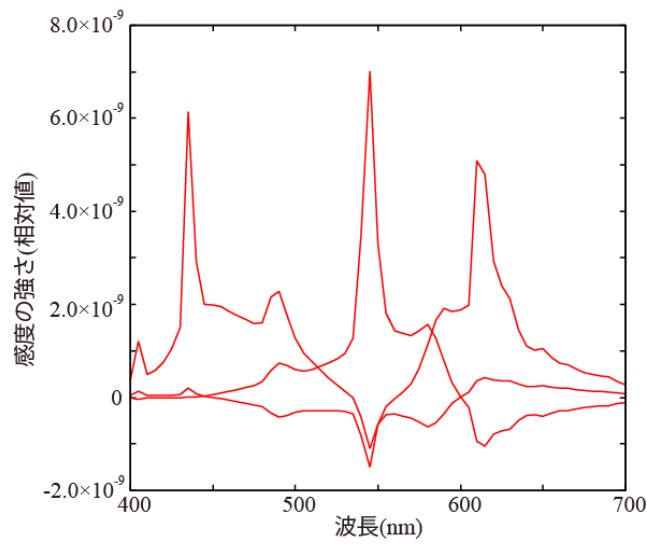
次に基準カメラの情報を用いて未較正カメラによる分光分布推定を行う。ここでは 3.5.1 節の方法を用いて白熱電球下で計測した画像と分光放射輝度から基準カメラの分光感度関数を求めた。そして白熱電球下でカラーチャートを計測し、基準カメラの分光感度関数 t^+ を推定した。この推定結果をグラフ化したものが図 3.9 である。この感度関数は、色信号に対するカメラ出力(個々のカメラ固有の RGB 値)を得るための応答関数である。このことにより、基準カメラとは異なるカメラ、そして、さらに基準カメラを較正したときと異なる照明環境においても分光分布の推定が可能となる。



(a) 白熱電球



(b) 太陽光



(c) 蛍光灯

図 3.8 システム変換マトリックスの推定結果

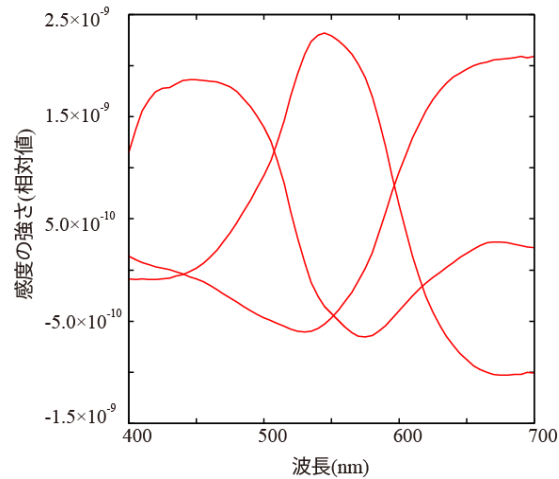


図 3.9 基準カメラの分光感度の推定結果

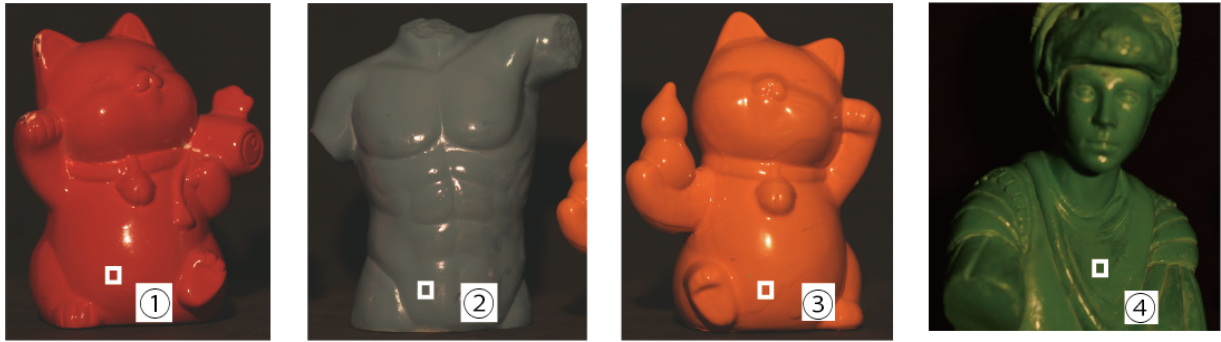
3.7.2 未校正カメラによる色信号の推定結果

未校正カメラの色空間から基準カメラの色空間への変換を行った。図 3.7(右)はここで用いた 24 色のカラーチャートである。その後、未校正カメラに入射する色信号の推定を行った。この実験は物体の分光反射率の推定を行っているのではなく、光源からの間接光が視覚系に到達したと想定し、その間接光の色信号を調べている。そのためシーン中に物体を配置し、そこから反射した色信号を推定する。実験に使った計測物体は、石膏で作られた物体にアクリル塗料を塗布したものである。塗布したアクリル塗料はアサヒペン製のラッカーズプレー（赤、水色、オレンジ、うす緑色）である。これらの塗料の色は RGB それぞれの領域をカバーすることに注意した以外は無作為に選択した。計測物体として、赤色の物体は高さ 10cm×幅 9cm の大きさと制作された石膏の猫の置物、水色の物体は、高さ 13cm×幅 12cm の大きさと制作された石膏の上半身像、オレンジ色の物体は、高さ 10cm×幅 9cm の大きさと制作された石膏の猫の置物、緑色の物体（うす緑）は、高さ 14cm×幅 9cm の大きさと制作された石膏のギリシャ兵士像である。これらの計測物体は、白熱電球下、太陽光下、蛍光灯下、それぞれのシーンで黒色のフェルトをかぶせた台の上において計測した。図 3.10 は白熱電球で照明された物体の計測画像である。図 3.10 において、(a)は赤色の物体、(b)は水色の物体、(c)はオレンジ色の物体、(d)は緑色の物体である。暗室環境において 300W の白熱電球を物体正面から約 200cm、上方約 100cm の位置から照射した。このときの物体周辺の照度は約 1280 lx であった。図 3.11 は、この条件下で計測物体から反射された色信号の推定結果のグラフである。同じように図 3.11 は太陽光照明下における物体の計測画像である。計測物体は午前 11 時ごろに部屋の照明を全て消灯し、計測物体を南側窓際から約 200cm に配置した。この条件で窓から取り込んだ太陽光で、物体の左側から照明があたるように計測した。図 3.12 の(a)から (d)の物体は、図 3.10 の(a)～(d)の物体と同じものである。このときの物体周辺の照度は、赤色の物体、水色の物体、オレンジ色の物体の計測時は約 8000 lx、緑色の物体の計測時は約

11000 lxであった。図 3.13 はその推定結果のグラフである。図 2.14 は蛍光灯照明下での物体の計測画像である。図 3.14 においても同様に(a)から(d)の物体は図 3.10, 図 3.12 の(a)から(d)の物体に対応する。計測物体は、夜間に窓に暗幕を使用して外光が入らないようにした大学内の研究室中央の机の上に配置した。物体を配置した位置は、床から約 70cm, 天井からは約 180cm の位置である。使用した蛍光灯は 40W の蛍光灯 42 本である。いずれも Panasonic 社製フルホワイト蛍光灯 40 型 (FLR40S・N/M-X・36) で統一している。このときの物体周辺の照度は約 650 lx であった。図 15 はその推定結果のグラフである。図 3.10, 3.12, 3.14 で示す①～④の領域は色信号の推定位置である。

まず図 3.10, 2311, 3.12 の推定結果において、赤の実線が分光放射輝度計で計測した計測値、緑の 2 点鎖線がそれぞれの照明環境下で較正した基準カメラでの推定値、青の点線が未較正カメラでの推定値である。

ただし、未較正カメラは、全ての実験において白熱電球下で較正した基準カメラを用いて推定しているが、いずれの光源環境下でも分光分布を推定できていることがわかる。



(a)赤色の物体 (b)水色の物体 (c)オレンジ色の物体 (d) 緑色の物体

図 3.10 白熱電球下で計測した物体

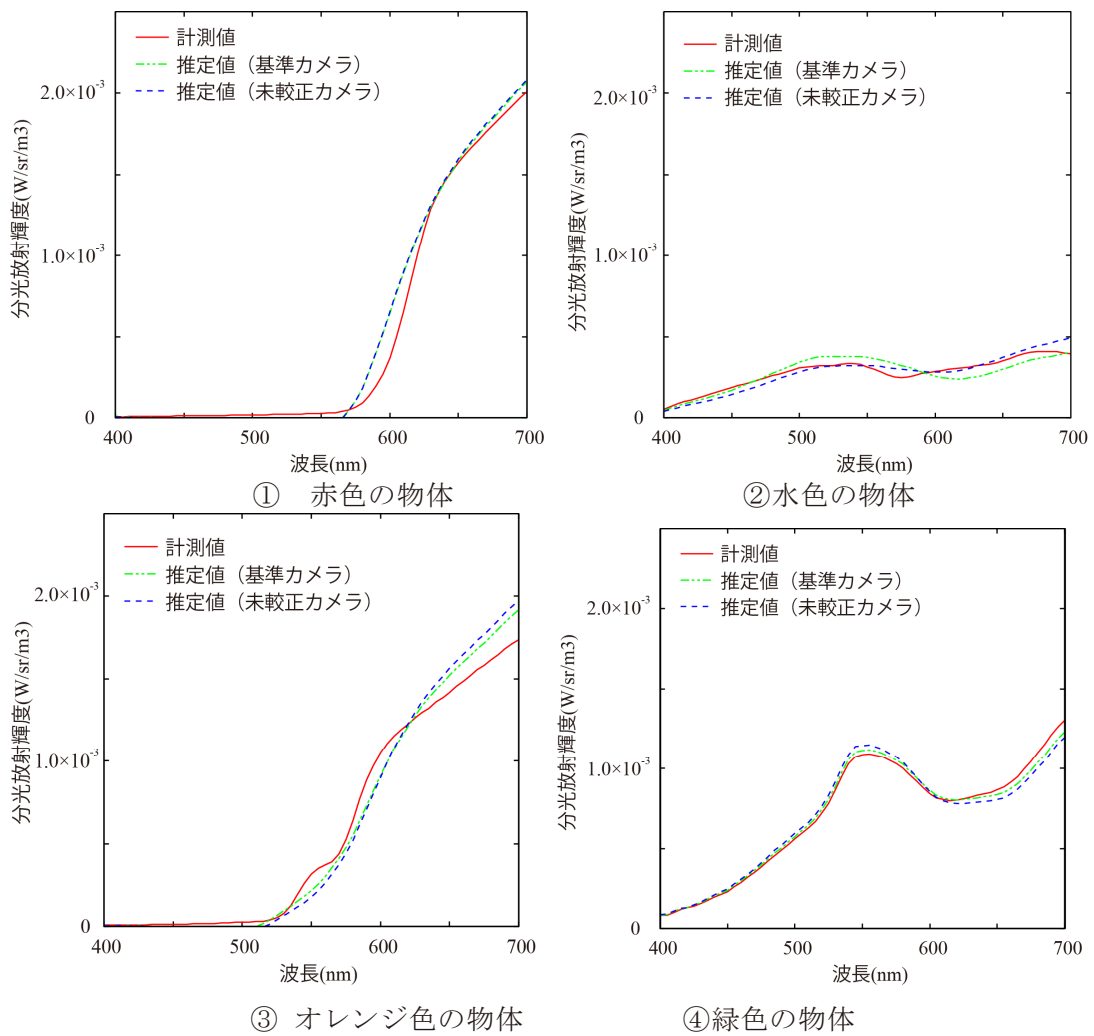
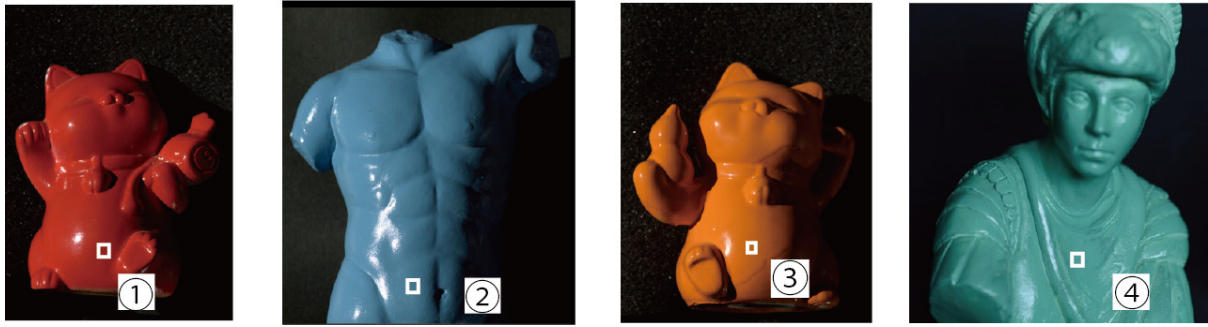


図 3.11 白熱電球下での色信号推定結果



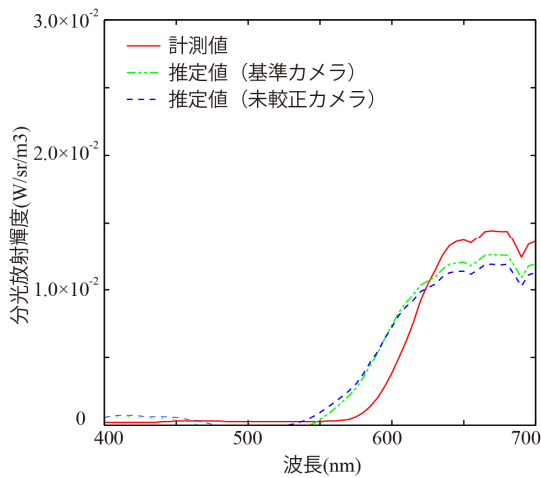
(a)赤色の物体

(b)水色の物体

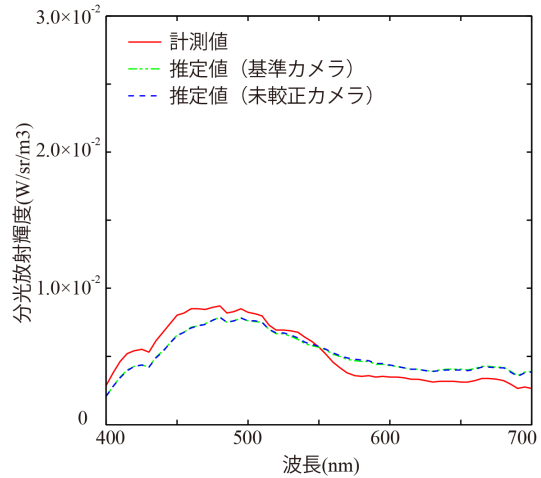
(c)オレンジ色の物体

(d) 緑色の物体

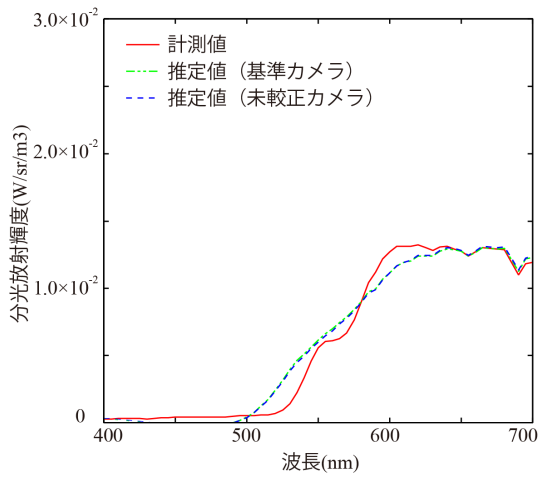
図 3.12 太陽光下で計測した物体



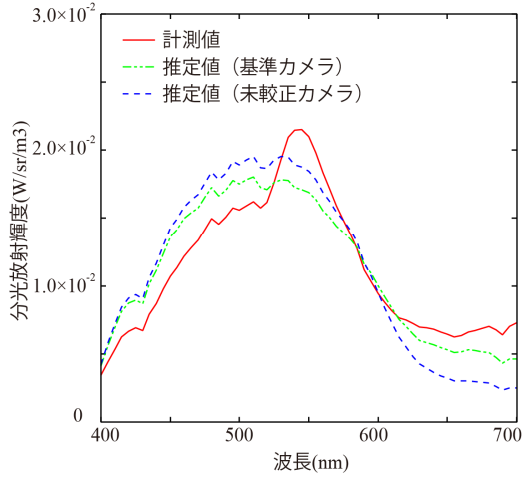
① 赤色の物体



② 水色の物体

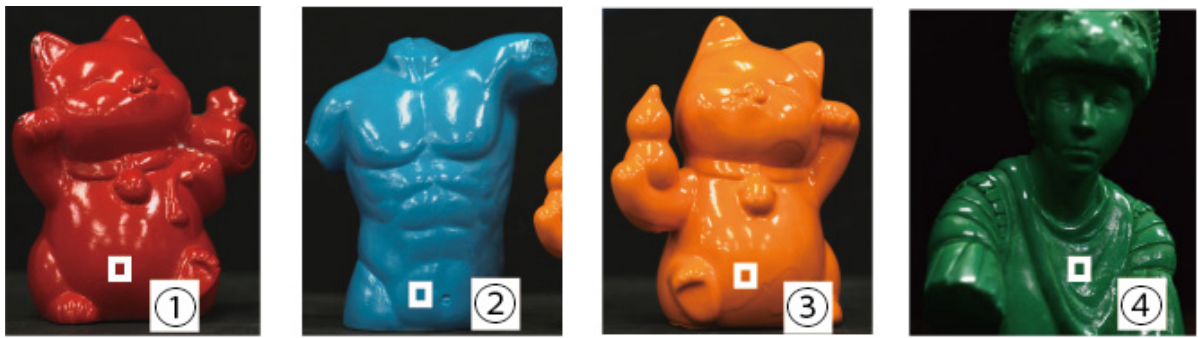


③ オレンジ色の物体



④ 緑色の物体

図 3.13 太陽光下での色信号推定結果



(a)赤色の物体 (b)水色の物体 (c)オレンジ色の物体 (d) 緑色の物体

図 3.14 蛍光灯照明下で計測した物体

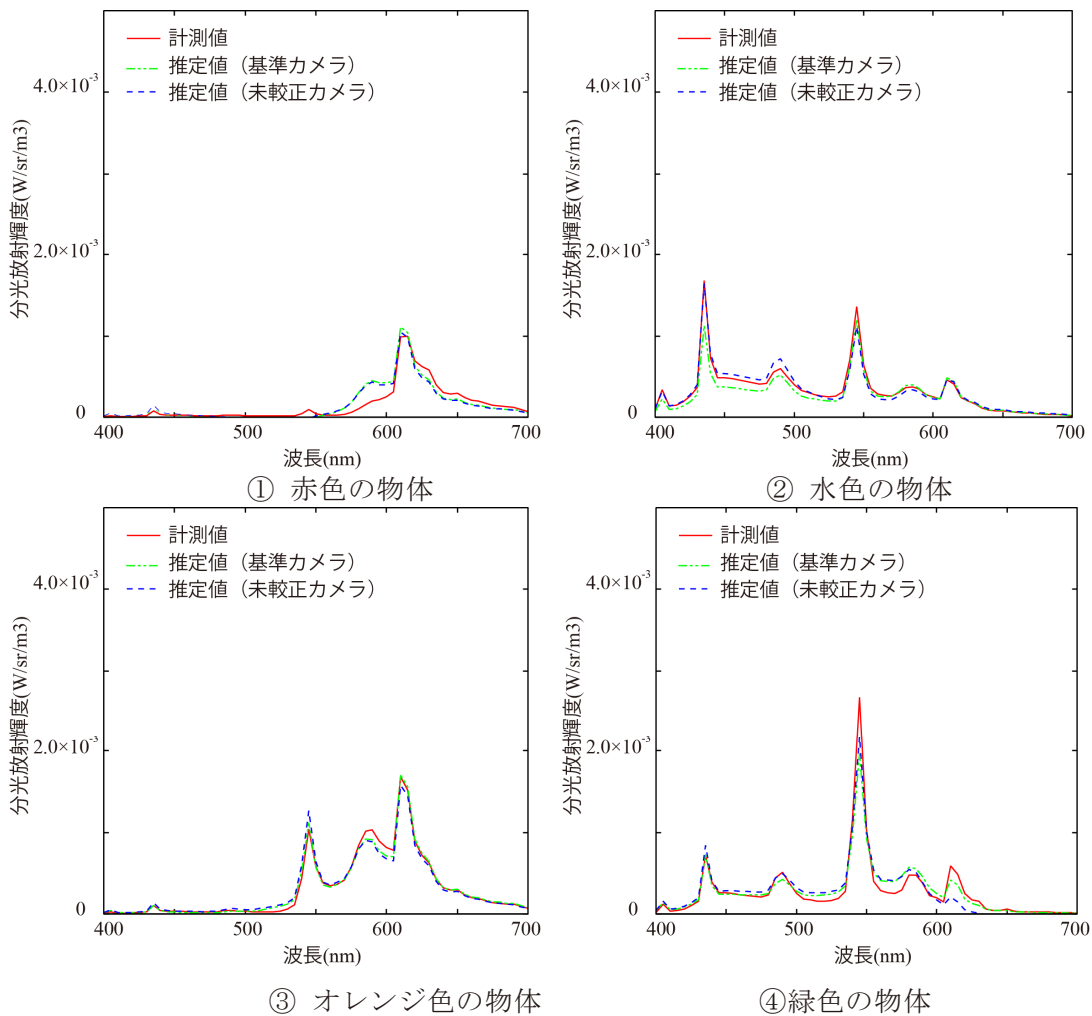


図 3.15 蛍光灯照明下での色信号推定結果

3.7.3 全方位分光画像の推定結果

未校正カメラを用いて全方位の分光画像を計測した。計測場所は、ホール（白熱電球照明下）、室内環境（蛍光灯照明下）、屋外（太陽光下）である。いずれのシーンにおいても Gretag Macbeth 社の 24 色カラーチャートを用いて未校正カメラの色空間を基準カメラの色空間に変換して、色信号を推定した。各シーンでは暗い影から明るい光源がある。こういった暗い部分から明るい光源まで全て計測するため、同一シーンでカメラのシャッター速度を変えながら画像を合成し、画像のダイナミックレンジを拡張した。使用したシャッター速度は 1/10 秒、1/20 秒、1/60 秒、1/125 秒、1/250 秒、1/500 秒、1/8000 秒の 7 枚である。これにより 12 ビットのダイナミックレンジを持つカメラを疑似的に 23 ビットのダイナミックレンジを持つカメラとして使用した。このときの計測条件は 3 つのシーン全て同じとした。全方位の計測は魚眼レンズを使用した。一度に撮影できる画角が小さいので水平方向に 60 度間隔で 6 枚、仰角上方向(45 度程度)に向けて水平方向に 90 度間隔で 4 枚、仰角下方向(45 度程度)に向けて水平方向に 90 度間隔で 4 枚、合計 14 枚の画像を計測し、一枚の全方位画像に合成した。そして、(3.10)式によりそれぞれの放射照度マップを生成した。

図 3.16 は白熱電球照明のホールのシーンの全方位分光画像と分光放射照度マップである。ここでは全方位分光画像、分光放射照度マップともに各画素は分光分布を持つが疑似的に RGB で表示している。図 3.17 は同様に太陽光照明下の屋外シーン、図 3.18 は蛍光灯照明下の室内シーンにおける全方位分光画像と分光放射照度マップである。

さらに図 3.19(右)は、提案手法を用いて図 3.18 の蛍光灯照明下で実際の物体を CG 再現した結果を示す。画像中上の物体が実物で、下の画面中に表示されているものが再現 CG である。このときの物体は、図 3.14 で使用した赤色の物体である。計測物体の形状は別途レーザレンジファインダ(Konica Minolta 社製 Vivid 900)で計測し、色情報は事前に分光光度計(X-rite 社製 i1Pro)で計測した分光反射率を与えた。この分光反射率は図 3.19(左)に示す。ここでは、まず視覚的に実物と再現 CG を比較して、表面に写りこんだ周囲環境の状態も含めて計測物体の CG 再現状態を確認した。この結果、周囲環境の写りこみ状態はほぼ実物と同様に再現されていることがわかった。しかし、詳細に確認すると再現 CG は実物よりも彩度が低くなっていることが視覚的にわかった。この理由の主たるものは、図 3.15①のグラフの結果からわかるとおり、推定値の分光波形が計測値のそれよりも広がっているためであると考えられる。

このときの誤差を定量的に調べるため、実物と再現 CG を分光放射輝度計で計測し、それぞれの CIE $L^*a^*b^*$ 値を求め、色再現精度を両者の色差 ΔE として求めた。このときの色差は $\Delta E=4.0$ となった。納谷[21]によると、一般に人間の目では色差 ΔE が 2.5 以上になると色差の存在を認めることができるという。推定値で生成した CG の色再現精度が低下する原因

は、本研究では RGB カメラを用いているため、400nm から 700nm の可視波長域をたったの 3 つのチャンネルでしか計測できないことが原因である。これ以上に推定精度を向上させるためには、カメラをマルチチャンネル化するという計測系の根本的な改造が必要となるが、これは本研究の一般的な RGB カメラで簡便に分光画像計測を行うという目的の範囲から外れることになる。



(a) 全方位分光画像

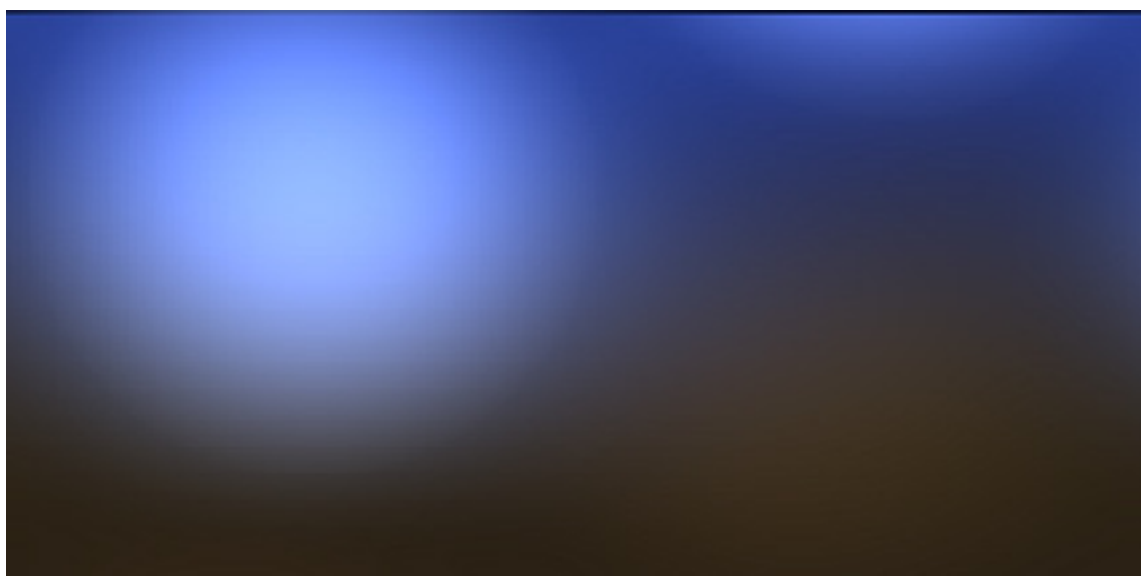


(b) 分光放射照度マップ

図 3.16 白熱電球照明下の全方位計測画像と放射照度マップ



(a) 全方位分光画像

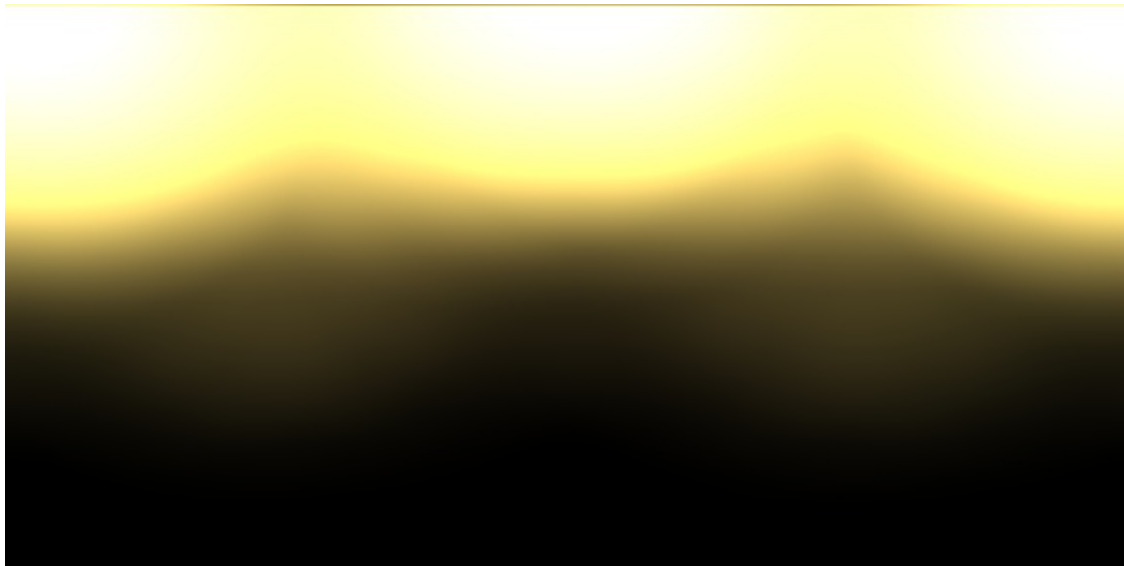


(b) 分光放射照度マップ

図 3.17 太陽光照明下の全方位計測画像と放射照度マップ



(a) 全方位分光画像



(b) 分光放射照度マップ

図 3.18 蛍光灯照明下の全方位計測画像と放射照度マップ

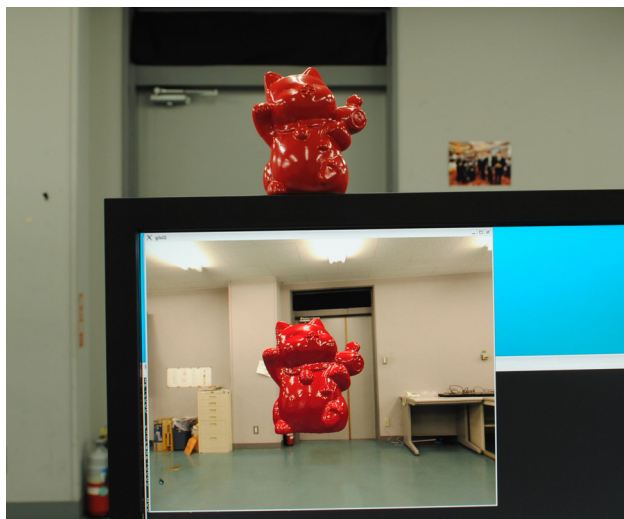
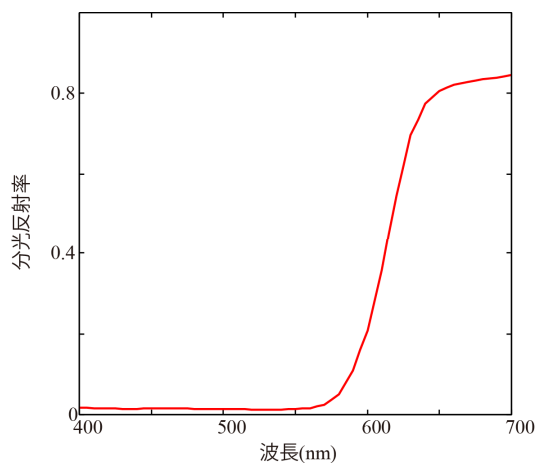


図 3.19 赤色の物体の分光反射率(左)と蛍光灯照明下における赤色の物体の CG 再現結果(右)

3.8 まとめ

本研究では、分光ベースの IBL を実現するために、分光感度が未知の RGB カラーカメラを用いて実シーン内の全方位の光源の分光分布と空間分布を推定する簡易的な手法を提案した。

ここでは基準となるカメラを分光放射輝度計とカラーチャートを用いて分光的に較正した。そして任意の RGB カメラを用いて全方位画像とカラーチャートを計測した。その画像を基準カメラの色空間へ変換することで任意の RGB カメラで計測した画像から全方位の分光画像の推定が可能となった。次に推定した全方位分光分布を用いた IBL によるレンダリング手法を提案した。そのレンダリング性能を向上させるために全方位のシーン照明環境の放射照度マップを作成し、GPU 上に実装する手法を述べた。実験では白熱電球光、太陽光、蛍光灯のそれぞれの照明環境下でシーン内の色信号を推定し、その精度を検証した。また、実際のシーンの全方位分光画像を計測し、IBL により分光的に照明された物体を CG 再現し、その精度を視覚的に検証し、さらに CIE L*a*b*空間上での色差として定量的に検証した。

第 4 章

分光画像圧縮に基づいた分光ベースレンダリングの高精細化

第4章

4.1 本章の概要

近年では3DCGは工業製品のデザイン・感性評価ツールとして利用したり、美術品、文化財の画像再現に用いたりと産業面、文化面での応用が飛躍的に広まった。こういった分野でのCG利用の特徴的な点は、従来の映画やゲームでのCG利用とは異なり、実物に対する色再現精度が極めて重要となるこれまでのRGBカラーベースによる画像再現の問題は、生成する画像が映像デバイスや照明環境に依存するため精密な色再現が難しいことである。そこで我々は前報では計測データに基づいて物体表面の反射特性を計測し[4]、デバイスや照明環境に依存しないように分光情報に基づいた映像生成手法を提案した[5]。これまでのCG分野では分光ベースのレンダリング手法は主に薄膜の干渉光や虹などの表現[3]に用いられてきたが、本研究では色再現精度の向上のために分光情報を活用する手法を開発する。それにより、たとえば「肉が美味しそうに見えるランプ」のような、いわゆる演色性が高い光源など従来のRGBカラーベースでは再現できないものにも応用することができる。前報までの研究により物体表面の計測データと分光ベースの反射モデルに基づいた物体の画像再現が可能となった。

ただし、このとき色再現精度と同時に、極めて高精細な画像が望まれることも忘れてはいけない。本研究では、レンダリング画像の解像度の向上とそれに耐えうるマッピング情報の解像度の向上を高精細化と呼ぶ。本研究では実物を精密に3DCGで再現し、その品質を向上させることを目的としているが、一つのシーンの画像生成を行うだけでも、光源分布画像、表面テクスチャ画像など複数の分光画像情報が必要となる。

つまり、レンダリング画像の解像度を向上させるためには、単に生成画像の解像度を向上させれば良いのではなく、物体表面のテクスチャ情報やImage based lightingに必要な光源の分光画像の解像度を向上させなければならない。つまり、レンダリング画像の解像度の向上は詳細なテクスチャ表現や微細な形状の再現、光源の配光分布の微妙な変化を再現する精密な計算が必要となる。

しかし、分光ベースによる方法はRGBベースの手法と比較して極端に高次元情報を扱うため大幅に計算量と記憶容量が増加するという問題がある。前報[5]ではCPUとは独立して使用する画像生成専用ハードウェア Graphics Processing Unit(GPU)による高速化を試みているが、分光ベースで高解像度のレンダリングを行うことは難しいことが指摘されている。特に記憶容量に関してはテクスチャマッピング、Image Based Lighting(IBL)、環境マッピングなど、光源分布情報やテクスチャ情報を高次元の分光画像として記録しなければならないため、膨大な記憶容量が必要となる。使用メモリ量が増加すればCPU-GPU間のデータ転送用のバス帯域を使い果たしたり、GPUのローカルメモリ上にデータを保持できなくなったりするた

め、レンダリングの阻害要因となる[5]. また、現在普及している 32bit の Operating System(OS) ではメモリ空間が物理的に 4GB までしかアクセスできなかつたり、最新のものでも GPU 上のローカルメモリは最大でも 2GB 未満であつたりするなど、巨大な画像情報であれば処理そのものが不可能となる場合もある。つまり高精細な分光画像生成には分光画像の容量が最大の問題となる。

そこで分光画像を圧縮することが有効な手段となる。本研究では高い色再現精度を保ちつつも GPU 上に実装できるように、ハードウェアの特性に応じたアルゴリズムの実装、高い圧縮率と復元率、圧縮データを高速に復号できるといった条件が必要となる。これまでも Wavelet 変換を用いた分光情報の圧縮方法が提案されている[3]。この方法の特徴は、高次元の分光情報を低次元に圧縮した状態で分光計算ができるため、記憶容量や計算負荷が大幅に低減していることである。ただ、この方法では「スペクトル分布が連続性を持ち緩やかに変化する」という自然界に存在するスペクトル分布の特性を利用してデータを圧縮しているが、日常的には蛍光灯やナトリウムランプのようにスペクトル分布の変動が激しいスパイクな分光特性を持つような対象が存在するため、必ずしもこの仮定はなりたない。しかしながら、本研究が目指す色再現分野において RGB カラーベースの映像生成手法に対して分光ベースの映像生成手法の有効性が発揮されるのはこういったスペクトル分布の変動が激しいものに対してであることが多い。そのため、このようなスペクトル分布の変動が激しいような対象に対しても分光情報を圧縮する手法が必要となる。

分光反射率の特性に関しての関連研究に目を向けると、分光反射率は統計的な特徴を持っているため少数の基底関数の線形結合で記述できることが知られている。これまで Cohen[22] はマンセル色票の分光反射率が 3 つの主成分曲線で表現できることを示した。また Maloney[23]、Parkkinen[24]、Vrhel[25]らは実際の物体の表面分光反射率を調べて、少数の基底関数で物体表面の分光反射率を表現できることを示した。こういった分光情報の統計的特性を用いれば分光情報の圧縮が可能になる。

そこで本研究では、分光画像中の分光情報の統計的特徴を解析し、分光画像の画像品質を保ちながら分光分布データを圧縮する方法を開発し、分光ベースレンダリングを行うときに高解像度の分光画像を扱えるようにして物体をレンダリングできる手法を提案する[26]。本手法では、直接対象画像の分光分布の統計的特性を使用するので、特に文献[3]の方法のような「分光情報は緩やかに変化する」という前提条件は必要としない。また、直接的に対象画像の情報を使用するので、一般的に従来法よりも高い圧縮率が得られると期待できる。このときレンダリング速度の問題も無視できない。そこで分光画像を高効率で圧縮し、かつレンダリングのリアルタイム性が損なわれない高速なレンダリングアルゴリズムの開発が必要となる。

本稿ではまず前報で提案した分光ベースの反射モデルの説明を行った後、(1)分光画像の統計的性質に基づいた分光情報に適した圧縮方法を提案、(2)圧縮した分光情報を用いた高精度かつ高速なレンダリング手法を提案する。我々の提案手法の有効性に関しては、まずいくつかの基底関数で分光情報が記述できるかを調べ、圧縮率とともに圧縮前と圧縮後の分光画像の画質を比較する。さらに、実際に GPU 上で分光画像をマッピングしながら 3DCG を生成して、圧縮前と圧縮後のレンダリング速度を比較する。本手法の総合的な有効性は提案手法で環境光下でのレンダリングを行って視覚的に検証する。

4.2 分光的な反射モデルと映像生成手法

4.2.1 分光ベースの反射モデル

本研究では前報において物体表面の光反射を分光的な反射モデルで記述し[4],さらに環境光源、つまり全方位に存在する無数の光源の空間分布下でも物体をレンダリングできるように反射モデルを拡張した[5]。図 4.1 は提案モデルの幾何概略図である。この幾何モデル図は Torrance-Sparrow モデル[6]をベースに微小面モデルに基づいて構築した。 \mathbf{V} は視線方向ベクトル、 \mathbf{N} は物体の法線ベクトル、 \mathbf{L} は照明方向ベクトルである。 \mathbf{N} と \mathbf{L} のなす角は θ_l 、 \mathbf{N} と \mathbf{V} のなす角は θ_v となる。このモデルは表面粗さを表現するため物体表面が微小面で構成されていると仮定している。この微小面の法線ベクトルは \mathbf{H} である。 \mathbf{L} と \mathbf{H} のなす角は θ_h であり、 \mathbf{N} と \mathbf{H} のなす角が φ である。視覚系に到達する色信号 $C(\lambda)$ は光の波長 λ の関数として (3.1)式で記述する。ここで右辺第 1 項は拡散反射、第 2 項と第 3 項は鏡面反射成分であるが、第 2 項は粗さを持つ表面の鏡面反射(gloss)、第 3 項は滑らかな鏡面(perfect mirror)を示している[28]。 $S(\lambda)$ は物体表面の分光反射率 $E(\lambda)$ は光源の分光分布である。 α, β, χ はそれぞれ各項の重み係数である。 F は Fresnel 関数である。屈折率は実数項が $n(\lambda)$ 、虚数項が $k(\lambda)$ である。 D は物体表面の滑らかさを表す微小面の分布関数でありガウス分布を仮定した。ここでは μ_0, μ_1 の値によって滑らかさが決まる。 G は幾何的減衰係数である。

$$C(\lambda) = \alpha \cos \theta_l S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(n, \theta_h) D(\mu_0, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_l} E(\lambda) + \chi D(\mu_1, \varphi) F(n, \theta_l) E(\lambda) \quad (3.1)$$

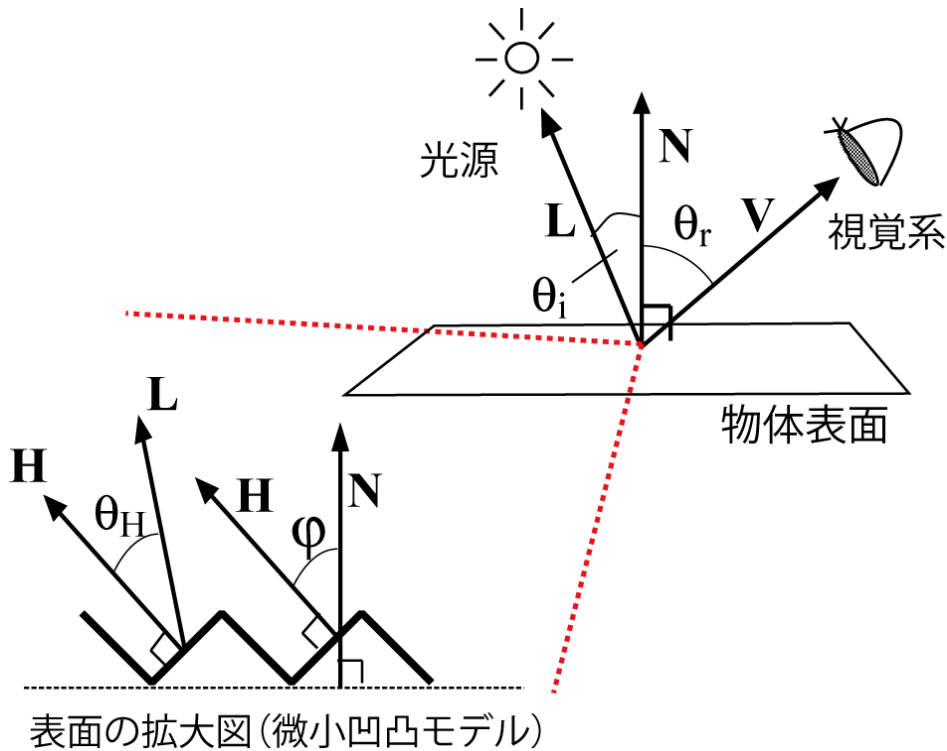


図 4.1 反射の幾何モデル

4.2.2 放射照度マップを用いた環境光源下でのレンダリング

(4.1)式のモデルをそのまま適用した場合、環境光源の影響をすべて考慮しようとする計算量が増大する。そこでこれらの計算負荷を大幅に減らすために放射照度マップと呼ばれる一種のルックアップテーブルを分光的に拡張した[5]。光源の空間分布の座標は θ と ϕ を座標で示す。このときそれぞれのとりうる範囲は $0 \leq \theta \leq 2\pi$, $0 \leq \phi \leq \pi$ である。このとき環境光源下で得られる色信号 $C(\lambda, \theta, \phi)$ は先ほど放射照度マップ I_d と鏡面反射モデル $I_{\text{gloss}}, I_{\text{mirror}}$ を用いて文献[4]から次式で示される。

$$C(\lambda, \theta, \phi) = \alpha I_d(\lambda, \theta, \phi) S(\lambda) + \{ \beta I_{\text{gloss}}(\lambda, \theta, \phi) + \chi I_{\text{mirror}}(\lambda, \theta, \phi) \} E(\lambda, \theta, \phi) \quad (4.2)$$

4.2.3 人間の視覚系が受ける色刺激からデバイス RGB への変換

カラーデバイスの特性の影響を受けない映像化手法について述べる[4]。(4.1)式の分光的な反射モデルから得られた色信号 $C(\lambda)$ から人間の視覚系が受ける色刺激を計算する。まずここでは等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ を用いて(4.3)式のように三刺激値 CIE-XYZ を求める。ここで得られた XYZ 値は表示デバイスの特性に依存しない情報である。ここから実際にディスプレイの色特性に基づいてデバイス RGB に変換する。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} C(\lambda, \theta, \phi) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (4.3)$$

4.3 分光画像データの圧縮と復号

4.3.1 従来法

分光情報を圧縮する技術として離散 Wavelet 変換を用いた手法が提案されている[3]。この方法は「自然界に存在するスペクトル分布が連続性を持ち緩やかに変化する」という特性を仮定してデータ圧縮を行っている。Wavelet 変換では分光分布の局所的な変化を Wavelet 係数で表現している。つまり、この方法では少数の Wavelet 係数のみを記録すればよいので分光分布のデータ量を大幅に削減できる。文献[3]では4つの Wavelet 係数で分光関数を表現した。

4.3.2 提案手法による分光画像圧縮の原理

分光分布の統計的性質に基づいた分光画像を圧縮する方法を述べる。分光画像に含まれる分光情報（分光分布）は文献[21-24]の指摘を拡張すれば、少数の基底関数の線形結合で表すことができる。ここではまず分光分布 $I(\lambda)$ は n 個の基底関数 $B_k(\lambda)$ から(4.4)式で記述する。ここで w_k は基底関数の重み係数である。しかし、この段階では分光分布の表現方法を変えているだけでデータの圧縮はなされていない。ここでもし画像上に含まれる分光分布に統計的な偏りがあれば、基底関数 $B_i(\lambda)$ の数 n を減らすことが可能となる。つまり、基底関数の数 n の数が少数であっても元の情報を十分に復元できるのであれば、データ量を減少させることができる。このようにすれば分光画像は、 n 個の重み係数 w_i のみを記録するだけでよい。データ量を削減できる。文献[22-25]に用いられている手法は、分光反射率に限定したものであるが本研究では照明光源の分光分布を含めたシーン中の分光情報全体に同様な仮定がなりたつと考える。実際に同一シーン内の画像の色は偏りを持って分布し、その偏りによって照明光源を安定して分類できることが示されている[26]。

$$I(\lambda) = \sum_k^n w_k B_k(\lambda) \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (4.4)$$

4.3.3 圧縮・復号アルゴリズム

本研究で提案する手法は予め分光情報のデータベースを用意するのではなく、対象となる一枚の分光画像に対して直接分光分布の基底関数を求める。このことによりスペクトル分布の変動が激しい分光分布であっても圧縮率やデータの復元率の低下は少なくなる。本研究では分光分布を 400nm から 700nm までの可視波長域について 5nm 間隔でサンプリングして 61

次元データとして扱う。理由として色彩学の分野では分光情報は、可視波長域(400nm-700nm)を 31 次元(10nm 間隔), あるいは 61 次元(5nm 間隔)で表現することが多く, 他の研究成果との比較に適している。このようなサンプリング数が決められた理由は, 視覚の弁別閾(人間の視覚特性)と色度差(色空間上の定量的な距離)ができるだけ同じようになるようにして設計された均等色空間での色差が基準となっている[28].

しかし蛍光灯などのスパイクな分光分布波形を再現するためには 10nm 間隔では不十分であることがあるため, その倍のサンプル数である 5nm 間隔でのサンプリングとする。このとき圧縮する分光画像の画素数を m とすると分光分布の集合を $m \times 61$ の行列 $\mathbf{\Lambda}$ で表す。行列 $\mathbf{\Lambda}$ に対して主成分分析を行い, 得られた k 番目の主成分ベクトルは 61×1 の行列 \mathbf{b}_k とする。このとき j 番目の画素の分光分布を 61×1 の行列 \mathbf{i}_j で示すと(4.4)式から次式のように記述する。このとき \mathbf{b}_k は一枚の画像内で一意に決まるが, $w_{j,k}$ は画素ごとに異なる値を取る。(4.5)式を $\mathbf{\Lambda}$ との関係で記述すると(4.6)式のようになる。このとき基底関数の数が $n=61$ であれば情報の損失はなく, 分光分布の情報は 100%情報が復元できるがデータ量は減らない。データ圧縮は n の数を $n < 61$ とすることで可能となる。この場合, 主成分ベクトル(基底関数)の累積寄与率が 1.0 に近い値になるできるだけ小さな n の値を決定すれば高い復元率で情報を圧縮できる。つまり, この分光画像の圧縮率と復元率はこの n で決定される。

さて, ここで分光画像 $\mathbf{\Lambda}$ が与えられれば, 先に述べた方法で基底関数の重み係数 $w_{j,k}$ の集合が圧縮された画像となる。このとき既知のデータは $\mathbf{\Lambda}$ と $[\mathbf{b}_1^T \ \dots \ \mathbf{b}_n^T]^T$ であるので, $w_{j,k}$ は $[\mathbf{b}_1^T \ \dots \ \mathbf{b}_n^T]^T$ の一般化逆行列を用いて(4.7)式で求める。今度は圧縮画像から元の分光反射率へ復号する復号アルゴリズムであるが, 復号後の分光反射率 $\bar{\mathbf{i}}_j$ は(4.5)式から(4.8)式により復元できる。ただし, このとき $n < 61$ であつ累積寄与率が 1.0 未満であれば, 完全には元の分光分布が復元できないので, 非可逆圧縮となる。

$$\mathbf{i}_j = \sum_{k=1}^n w_{j,k} \mathbf{b}_k \quad (j=1, \dots, m) \quad (4.5)$$

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{i}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & \dots & w_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m,1} & \dots & w_{m,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{b}_n^T \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} w_{1,1} & \dots & w_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m,1} & \dots & w_{m,n} \end{bmatrix} = \mathbf{\Lambda} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{b}_n^T \end{bmatrix}^+ \quad (4.7)$$

$$\bar{\mathbf{i}}_j = \sum_{k=1}^n w_{j,k} \mathbf{b}_k \quad (j=1, \dots, m) \quad (4.8)$$

4.4. 提案手法によるレンダリング手法と GPU への実装

4.4.1 提案手法の GPU への実装方法

本研究で用いた GPU は頂点シェーダとフラグメントシェーダと呼ばれる 2 種類のプログラミング可能なシェーダユニットが搭載されている。GPU への実装はレンダリング部分では(3.2)式と(3.3)式、そして圧縮画像の復号部分では(3.8)式をフラグメントシェーダ上に実装する。ここでまず圧縮率を決めるために基底関数の数 n を決定しなければならないが、GPU は画像情報を R,G,B,A といった 4 つの数値データで記録することを想定している。また GPU はこの RGBA の 4 つのデータを同時に処理することを想定して設計されているため、計算処理を 4 つのパイプラインで同時に計算する一種の SIMD(Single Instruction Multiple Data)型の並列計算機と考えることができる。このため n は 4 の倍数であることがデータ容量効率上、あるいは処理効率上から考えて望ましい。本手法では GPU 上での処理効率を向上させるためデータストリームを 4 つに分離し、SIMD のパイプラインに割当てる。

4.4.2 データ圧縮

データ圧縮は GPU で処理する前に CPU 側で計算する。このときの処理は図 4.2 のような処理となる。与えられた分光画像は主成分分析して(3.7)式により、その基底関数の重み係数画像として記録される。このとき仮に 4 つの重み係数で表現できるならば圧縮率は 4/61 となる。

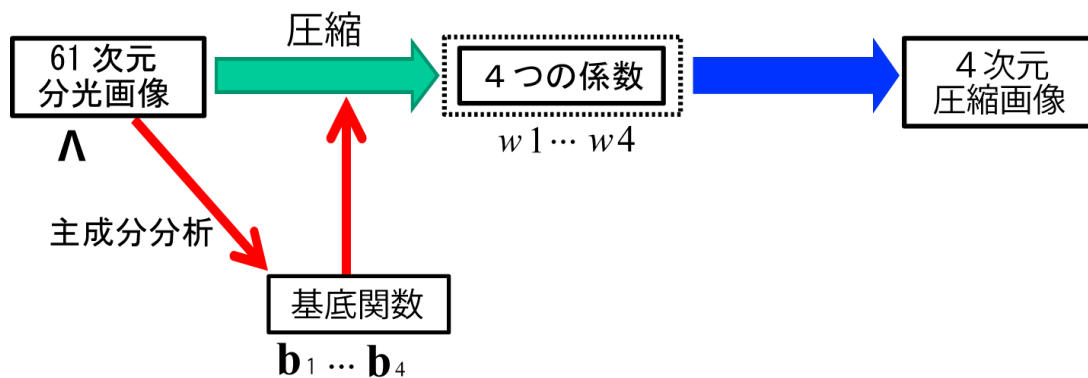


図 4.2 分光画像の圧縮プロセス(CPU 上での処理)

4.4.3 GPU を用いた分光画像の復号とレンダリング処理

ここではレンダリング処理について記述する。図 4.3 は本研究で提案するレンダリング処理の過程を概略図で示したものである。ここでは 4 次元に圧縮されたと仮定して処理内容を

説明する．まずレンダリングプロセスに入る前に GPU 側には事前に基底関数を読み込ませておく．その後，実際のレンダリング処理の段階で以下の処理を行う．① CPU から 4 次元の圧縮画像を GPU 上に転送し，GPU 上のローカルメモリに一時的に保存（キャッシュ）する．② 4 次元のデータを SIMD のそれぞれのパイプラインに割り当てる．③ 一画素ごとに(8)式により 61 次元の分光分布に復号する．④復号した分光分布を(2)式の反射モデルに与え色信号の計算を行う．⑤得られた色信号を(3)式に与えて三刺激値として色情報を得る．その後，デバイスの色特性に合わせてデバイス固有の色空間に変換する．

以上のプロセスにより画像が生成される．

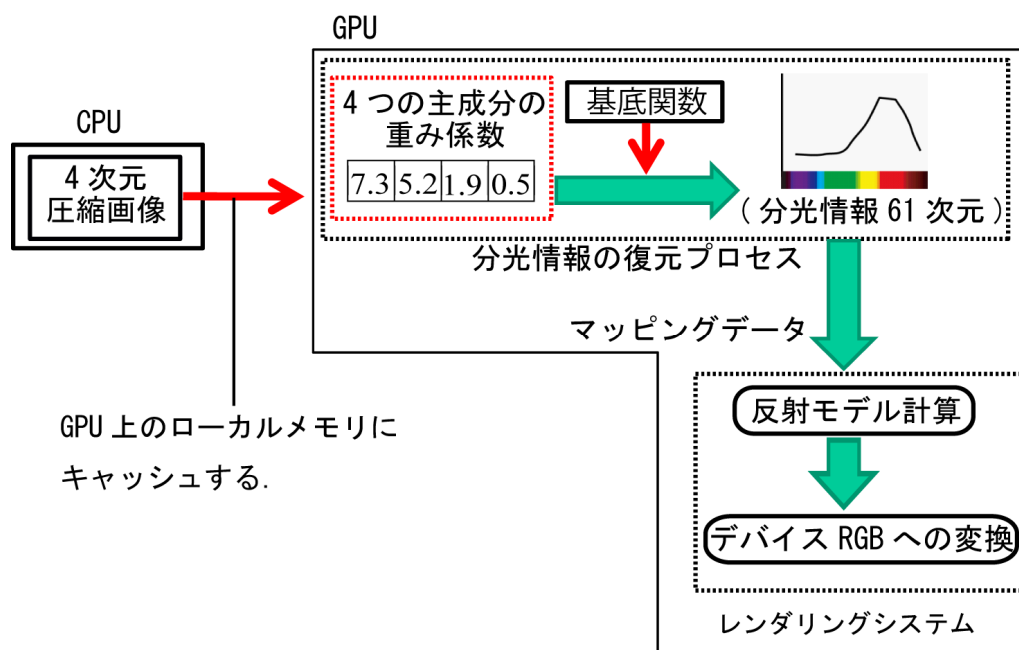


図 4.3. GPU を用いたレンダリング処理の概略図

4.5 環境光源の空間分布（全方位の分光画像）の獲得

本稿では分光画像の使用例として Image Based Lighting を用いた映像生成を行う．この方法では高解像度の全方位光源の空間分布情報を分光画像として必要とする．ここでは2種類の画像を用意する．

4.5.1 屋外（太陽光）の全方位画像の獲得

屋外の画像は文献[28]の方法で屋外の全方位画像を獲得した．この方法では高解像度の RGB カラーカメラと 2 枚のカラーフィルタにより構築した 6 バンドのマルチバンドカメラと魚眼レンズを用いて照明光源の全方位空間分布を計測した．このカメラから得られた 6 次元のカメラ出力から各画素に対して連続的な分光分布を推定した．

4.5.2 室内（蛍光灯）の全方位画像の獲得

本研究の特徴的なところは、蛍光灯などの分光分布の変動が激しいような画像にも適用できることであるが、この場合、その場合光源を持つような全方位画像を獲得する必要がある。しかし、先の屋外の全方位画像を獲得した方法ではその場合光源は計測できない。そこで室内の画像は文献[16]の方法を用いた。この方法は、シーン内に同時に存在する光源の種類が限定されるものの分光分布の変動が激しい光源の分光分布が推定できるという利点がある。

4.6 実験

提案手法で分光ベースのレンダリングを行った。本研究で使用した画像生成環境は、Intel Core i7 2.66GHz の CPU を搭載した PC を用いて、レンダリング環境として GPU は nVidia 社製 GeForce GTX295(1792MB)、ディスプレイには Nanao EIZO SX-3031W-H を用いた。このディスプレイは 2560×1600 画素の解像度を持つウルトラハイビジョンディスプレイである。ソフトウェア環境として、グラフィックス API は OpenGL 2.1、シェーディング言語は GLSL を用いた。

この環境下でフルハイビジョン(1920×1080 画素)とウルトラハイビジョン(2560×1600 画素)それぞれでレンダリングした。

4.6.1 屋外シーン(太陽光)でのレンダリング

図 4.4 は屋外の全方位の光源分布マップである。この画像は 6 チャンネルのマルチバンドカメラと魚眼レンズで屋外シーンを計測したものである。こちらはカメラの解像度から画像解像度は 2048×1024 画素となった。この画像は各画素 32bit 浮動小数点情報で 61 個のデータを持つ。この分光画像は約 512MB の記憶容量となる。まずこの画像に対して主成分分析を行い、分光分布の基底関数を求めた。図 4.5 はここで求めた基底関数のうち寄与率の高いものから 4 本を示したものである。この画像中の分光分布は主成分の累積寄与率は、基底関数が 2 つ、3 つ、4 つのとき、それぞれ 0.962, 0.985, 1.000 となり、4 個の基底関数でほぼ 100% 復元できることがわかった。この場合、使用する記憶容量は無圧縮の場合と比較して 4/61 となり、使用した記憶容量は約 33MB となった。図 3.6 は分光的な全方位光源分布画像を用いて映像化した例である。レンダリング速度は解像度がフルハイビジョンの場合は、圧縮前のデータ使用時が 9.6fps だったのに対し圧縮後は 56.3fps となった。また、ウルトラハイビジョンの場合は、圧縮前のデータ使用時が 6.5fps だったのに対し圧縮後は 33.2fps となった。

全方位画像に記録されている分光分布を圧縮前と圧縮後で復元状態を比較した。太陽光源のシーンである図 4.4 の領域 1、領域 2、領域 3、領域 4 において基底関数が 2 つの場合、3

つの場合、4 つの場合、それぞれにおいて元の分光分布と比較した。また、同時に従来手法である Wavelet 変換に基づく圧縮によるものと比較した。Wavelet 変換に基づく方法は4 つの Wavelet 係数による圧縮なので圧縮率は、本手法の基底関数4 本のときと同じく $4/61$ となる。分光分布の復元結果を図 4.7, 図 4.8, 図 4.9 に示す。ここで赤い実線は元画像の分光分布を示し、緑の点線は圧縮した分光分布を基底関数で復号したものである。そして、青の点線は Wavelet 変換による圧縮データを復号したものである。この場合の差分画像をそれぞれ図 4.10, 図 4.11, 図 4.12 に示す。ただし視覚的に分かりやすくするため、ここでは画像の明度を 140% に増幅させている。図 4.13 は Wavelet 変換による圧縮画像を復号したものを元画像と比較した差分画像である。表 4.1 は圧縮した分光分布を復号したときの平均二乗誤差をまとめたものである。提案手法では基底関数が 2 つの場合は誤差が多いが、3 つの場合では誤差が減少していき、基底関数が 4 つになれば、誤差がほぼなくなっていることがわかる。また、表 4.1 の誤差比較からも基底関数が 3 つ以上の場合には従来法よりも誤差が減少していることがわかる。

4.6.2 屋内シーン(蛍光灯)でのレンダリング

次に分光分布の波長変動が激しい光源の例として蛍光灯照明が支配的な室内のシーンを取り上げた。こちらはカメラの解像度から画像解像度は 7524×3762 画素となった。この画像も屋外画像と同様に各画素 32bit 浮動小数点情報で 61 個のデータを持つ。画像サイズは 6.9GB となる。このサイズは 32bit OS のメモリ空間を超えており、また GPU のローカルメモリ容量を大幅に超えているため無圧縮状態ではレンダリングができなかった。このシーンにおいて図 4.14 の領域 1, 領域 2, 領域 3, 領域 4 において基底関数が 2 つの場合、3 つの場合、4 つの場合、それぞれにおいて元の分光分布と比較した。図 4.15 はここで求めた基底関数のうち寄与率の高いものから 4 本を示したものである。この画像中の分光分布は主成分の累積寄与率は、基底関数が 2 つ、3 つ、4 つのとき、それぞれ 0.988, 0.999, 1.000, となり、4 個の基底関数でほぼ 100% 復元できることがわかった。ここでも同じく $4/61$ の圧縮率となり圧縮後の画像は 431.9MB となった。分光分布の復元結果を図 4.16, 図 4.17, 図 4.18 に示す。ここで赤い実線は元画像の分光分布を示し、緑の点線は圧縮した分光分布を基底関数で復号したものである。そして、青の点線は Wavelet 変換による圧縮データを復号したものである。

また、同時に従来手法である Wavelet 変換に基づく圧縮によるものと比較した。この場合の差分画像をそれぞれ図 4.19, 図 4.20, 図 4.21 に示す。ただし視覚的に分かりやすくするため、ここでは画像の明度を 140% に増幅させている。図 4.22 は Wavelet 変換による圧縮画像を復号したものを元画像と比較した差分画像である。表 4.2 は圧縮した分光分布を復号したときの平均二乗誤差をまとめたものである。提案手法では基底関数が 2 つの場合は誤差が多

いが、3つの場合では誤差が減少していき、基底関数が4つになれば、誤差がほぼなくなっていることがわかる。また、表2の誤差比較からも基底関数が3つ以上の場合は従来法よりも誤差が減少していることがわかる。図4.23は分光的な全方位光源分布画像を用いて映像化した例である。レンダリング速度は解像度がフルハイビジョンの場合は、圧縮前のデータ使用時が9.6fpsだったのに対し圧縮後は56.3fpsとなった。また、ウルトラハイビジョンの場合は、圧縮前のデータ使用時が6.5fpsだったのに対し圧縮後は33.2fpsとなった。

表 4.1 屋外シーン（太陽光照明下）の平均二乗誤差

	提案手法			従来法
	基底関数 2	基底関数 3	基底関数 4	Wavelet
座標 1	1.48×10^1	5.57×10^0	3.00×10^{-5}	1.19×10^1
座標 2	5.33×10^0	1.13×10^0	1.00×10^{-5}	3.52×10^0
座標 3	1.52×10^1	4.05×10^0	4.00×10^{-5}	5.35×10^0
座標 4	5.23×10^1	1.80×10^0	2.10×10^{-4}	5.40×10^1

表 4.2 室内シーン（蛍光灯照明下）の平均二乗誤差

	提案手法			従来法
	基底関数 2	基底関数 3	基底関数 4	Wavelet
座標 1	2.10×10^{-1}	3.00×10^{-5}	3.00×10^{-5}	4.71×10^1
座標 2	3.23×10^0	2.00×10^{-5}	2.00×10^{-5}	2.58×10^1
座標 3	1.41×10^1	3.90×10^{-4}	3.70×10^{-4}	6.08×10^2
座標 4	1.33×10^0	3.00×10^{-5}	3.00×10^{-5}	4.04×10^1

4.7 まとめ

本研究では分光画像中の分光情報の統計的特徴を解析し、分光画像の画像品質を保ちながら分光分布データを圧縮する方法を開発した。これにより分光ベースレンダリングを行うときに高解像度の分光画像を扱えるようにして物体をレンダリングできる手法を提案した。本手法では、直接対象画像の分光分布の統計的特性を使用して画像圧縮するので、特に文献[4]の方法のような「分光情報は緩やかに変化する」という前提条件は必要としないことが特徴である。また、直接的に対象画像の情報を使用するので、同じ圧縮率であれば従来法よりも高い復号精度が得られた。

また本手法の応用例として IBL へ本手法を適用した。GPU 上で分光的なマッピング画像を用いてウルトラハイビジョンの高解像度 3DCG を生成して、圧縮前と圧縮後の分光画像を使用してレンダリング速度を比較し、その有効性を示した。

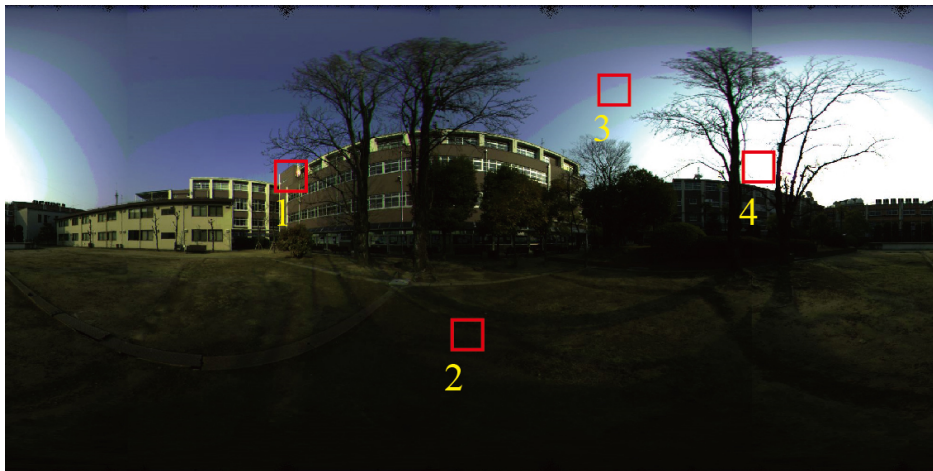


図 4.4 屋外シーンの全方位光源分布マップ

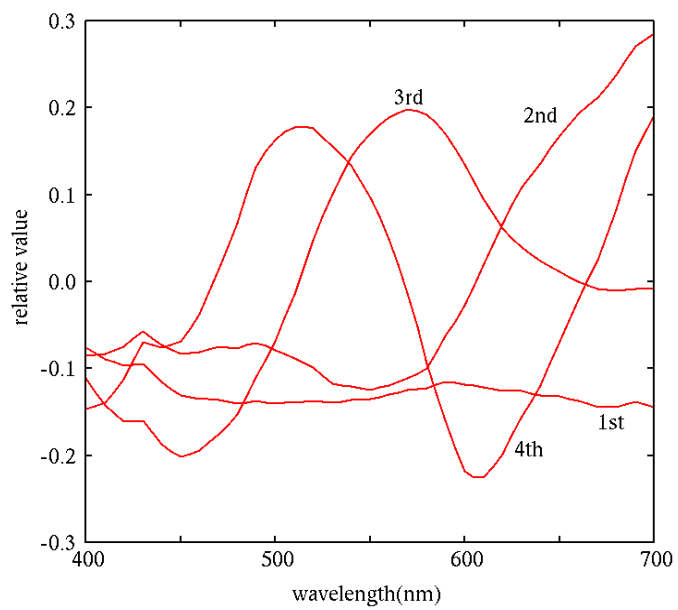


図 4.5 光源分布画像から得た分光分布の基底関数(屋外)



図 4.6 分光的な全方位光源分布を使用した映像生成例(屋外)

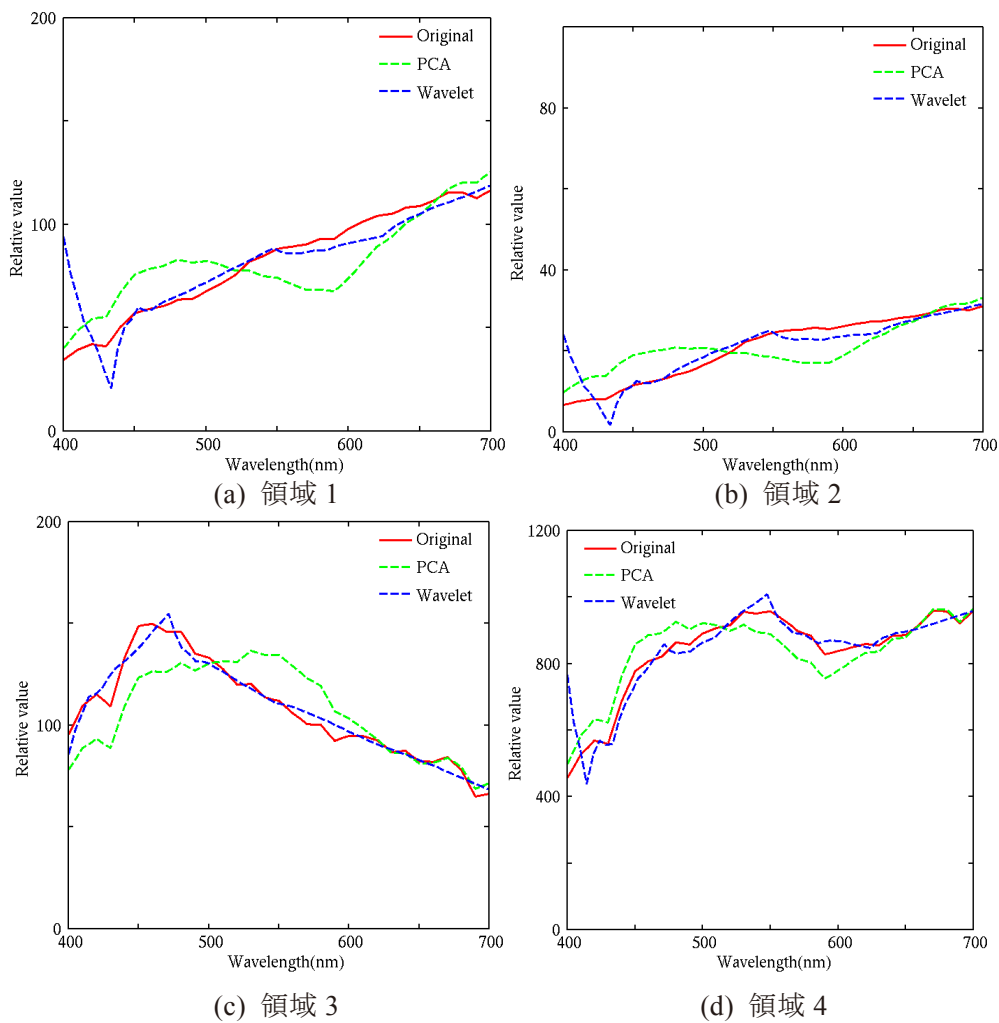


図 4.7 基底関数 2 つの場合の分光分布の再現精度 (屋外)

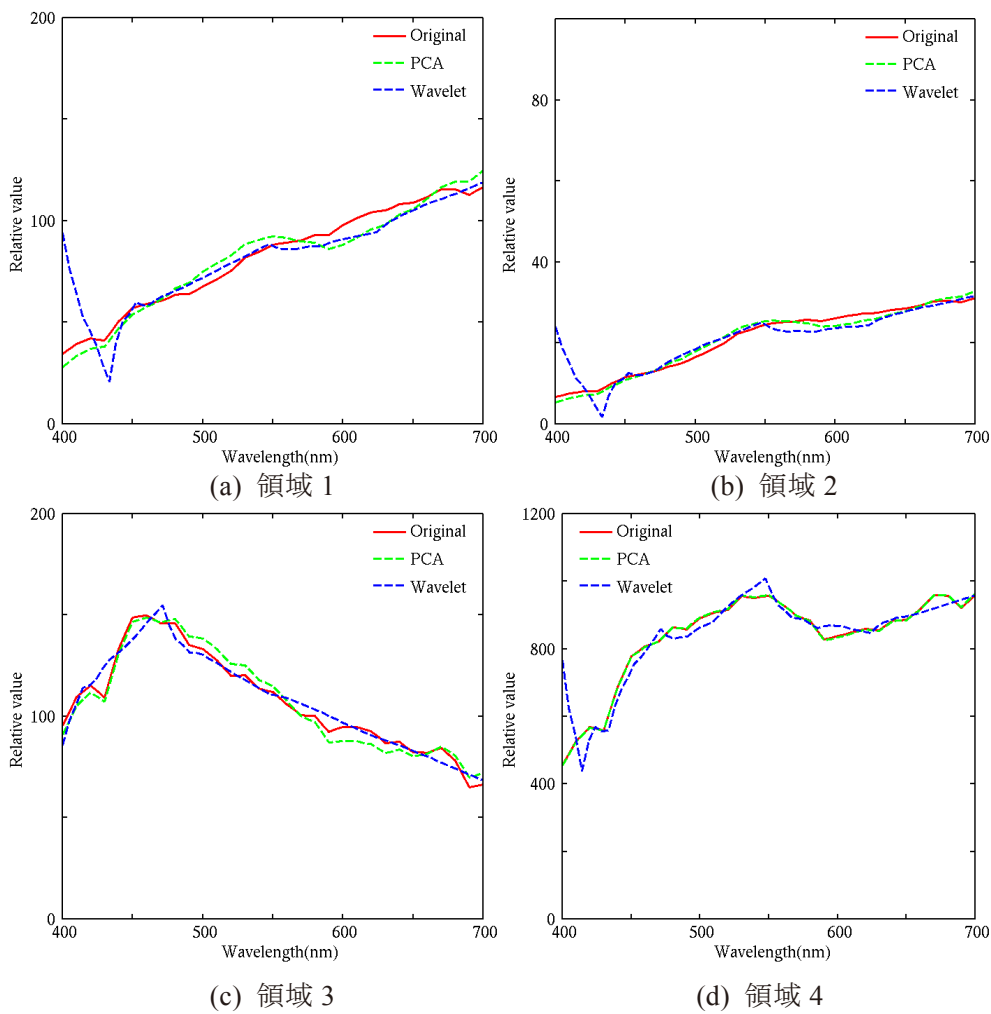


図 4.8 基底関数 3 つの場合の分光分布の再現精度 (屋外)

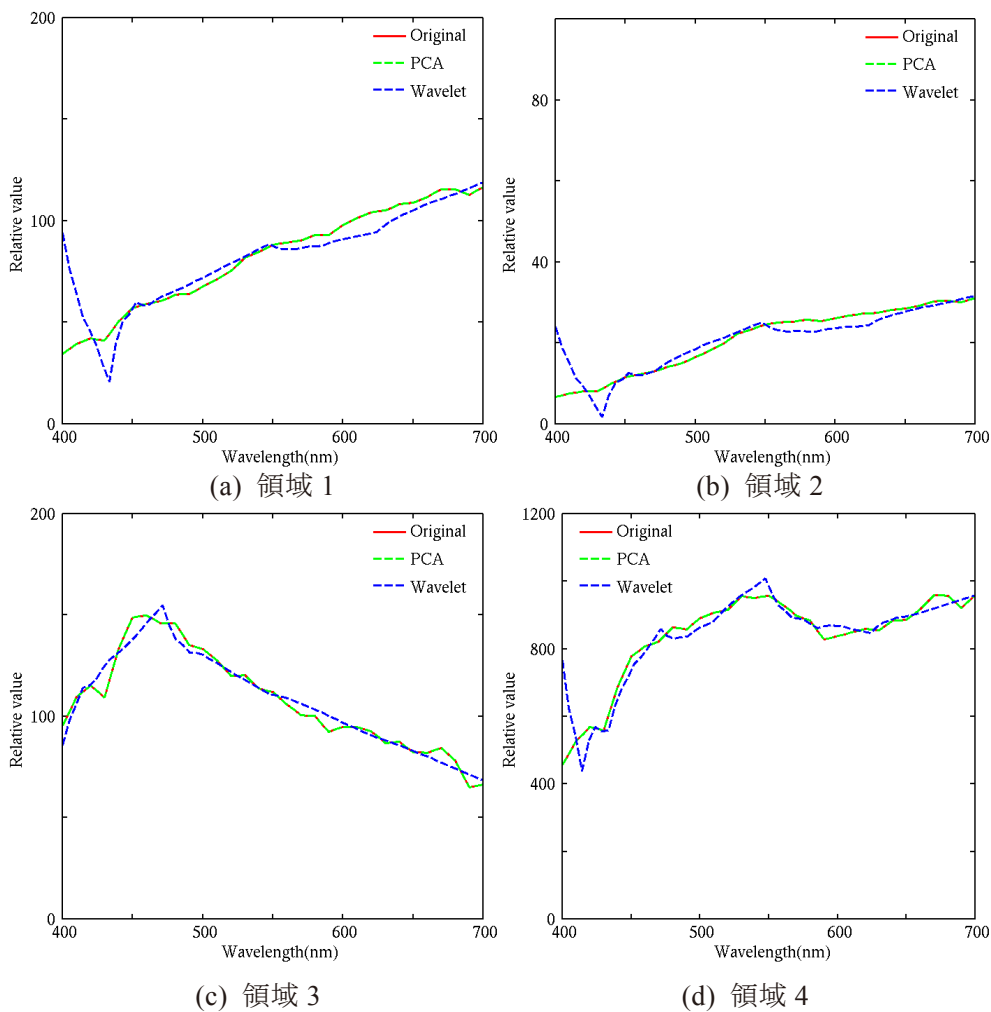


図 4.9 基底関数 4 つの場合の分光分布の再現精度 (屋外)



図 4.10 基底関数 2 つで再現した画像の差分画像 (屋外)



図 4.11 基底関数 3 つで再現した画像の差分画像 (屋外)



図 4.12 基底関数 4 つで再現した画像の差分画像 (屋外)



図 4.13 Wavelet で再現した屋外シーンの差分画像

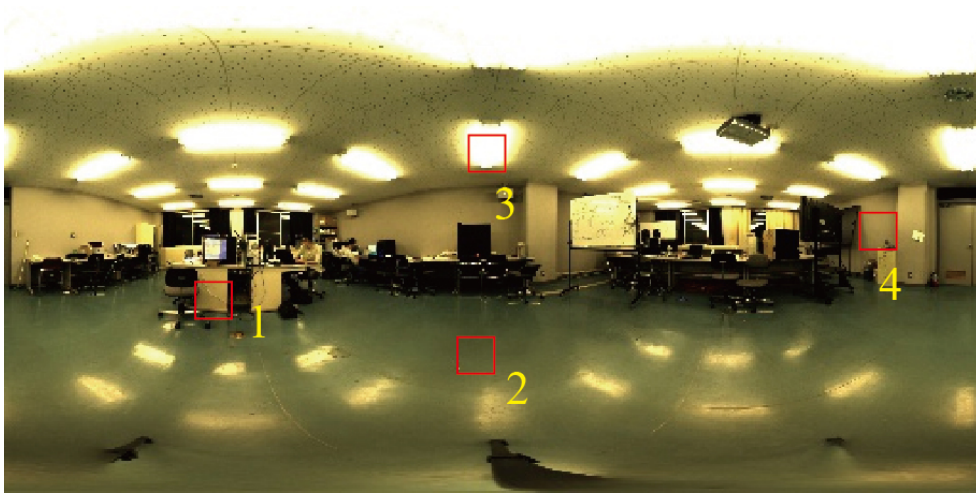


図 4.14 室内シーンの全方位光源分布マップ

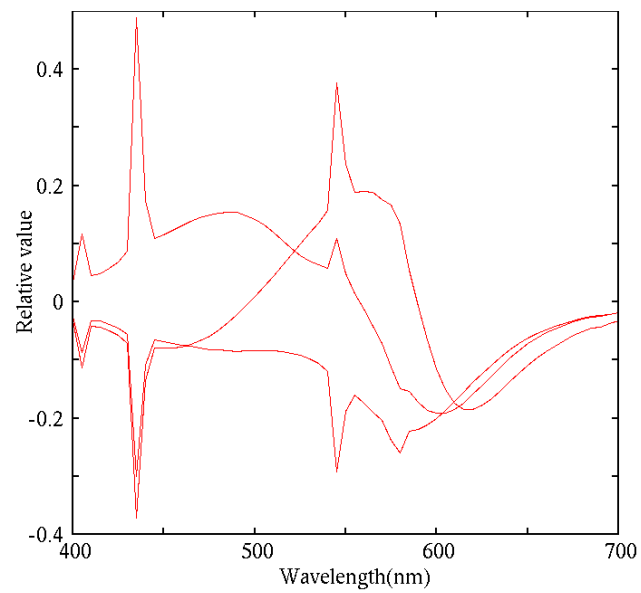


図 4.15 光源分布画像から得た分光分布の基底関数(室内)

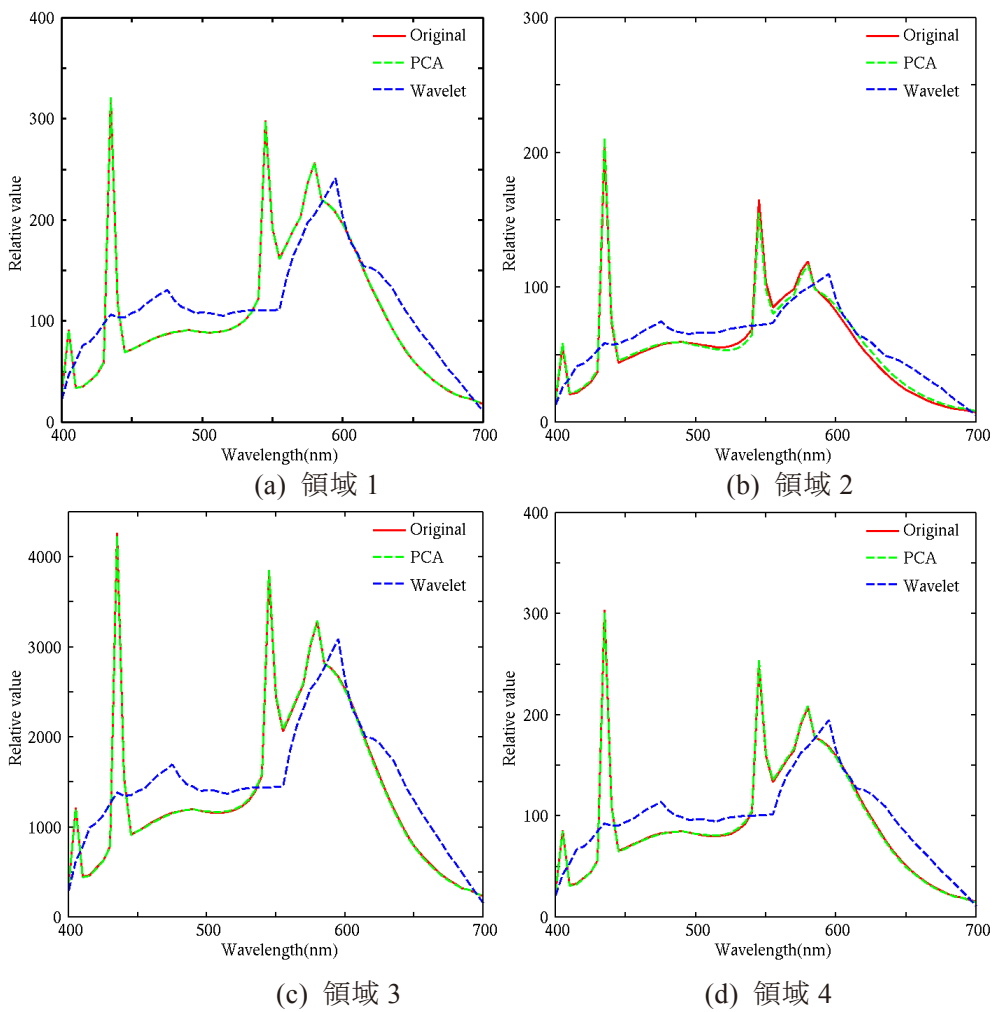


図 4.16 基底関数 2 つの場合の分光分布の再現精度 (室内)

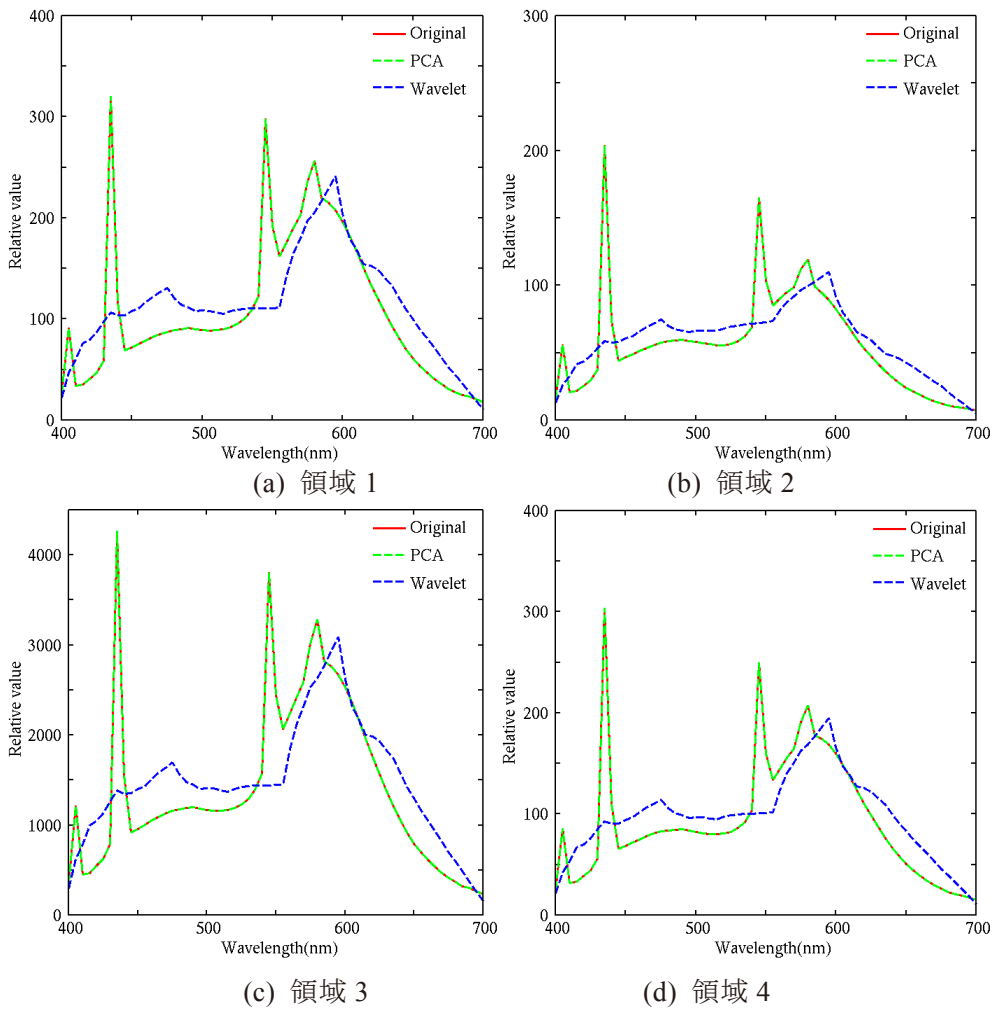


図 4.17 基底関数 3 つの場合の分光分布の再現精度 (室内)

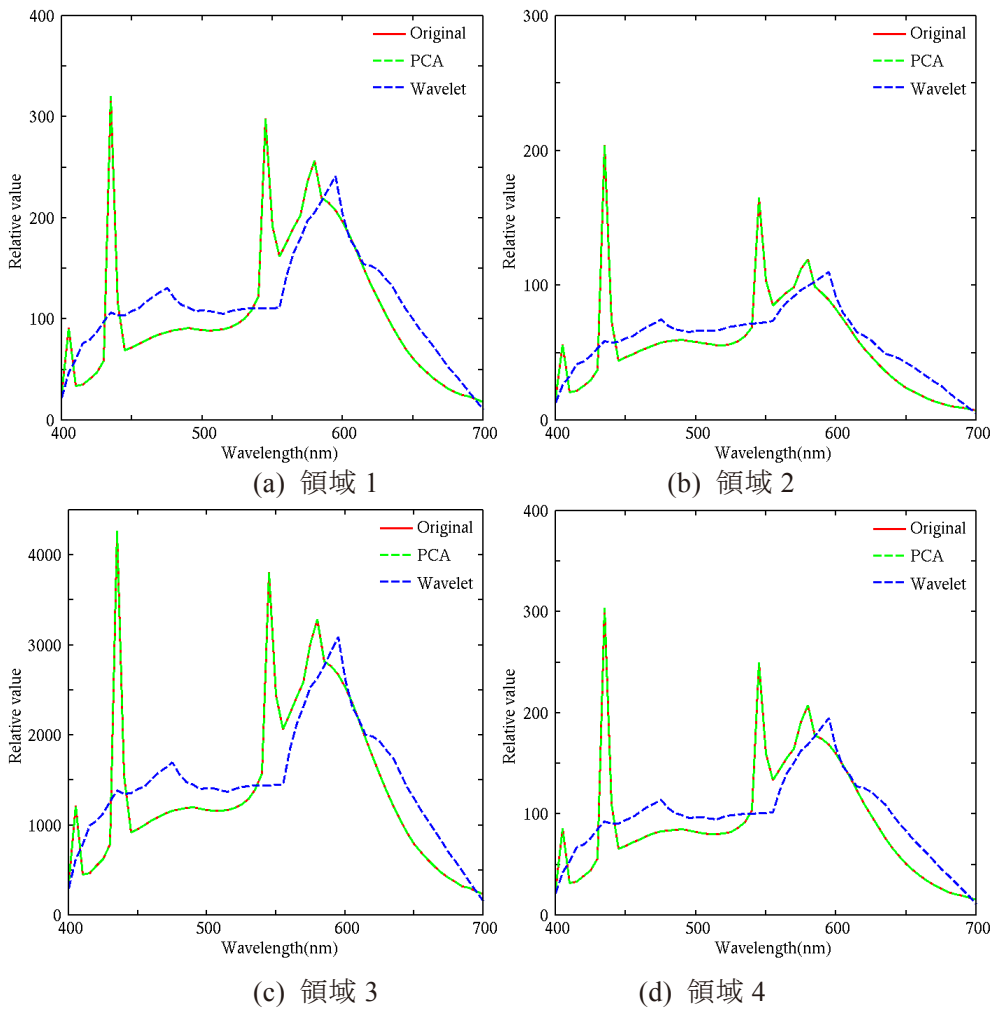


図 4.18 基底関数 4 つの場合の分光分布の再現精度 (室内)

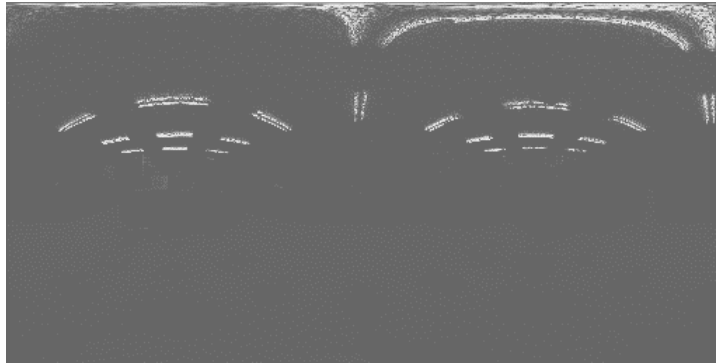


図 4.19 基底関数 2 つで再現した画像の差分画像 (室内)



図 4.20 基底関数 3 つで再現した画像の差分画像 (室内)



図 4.21 基底関数 4 つで再現した画像の差分画像 (室内)



図 4.22 Wavelet で再現した室内シーンの差分画像

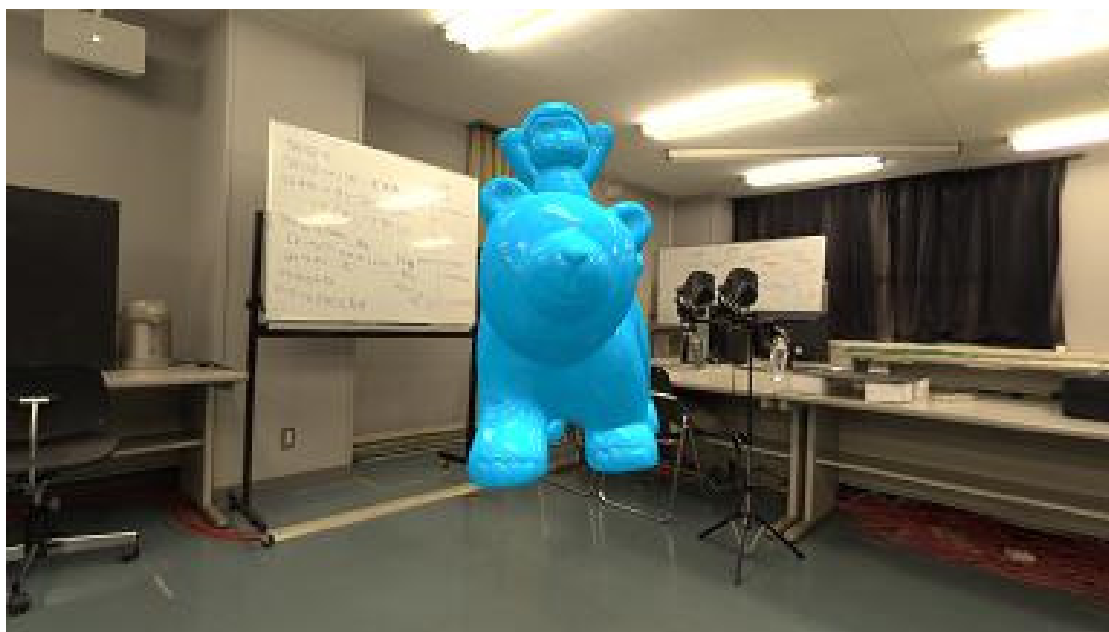


図 4.23 分光的な全方位光源分布を使用した映像生成例
(室内)

第5章

分光レイトレーシング法に基づいた相互反射の色再現手法

5.1 本章の概要

近年、3次元コンピュータグラフィックス(3DCG)技術が美術品のデジタルアーカイブの他にも様々な製品デザイン分野の支援ツールとして用いられるようになってきている。このとき実在する物体あるいはこれから制作予定の物体を実際の照明環境や鑑賞方向の違いにより生じる物体の見えを3DCGで精密に再現・予想[5]することができれば、デザイナーは様々な試行錯誤をコンピュータ上で迅速に行うことが可能となる。これはデジタル空間で一種のモックアップを制作する技術と考えられるが、このとき問題となることは3DCG映像と実際の物体との違いである。特に様々なシチュエーションを想定して、いろいろなシーンで自分がデザインした製品を確認したい場合、複雑なシーン照明環境下での実際のシーン内で周囲環境や物体間の精密な映り込みが再現できないことが問題となる。このとき映画やゲームなどのエンターテイメント分野に目を向けると、こういった映り込みなどがリアルに表現されていると言われるが、これらは詳細な物理法則に基づいたものではなく、CGクリエイター個人の技術力や主観に大きく依存する。つまり、これらは3DCGと実際の物体(製品)とを並べて比較した場合、その再現精度は必ずしも高いとは言えない。ここで問題となるのは対象を美しく表現できるかということではなく、対象を精密に再現できるかという点である。

そこでこれまで本研究ではそういったデザイン支援のためにコンピュータ上にデジタルモックアップを制作するための物体再現手法を開発する。ここでは、まず反射モデルと呼ばれる物体表面の材質や反射特性を詳細な数学モデルで記述し、そのモデルに基づいて物体をCG再現する手法を開発した[5]。従来のRGBカラー情報に基づいた色再現手法では、色情報が映像機器の特性や照明環境に依存するという問題が生じる[30]。こういったデバイスや照明環境に依存しない手法として分光ベースの色計算手法が有効である[4,5,16,26]。分光反射率や分光透過率といった分光情報は物体固有の物理情報なのでデバイスや照明環境に依存しないという利点があり、また、RGB情報では相互反射を計算するときに、反射計算のたびに計算誤差が蓄積するという問題があり、反射回数が増えるたびに計算誤差が大きくなるという問題が解決できる[5]。

相互反射の計算においてはレイトレーシング法が有効である。レイトレーシング法は、Whittedが1980年に発表した手法で光の反射プロセスを精密に視点から逆に辿って光反射を計算して鏡面反射などを精密にCGで表現できる手法であり、現在においてもCG分野では広く使われている[31]。しかし、この方法はレンダリングのための計算精度は高いものの、処理量が多いため計算時間が膨大にかかってしまうという問題がある。特に照明の種類や方向、観賞方向を自由に指定したいというインタラクティブな操作上の問題が生じる。一般にデザイン分野での応用を考えるとユーザの操作に対してリアルタイムに応答するための速度が必要で、従来のように高精度なCGを生成するために十分な時間をかけてCG生成をすることが難しくなってきた。そういった中で近年ではGraphics Processing Unit(GPU)と呼ばれるグラフィックス処理

専用ハードウェアが発展してきており、それを用いた CG 生成が一般に行われるようになってきた。しかし、これまでの GPU を用いたレンダリングは、主に Z バッファ法がレンダリングアルゴリズムとして用いられている。しかし、このアルゴリズムは相互反射や影の計算が難しいという問題点がある[32]。この問題はアミューズメント分野ではあまり深刻な問題とはならないが、デザイン支援ツールや精密な色再現を目的としたデジタルアーカイブといった用途では致命的な問題となる。特に相互反射や透過を表現する場合、分光的に光路計算が行われなければ、光線追跡の過程において再現する色の計算誤差が増加するという問題が生じる。こういった問題に対して相互反射に関するいくつかの研究がなされている。まず物体間の相互反射を画像から解析する研究[33][34]、シーン内における拡散反射や鏡面反射による相互反射の解析を行い CG 生成する研究[35-39]がある。しかし、これらの研究はいずれも相互反射を含んだ物体の CG 生成の手法を示すもので、実際の物体の色再現精度を向上させることを目的としていない。

相互反射等の色を高精度に再現するためには、レイトレーシング法等の大域照明モデル[37]と分光的なモデルに基づいた映像生成手法が有効である。しかし大域照明の計算は通常の GPU に実装されている固定されたレンダリングパイプラインでは計算処理が難しい。現在、レイトレーシング法を用いて高速にレンダリングする手法として NVIDIA 社が提供している GPU の統合開発環境 CUDA 等を用いて実装した例がある[40]。これにより高速なレンダリングが可能となるが、ここでの主たる目的はレイトレーシングの高速化が主たる目的で色再現については考慮されていない。

そこで本研究ではこういった問題に対して、グラフィックス API である OpenGL を用いながらもグラフィックスパイプラインに依存しないように GPU 上で使用できる分光ベースのレイトレーシング法を提案する。このとき分光情報による処理速度や記憶容量の問題が発生する。たとえば Image Based Lighting (IBL) やテクスチャマッピングを行うときに分光情報による画像サイズが極端に大きくなりバス帯域を圧迫したり、GPU 側のローカルメモリを圧迫したりといった問題が発生する。この問題を解決するためにはレンダリングアルゴリズムに加えて分光情報の圧縮による高速化手法を合わせて提案する。そして、本研究で GPU 上に実装した分光ベースのレイトレーシング手法で生成した画像の色再現精度を検証する。実際に存在する物体を相互反射や透過も含めて提案手法で 3DCG 再現し、その色再現精度を視覚実験だけでなく、分光放射輝度計により計測し、色度座標上で定量的に比較することで提案手法の妥当性を検証する。さらに従来手法である RGB ベースのレンダリング手法と提案手法とで色再現精度を比較するために、実物と再現 CG の間の誤差を均等色空間 CIE-L*a*b*空間上の色差 ΔE で検証する。

5.2 分光ベースの光反射モデルによる映像生成

5.2.1 物体表面の光反射のモデル化

物体表面の光反射のプロセスは、光反射モデルと呼ばれる数学モデルで記述する。本研究では、この光反射モデルを分光的に拡張し、物体間の相互反射を数学的に記述する。人間が物体を見るというメカニズムは光源から出た光が物体表面で反射して視覚系に入射する光反射のプロセスのことを意味する。図 5.1 はこの光反射モデルを幾何的に表現した概略図である。本研究では光学分野において光反射を物理的に詳細に記述した Torrance-Sparrow モデル[6][19]を採用し、相互反射に適用できるように拡張した。このモデルで物体表面の粗さを表現する。このとき \mathbf{V} は視線方向ベクトル、 \mathbf{N} は物体の法線ベクトル、 \mathbf{L} は照明方向ベクトルである。 \mathbf{N} と \mathbf{L} のなす角は θ_i 、 \mathbf{N} と \mathbf{V} のなす角は θ_r となる。このモデルは表面粗さを表現するため物体表面が微小面で構成されていると仮定している。この微小面の法線ベクトルは \mathbf{H} である。 \mathbf{L} と \mathbf{H} のなす角は θ_H であり、 \mathbf{N} と \mathbf{H} のなす角が ϕ である。視覚系に到達する色信号 $C(\lambda)$ は光の波長 λ の関数として(5.1)式で示す。ここで右辺第 1 項は拡散反射成分、第 2 項と第 3 項は鏡面反射成分であるが、第 2 項は粗さを持つ表面の鏡面反射(gloss)、第 3 項は滑らかな鏡面(perfect mirror)を示している。 $S(\lambda)$ は物体表面の分光反射率、 $E(\lambda)$ は光源の分光分布である。 α, β, χ はそれぞれ各項の重み係数である。 F は Fresnel 関数である。屈折率は n である。 D は物体表面の滑らかさを表す微小面の分布関数でありガウス分布を仮定した。ここでは μ 値によって滑らかさが決まる。 G は幾何的減衰係数である。

$$C(\lambda) = \alpha \cos \theta_i S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(n, \theta_H) D(\mu, \phi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_r} E(\lambda) + \chi F(n, \theta_i) E(\lambda) \quad (5.1)$$

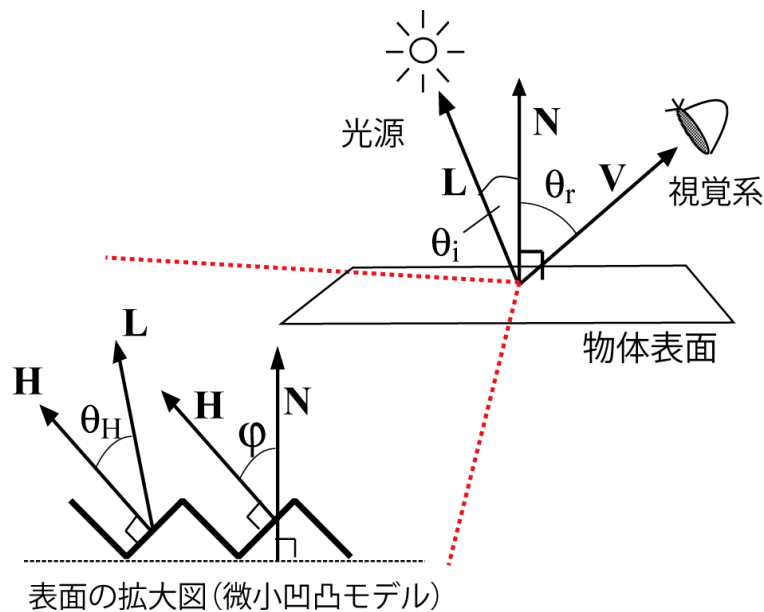


図 5.1 光反射の幾何モデル

5.2.2 人間の視覚系の応答とディスプレイへの表示

視覚系に到達した色信号は脳内で色情報として認識される。ここで(1)式で計算された視覚系に入射する色信号は純粹に物理的な光の分光分布である。人間が認識する色情報は、色信号と等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ を用いて三刺激値 CIE-XYZ として(5.2)式のように求める[1]。ここで計算した三刺激値から、(5.3)式のように各ディスプレイの色特性に応じて表示するデバイスの RGB 空間へ変換する[1]。表示するディスプレイは事前にキャリブレーションしたものをを用いる。ここで得られた三刺激値は映像デバイスに依存しない情報であるため、実際にディスプレイなどの映像デバイスに出力するためには生成した画像を各デバイス固有の色空間に変換しなければならない。ディスプレイデバイスの表示特性は一般にルータ条件を満たさないので非線形変換が含まれる。次に CIE-XYZ から実際のディスプレイデバイスの RGB へ変換する。ここでの変換プロセスは(5.4)式に示す。まず三刺激値 XYZ を 3×3 の変換行列 \mathbf{M} により線形 RGB 値 $[R_L, G_L, B_L]^T$ に変換する。

次にディスプレイデバイスの非線形な入出力特性であるガンマ特性を補正する。(5.5)式のように線形 RGB 値をデバイス RGB 値 $[R_d, G_d, B_d]^T$ に変換する。ここで γ は RGB 輝度の非線形性を補正するためのパラメータであり、個々のディスプレイデバイスに依存する。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} C(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (5.2)$$

$$[R_L, G_L, B_L]^T = \mathbf{M}[X, Y, Z]^T \quad (5.3)$$

$$[R_L, G_L, B_L]^T = \mathbf{M}[X, Y, Z]^T \quad (5.4)$$

$$[R_d, G_d, B_d]^T = [R_L^\gamma, R_L^\gamma, R_L^\gamma]^T \quad (5.5)$$

5.3 レンダリングパイプラインへの光反射モデルの実装

Graphics Processing Unit(GPU)とは、PC 内に搭載されたグラフィックス処理専用のハードウェアのことである[31]。先に示した光反射モデルをコンピュータ上に実装して CG 生成を行うためにはこの GPU 上に提案モデルを実装する必要がある。ここで CG 生成を行うときの一連のプロセスをレンダリングパイプラインあるいはグラフィックスパイプラインと呼ぶ。GPU の構造はこのレンダリングパイプラインが直接ハードウェア化されたものと考えることができる。図 5.2 がそのレンダリングパイプラインの例である。GPU はこのグラフィックスパイプラインの流れに沿って処理を進め、最終的に画像として出力される。物体の形状情報である頂点情報はバー

テクスシェーダで処理され、光源位置や物体位置が得られる。次にフラグメントシェーダで実際に物体がラスタ化され各ピクセルの色計算を行う。ここで得られる色は物体の幾何情報と材質の情報をもとに分光ベースの光反射モデルで計算する。このため独自の反射モデル計算はフラグメントシェーダに実装する。

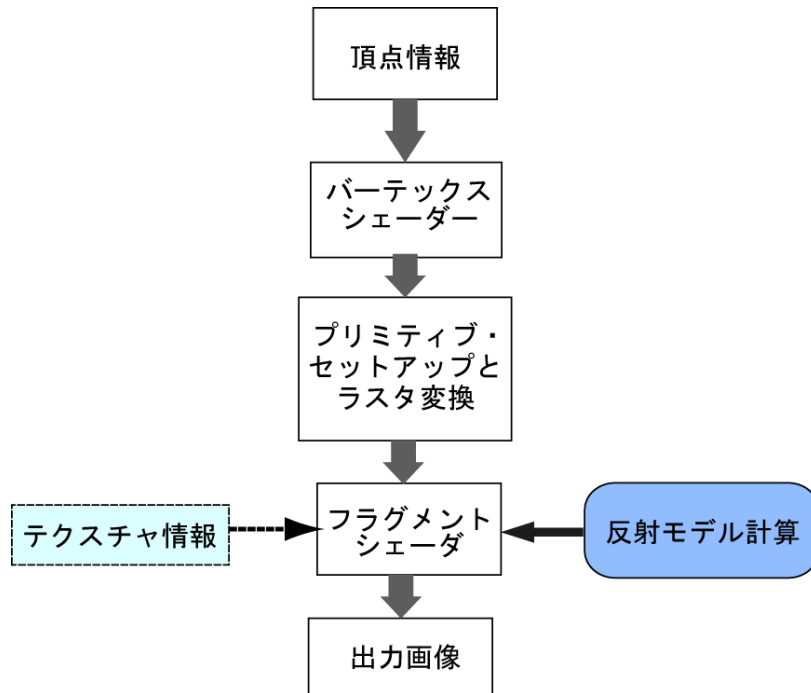


図5.2 一般的なGPUのグラフィックスパイプラインと独自の反射モデルの実装

5. 4 分光ベースのレイトレーシング法

5.4.1 レイトレーシングのアルゴリズム

本研究で採用するレイトレーシング法は相互反射や透過光の計算において有効である。レイトレーシング法とは視線探索法とも呼ばれ光線の経路を視点から光の向きを逆に探索することで、光反射の経路を精密に計算できる。図 5.3 はレイトレーシング法の概略図である。レイトレーシング法では視点からスクリーン上の各画素に対して視線(ray)を出し、反射や透過を繰り返しながら視線を追跡することで光の反射・透過や影(cast shadow)を表現する。このときレイトレーシング法の処理の流れは各画素に対して以下のステップで計算される。

- ① プリミティブ（形状）を3次元空間上に配置する。
- ② グローバル座標系から視点座標系へ変換する。
- ③ 視線探索（視点から視線方向に存在する物体の交差判定）
- ④ 交差した物体表面上で輝度計算する。（反射モデル）
- ⑤ 物体表面の特性で反射・透過が存在すれば、その経路を探索する。

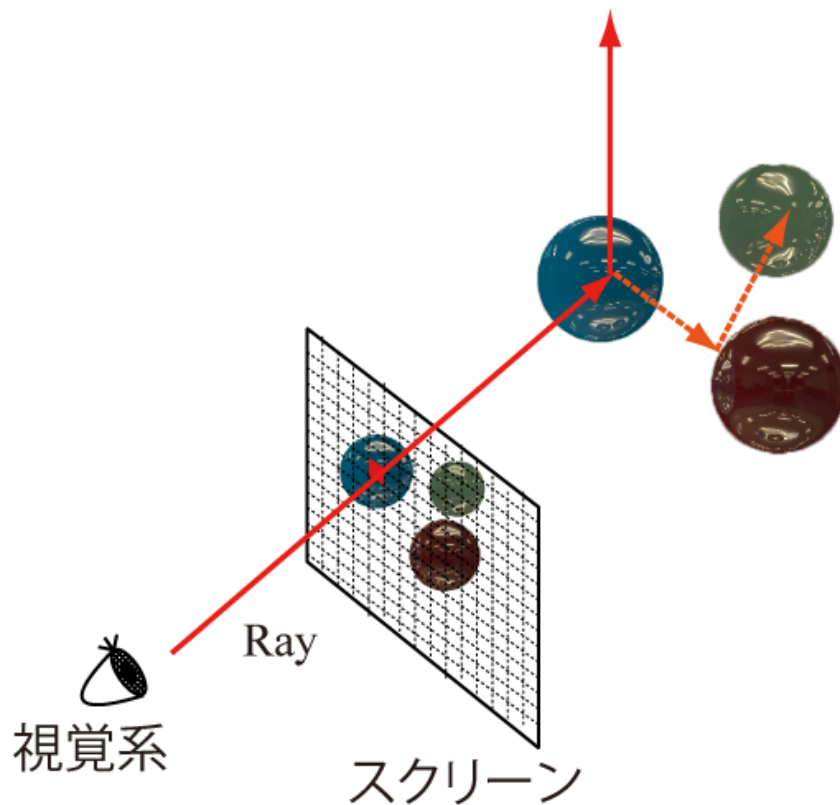


図5.3 レイトレーシング法の概略図

5.4.2 GPUへのレイトレーシング法の実装

レイトレーシング法を GPU 上に実装する上での問題は、GPU が想定するレンダリングパイプラインとレイトレーシングの反射透過の計算過程が厳密には一致しないことである。レイトレーシング法では GPU が想定するレンダリングパイプラインよりも複雑な反射透過計算が必要となる。そこで着目したのは、レイトレーシング法の特徴は各画素における処理が完全に独立しているため画素単位で並列処理が比較的容易に行えるという特徴である。GPU は内部に多数のプロセッサを持ち、バーテックスシェーダやフラグメントシェーダを GPU 内のプロセッサで並列に処理する。特にフラグメントシェーダの処理は画素毎に処理するため画素単位で MIMD (Multi Instruction Multiple Data)型の並列計算機と考えることができる。こういったハードウェアの性質から考えれば GPU のフラグメントシェーダにレイトレーシング法を実装することが効率的である。

図 5.4 は GPU 上のフラグメントシェーダにレイトレーシング法を実装している様子を示したものである。ここでグラフィックスパイプラインの中でフラグメントシェーダを汎用のプロセッサに見立てて、本来は他のパートで処理すべき処理も含めて全てフラグメントシェー

ダに実装している．このためバーテックスシェーダ等は実質的に本来 CG 生成時必要な頂点処理等を行わない．

この方法はフラグメントシェーダを利用した一種の **General Purpose GPU(GPGPU)** 処理と考えることができ，GPU 本来のグラフィックスパイプラインは直接使用しない．しかし，レイトレーシング法は画素毎に完全に独立して処理ができることから，フラグメントシェーダの性質に合ったアルゴリズムであるといえる．この性質を利用してシェーダユニットを並列に動作させ MIMD 型の並列計算機として使用する．

GPU は RGBA の 4 つのデータを同時に処理することを想定して設計されているため，4 つのデータを一まとめにして処理することが効率の面で有利である．分光情報を処理する場合もこの SIMD の特性を活かせるように 4 の倍数単位で処理を行う．そのため，本研究では 61 次元の分光情報を GPU 上では 4 の倍数である 64 次元のデータとして扱い，SIMD のパイプラインに割当て処理効率を向上させる．ただし，使用するデータは 61 次元データとして扱い，余った 3 次元分のデータはダミーとして空データを与える．

5.4.3 レイトレーシング法の高速化

レイトレーシング法の最大の問題はその計算速度である．レイトレーシング法では図 4.4 のように視点からスクリーン上の各画素に視線(ray)を出し，画素ごとに光の反射・透過や影を一つ一つ追跡するため計算時間が大幅にかかるという問題がある．レンダリングスクリーンの画素数×物体数の交差判定処理に加え，反射や透過が発生するごとにすべての物体との交差判定処理が必要になる．そこで本研究では図 5.5 のようにシーン中のすべての物体を包含するバウンディングボックスを作成し，そのバウンディングをスクリーン上に投影して 2 次元のレンダリングエリア（レンダリングする領域）を求める．そしてこのエリア外の視線探索は行わないことで視線探索数を減少させる．このことで無駄な視線探索を減らすことができるので高速化できる．

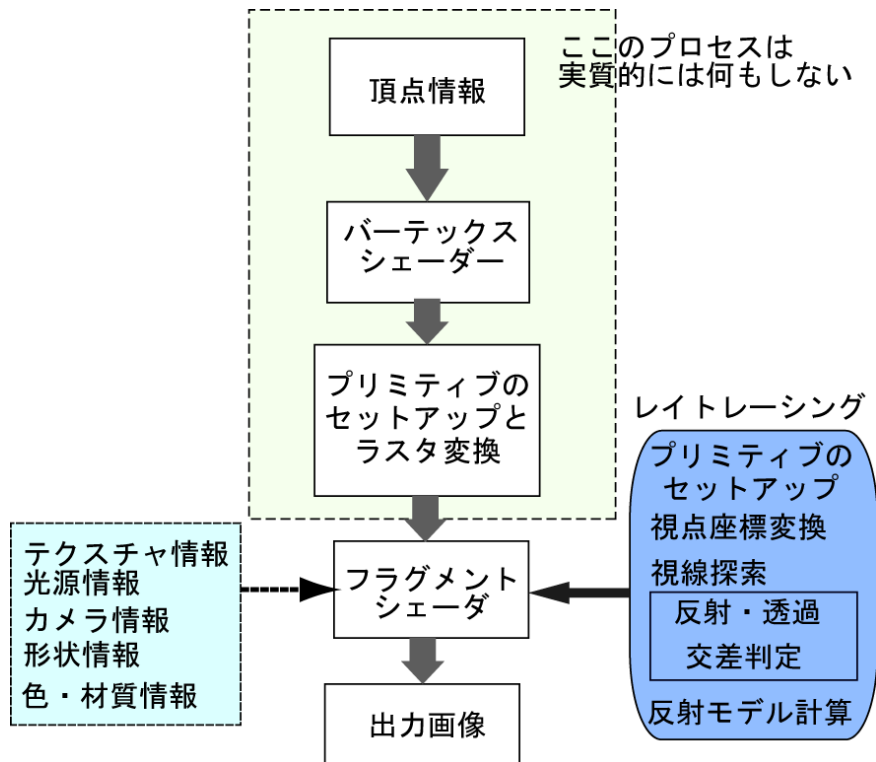


図5.4 フラグメントシェーダへレイトレーシングアルゴリズムの実装

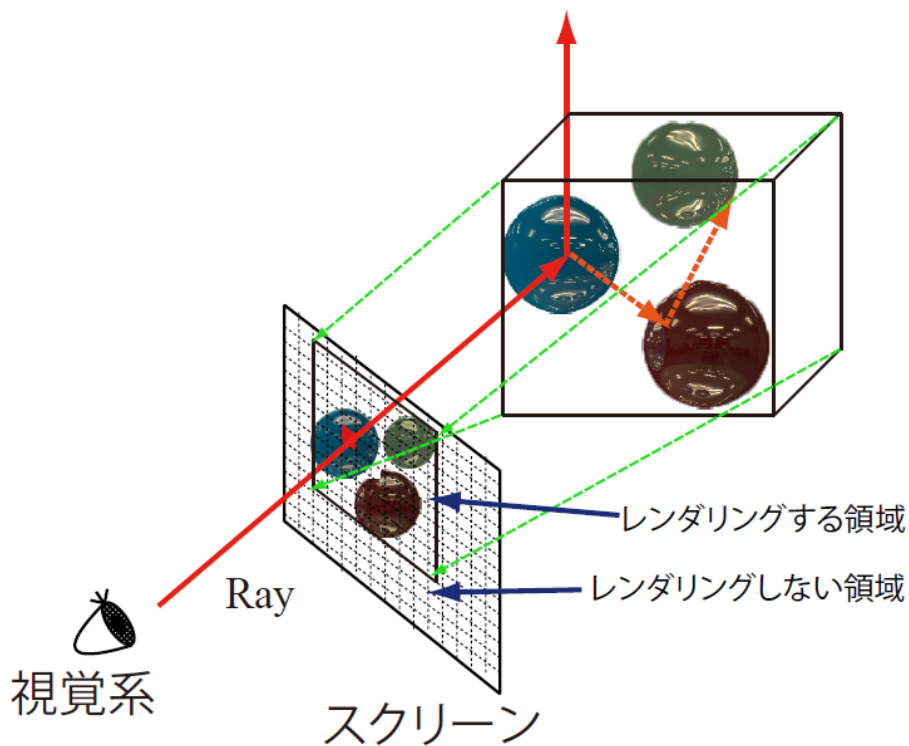


図5.5 バウンディングボリュームボックスを用いたレイトレーシングの高速化

5.5 分光画像圧縮によるレンダリングの高速化

RGB 画像は 3 次元情報であるのに対して、分光情報は連続関数である。通常、分光情報は可視波長域をサンプリングして有限個のデータとして扱う。このとき仮に可視波長域 400nm-700nm までを 5nm 間隔でサンプリングしたとすると、61 個のデータになる。つまり、単純に考えて分光情報は RGB 情報に対して 20 倍の処理量と計算時間が必要となる。

このため分光ベースレンダリングにおいては IBL(Image Based Lighting)やテクスチャマッピングでは RGB 画像と比較して画像サイズが極端に大きくなり HOST-GPU 間のバス帯域を圧迫したり、GPU 側のローカルメモリを圧迫したりといった問題が発生する。本研究ではこういった問題を解決するために分光反射モデルと分光情報の統計的性質を用いた分光画像圧縮技術を組み合わせることで GPU 上に分光ベースのレイトレーシングを高速化する。本研究では対象となる一枚の分光画像に対して主成分分析を行い、直接分光分布の基底関数を求める。このことによりスペクトル分布の変動が激しい分光分布であっても圧縮率やデータの復元率の低下は少なくなる。まず圧縮率を決めるために基底関数の数を決定しなければならないが、GPU は画像情報を R, G, B, A といった 4 つの数値データで記録することを想定している。また GPU はこの RGBA の 4 つのデータを同時に処理することを想定して設計されているため、計算処理を 4 つのパイプラインで同時に計算する一種の SIMD(Single Instruction Multiple Data)型の並列計算機と考えることができる。このため処理単位は 4 の倍数であることがデータ容量効率上、あるいは処理効率上から考えて望ましい。本研究では分光情報を GPU で処理するときは 61 次元の分光データを圧縮・復号処理では 64 次元情報として扱い、余った 3 次元分の情報は使用しない。

5.5.1 データ圧縮アルゴリズム

本研究で提案する処理は 2 つのプロセスで実現される。まず前処理として事前に分光情報を圧縮する。この部分はレンダリングプロセスとは独立し、オフラインで行うため予め CPU 側で計算する。このときの処理は図 5.6 のような処理となる。与えられた分光画像は主成分分析して、その基底関数の重み係数画像として記録される。このとき仮に 4 つの重み係数で分光情報を表現できるならば圧縮率は 4/61 となる。

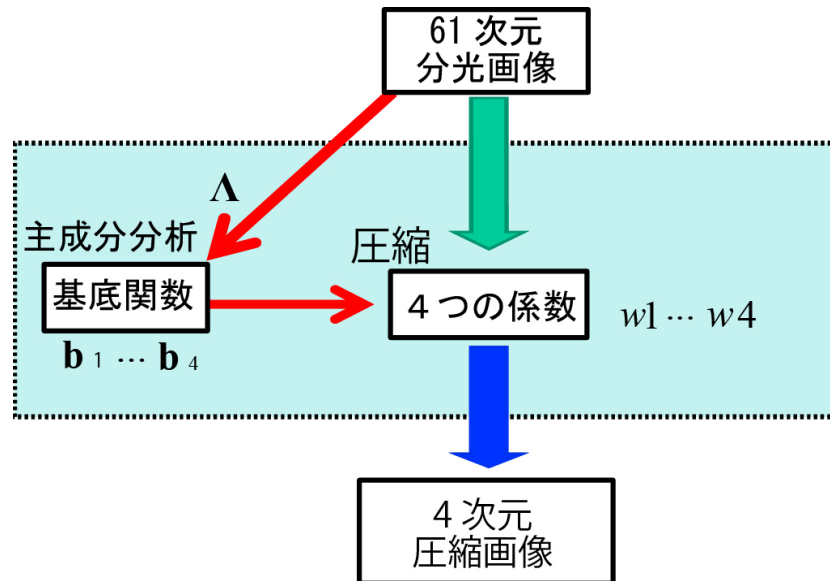


図 5.6 分光画像の圧縮プロセス (CPU 上での処理)

5.5.2 GPU を用いた分光画像の復号とレンダリング

2つ目のレンダリングプロセスにおいては圧縮された分光情報を復号しながらレンダリングする。図 5.7 は本研究で提案するレンダリング処理の過程を示したものである。ここでは分光情報は 4 次元に圧縮されている。まずレンダリングプロセスに入る前に GPU 側には事前に基底関数を読み込ませておく。その後、実際のレンダリング処理の段階で以下の処理を行う。

- ①CPU から 4 次元の圧縮画像を GPU 上に転送し、GPU 上のローカルメモリに一時的に保存する。
- ②画素ごとに 61 次元の分光分布に復号する。
- ③復号した分光分布を反射モデルに与え色信号を計算する。
- ④得られた色信号から三刺激値計算して色情報を得る。その後、デバイスの色特性に合わせてデバイス固有の色空間に変換する。

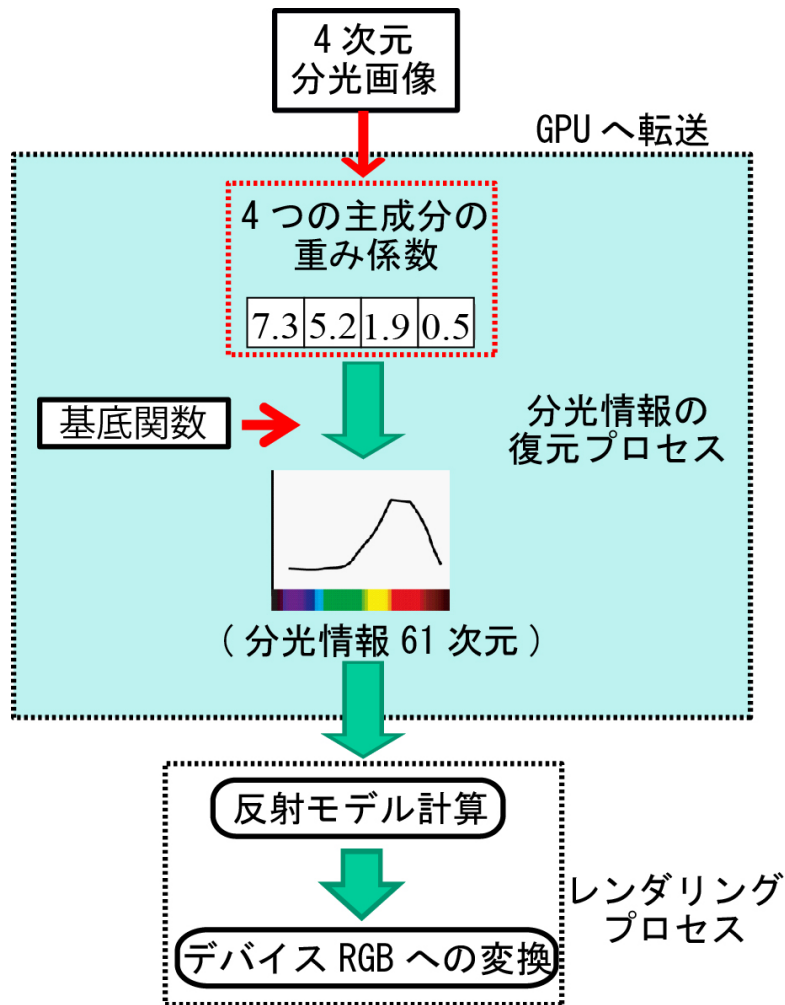


図 5.7 GPU を用いたレンダリング処理の概略図

5.6 照明環境を考慮した光反射の計算

5.6.1 放射照度マップを利用した光反射計算

一般的なシーンにおいて周囲環境には物体に影響を与える光源となりうる対象は無数に存在する。この場合、光反射モデルの計算は周囲に存在する照明光源の足し込み処理となり、光源の数が増えればそれだけ計算量が膨大になる。そのため光源は全方位に存在する空間的な分布と仮定する。この考えのもとでシーン空間内の全方位に対して光源の反射分布を計算し、事前に光反射計算を行ってルックアップテーブルとして利用する。このルックアップテーブルは放射照度マップと呼ぶ。本研究では、これまで分光ベースの放射照度マップを用いた画像生成手法を提案した[5]。今回はこの分光放射照度マップを用いた手法をレイトレーシング法に実装する方法を述べる。拡散反射成分は、Lambert モデルを仮定する。ここで照明光源の拡散反射光強度 $I_d(\lambda, \theta, \phi)$ は(5.6)式のように示す。

ここで j は全方位の光源分布のインデックスを示す。 j 番目の光源の分光分布は $E(\lambda, \theta_j, \phi_j)$ 、着目する光源からの入射角は $\theta_{ij}(\theta, \phi)$ である。実シーンの照明環境は実際のシーン内を画像計

測する。このとき計測した画像を全方位画像と呼ぶ。その照明情報を用いて物体を分光ベースでレンダリングすることで実シーン照明下でのレンダリングが可能となる。図 5.8 は環境光源を用いて分光ベースレンダリングを行っている様子を示したものである。全方位画像と放射照度マップを用いて、鏡面反射は全方位画像を直接使い、また拡散反射は放射照度マップをルックアップテーブルとして用いる。このとき照明方向 (θ, ϕ) に対応する物体表面からの反射光による色信号 $C(\lambda, \theta, \phi)$ は先ほど述べた放射照度マップ I_d と鏡面反射モデル $I_{\text{gloss}}, I_{\text{mirror}}$ を用いて(5.7)式のように記述する。ただし以後は(5.7)式の $C(\lambda, \theta, \phi)$ は方向パラメータを省略して $C(\lambda)$ と記述する。ここで α, β, χ はそれぞれの項の重み係数である。このとき右辺第一項は他の項と異なり、 I_d の中に照明光の分光分布情報が含まれている。 $S(\lambda)$ は物体の分光反射率、 $E(\lambda, \theta, \phi)$ は (θ, ϕ) 方向に対応する光源の分光分布である。このように物体表面の拡散反射成分は放射照度マップ I_d を与え、鏡面反射には全方位画像から光源の分光分布 $E(\lambda, \theta, \phi)$ を与えることにより、環境光源によって仮想物体を照明することができる。このことにより周囲の環境光源を考慮した分光ベースのレンダリングが可能となる。

$$I_d(\lambda, \theta, \phi) = \sum_j \cos \theta_{ij}(\theta, \phi) E(\lambda, \theta_j, \phi_j) \quad (5.6)$$

$$C(\lambda, \theta, \phi) = \alpha I_d(\lambda, \theta, \phi) S(\lambda) + \{ \beta I_{\text{gloss}}(\lambda, \theta, \phi) + \chi I_{\text{mirror}}(\lambda, \theta, \phi) \} E(\lambda, \theta, \phi) \quad (5.7)$$

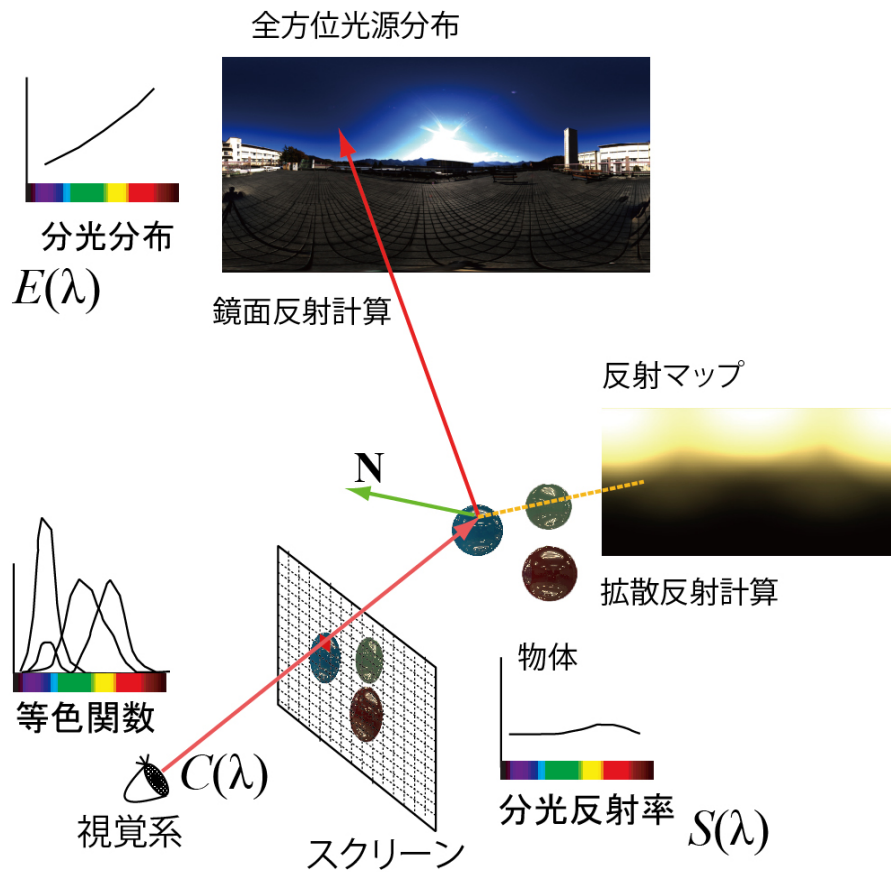


図 5.8 周囲照明環境を考慮した分光ベースレンダリング手法の概略図

5.6.2 相互反射の計算

物体間の反射の計算は，物体表面での正反射方向の視線を探索することにより行う．相互反射の計算プロセスを図 5.9 示す．ここではまず視線 \mathbf{v} の正反射方向である \mathbf{V}_r は(5.8)式で求まる．物体表面で反射が発生した時，その場所での反射率が w_r ，物体表面のみからの色信号を $C_o(\lambda)$ ，反射方向からの色信号を $C_r(\lambda)$ とするとその反射座標での色信号 $C(\lambda)$ は(5.9)式のようになる．

$$\mathbf{V}_r = -2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})\mathbf{N} + \mathbf{V} \quad (5.8)$$

$$C(\lambda) = \{(1 - w_r)C_o(\lambda) + w_r C_r(\lambda)\} \quad (5.9)$$

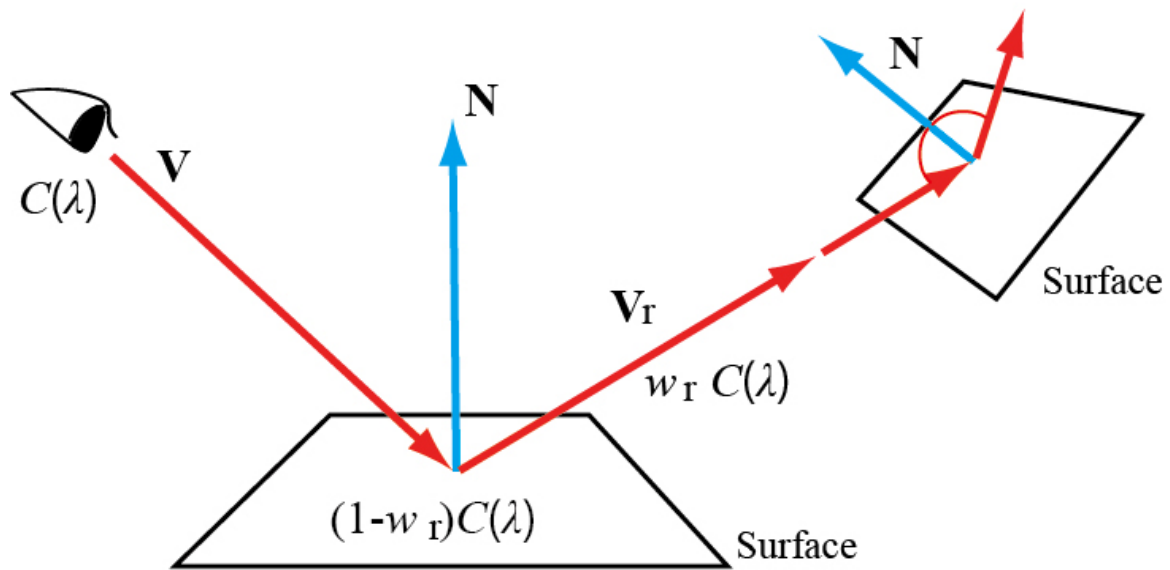


図 5.9 相互反射の計算プロセス

5.6.3 透過光の計算

物体表面での透過光は, 物体表面を透過後, スネルの法則に基づいて屈折した方向に進む. 透過光の計算プロセスを図 5.10 に示す. このとき透過前の媒質の屈折率を n_1 , 透過後の媒質の屈折率を n_2 とすると透過後の探索方向ベクトル \mathbf{v}_T は(5.10)式のようになる.

物体表面で透過が発生した時, その場所での透過率が, 物体表面のみからの色信号を, 反射方向からの色信号を $C_i(\lambda)$ とするとその透過座標での色信号 $C(\lambda)$ は(5.11)式のようになる.

$$\mathbf{v}_T = (n_1 / n_2) \left\{ -(\mathbf{V} \cdot \mathbf{N})\mathbf{N} + \mathbf{V} - \left(\sqrt{n_2^2 / n_1^2 - 1 + (\mathbf{V} \cdot \mathbf{N})^2} \right) \mathbf{N} \right\} \quad (5.10)$$

$$C(\lambda) = \{ (1 - w_i) C_o(\lambda) + w_i C_i(\lambda) \} \quad (5.11)$$

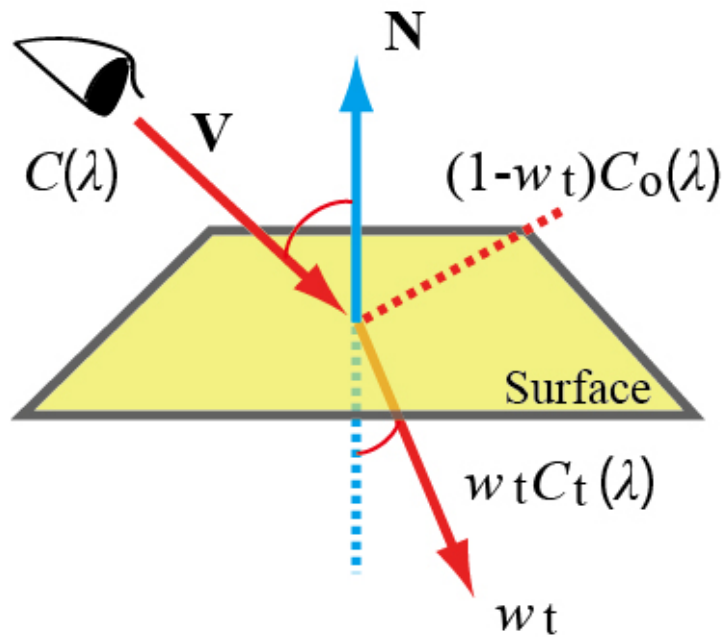


図 5.10 透過光の計算プロセス

5.7 実験

提案手法を用いて実際に存在する物体を相互反射も含めて CG 再現した。本研究で使用した PC の仕様として、まずハードウェア構成は CPU が Intel Core i7 2.66GHz, GPU は NVIDIA GeForceGTX680 を用いた。ディスプレイは Nanao EIZO SX-3031W-H を用いた。ソフトウェア環境として、グラフィックス API は OpenGL 3.3, シェーディング言語は GLSL を用いた。

CG 再現に用いる物体はプラスチック製の球体 3 つと、アクリル製の板である(図 5.11)。これらの物体の分光反射率は分光光度計(X-rite GretagMacbeth i1)を用いて計測した。各物体の分光反射率を図 5.12 に示す。この板の上に球体 3 つを配置してそれぞれの相互反射を調べた。ここではまず RGB カメラと魚眼レンズを用いて長野大学の研究室内をハイダイナミックレンジ画像計測した[16]。そこから分光 6000×3000 画素の全方位分光画像を生成した。計算から求められた基底関数を図 5.13 に示す。図 5.14 が生成された全方位画像である。また、図 5.15 は全方位画像から生成した放射照度マップである。放射照度マップの解像度は 1200×600 である。このシーン情報に基づいて先ほどの 3 つの球体とアクリル板の CG 再現を行った。この再現結果と実物とを比較した様子を図 5.16 に示す。このとき反射の打ち切り回数は 3 回に設定した。球体とアクリル板にはそれぞれ分光光度計で計測した分光反射率を与えて分光ベースのレイトレーシング法でレンダリングしている。実物と再現 CG を比較すると相互反射や周囲環境の映り込みも含めて再現できていることがわかる。レンダリング速度は約 56fps であり、リアルタイムにレンダリングすることができたといえる。

このとき実物の球と板とそれを再現した CG の色差を調べるため、実物と、ディスプレイに

表示した再現 CG の色を分光放射輝度計(トプコンテクノハウス SR-3A-L1)で計測した。その計測結果を図 5.17 に示す。+印が実物の色度座標, ×印が再現 CG の色度座標となる。この結果からレンダリング結果は写り込みと相互反射ともに青系統の色について実物に近い色で再現できていることがわかる。

続いて, 分光ベースのレンダリングと従来の RGB カラーベースのレンダリングの色差を検証する。RGB カラーベースのレンダリングは RGB カラーの全方位画像と放射照度マップを用意し, 仮想物体の色は分光ベースレンダリングで最終的に得られた仮 RGB 値を仮想物体に用いる。それぞれのレンダリング手法から得られた画像の色差を分光放射輝度計で計測する。このとき同一のディスプレイ上に生成した画像を並べ, 物体同士の相互反射が生じている部分三箇所を計測した。図 5.18 は計測した箇所を示す。実物とレンダリングした仮想物体の色差は均等色性をもつ CIE-L*a*b*空間上で比較する。表 5.1 は計測から得られた色差 ΔE を示している。この表から, 計測した箇所すべてにおいて分光ベースのレンダリングは色差が向上していることが確認できる。

本手法の応用として物体の特性を変化させるシミュレーションを行った。ここでは球体とアクリル板は不透明であるが, 仮にこれらの物体が透明であった場合どのようなか視覚的に予測した。具体的には再現物体に透過率と屈折率を与えて透過する様子をシミュレーションした。図 5.19 は提案手法で透過を再現した結果である。このときの物体に与えた透過率は 0.5, 屈折率は 1.3 とした。透過物体による屈折によりレンズのような効果が得られていることがわかる。

最後の実験として, 本手法で複雑な形状を用いた場合のレンダリング速度を調べた。本研究では実在する壺の形状をレーザー形状計測機 (Roland PICZA LPX-1200) で計測し, 得られた計測データを用いてレンダリングした。図 5.20 は壺の形状を用いて CG 再現した結果である。このとき形状データは 4000 ポリゴンであり, レンダリング速度は 1fps となった。このことからレンダリングに用いる形状は現時点では小型の物体 (約 10cm ほど) が実用限界であるといえる。ただし, 交差判定処理をさらに効率的に処理するアルゴリズムを実装することでより高速化できると考えられる。例えば, 高速化の手法としてオクツリーをはじめとした空間分割手法 [41]がいくつか提案されている。



図 5.11 CG 再現の対象となった物体（実物）

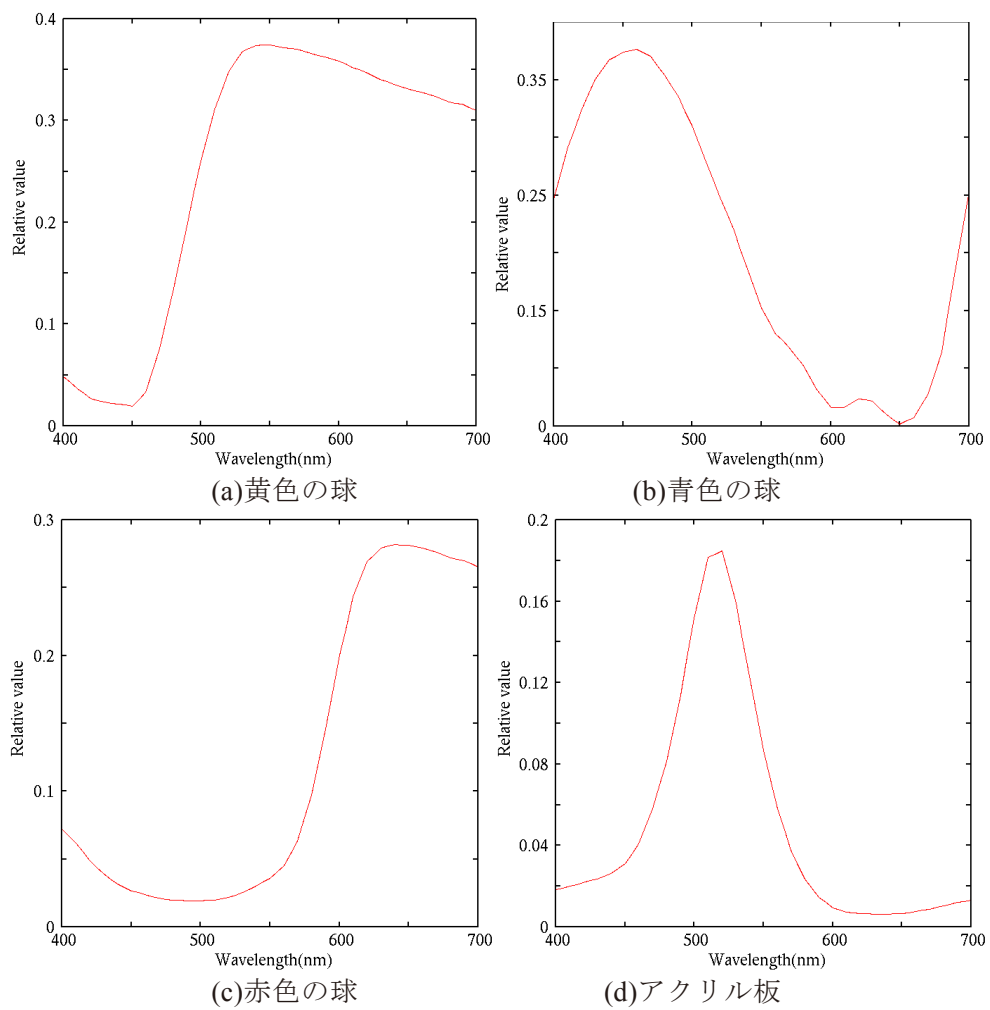


図 5.12 再現する物体の分光反射率

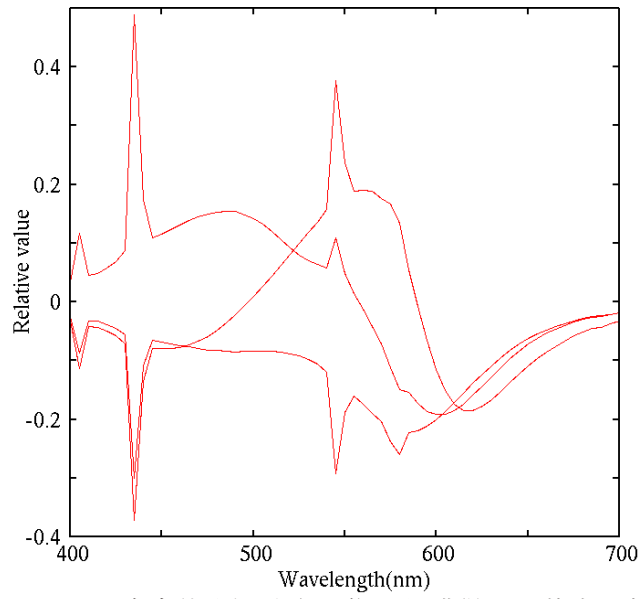


図 5.13 全方位光源分布画像から獲得した基底関数

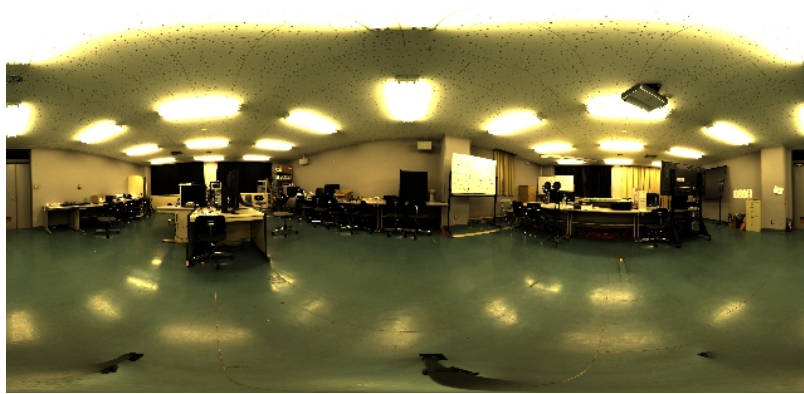


図 5.14 レンダリングに使用した全方位画像

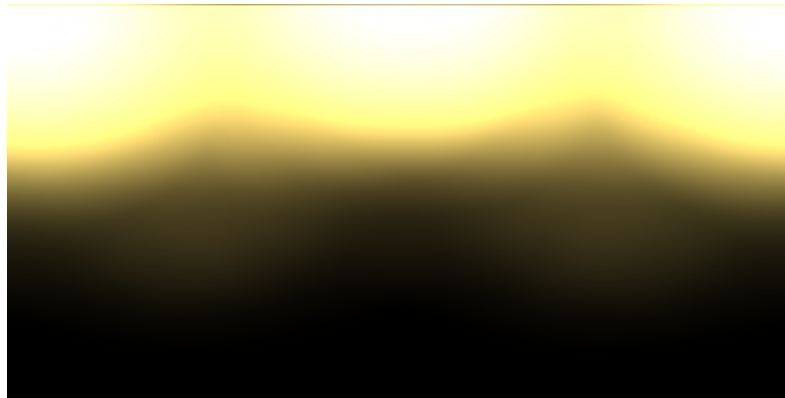
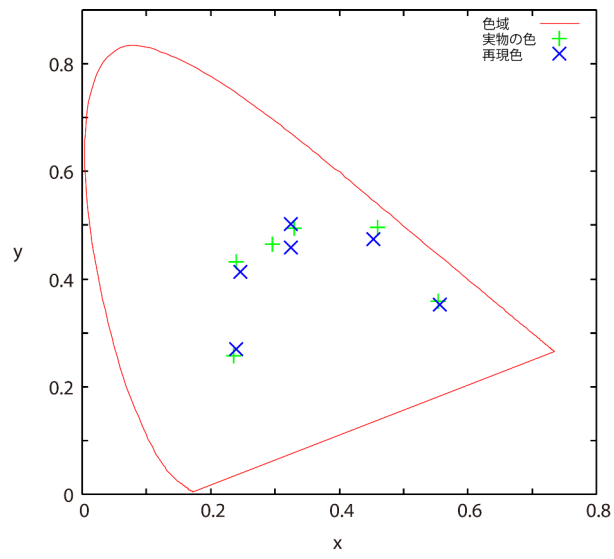


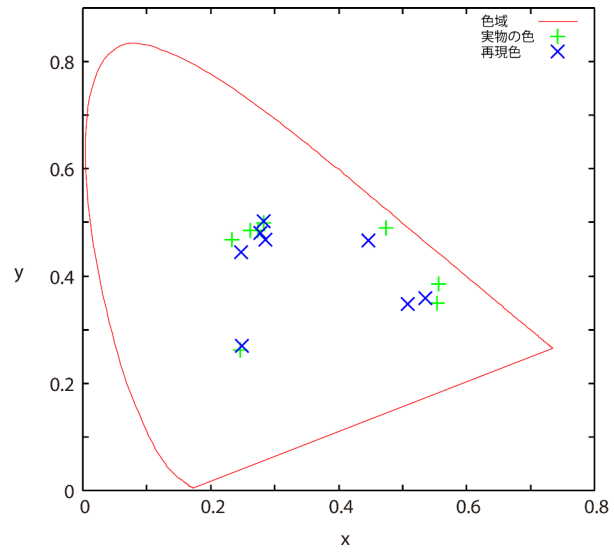
図 5.15 レンダリングに使用した放射照度マップ



図 5.16 提案手法で生成した CG 画像と実物との比較結果



(a) 写り込み部分



(b) 相互反射部分

図 5.17 再現 CG の色再現精度の検証結果：実物と再現 CG の色度座標を比較

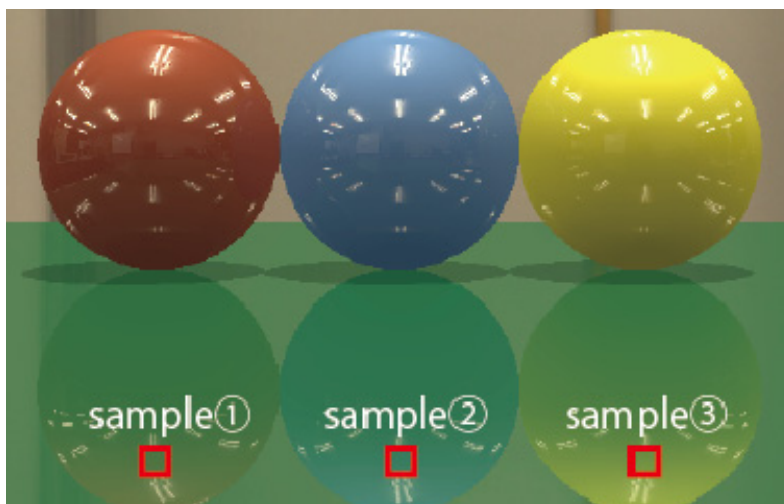


図 5.18 レンダリング手法の色差比較に用いた箇所

表 5.1 実物とレンダリング手法の色差比較 (ΔE)

	RGB ベース	分光ベース
sample①	1.87×10^1	8.51×10^0
sample②	5.11×10^0	1.60×10^0
sample③	2.84×10^1	1.38×10^1



図 5.19 分光ベースのレイトレーシングで透過光を表現した結果



図 5.20 壺の形状を用いたレンダリング結果

5. 8 まとめ

本研究では物体の CG 再現技術をデザイン支援に応用するための技術を開発した。ここでは特に従来では再現が難しかった物体間の相互反射や多重反射に着目して、レイトレーシング法を分光的に拡張して物体の CG 再現手法を提案した。また、CG 生成のインタラクティブ性を向上させるため GPU 上に分光ベースのレイトレーシング手法を実装した。また、分光情報に基づいた方法は処理速度や記憶容量の問題が発生するが、分光情報の圧縮技術を同時に提案することで記憶容量や処理速度の問題を解決した。その結果、本手法では相互反射している部分を含めて実物に近い色で再現できていることがわかった。本研究の最大の特徴は、分光ベースのレイトレーシング法とそれを GPU 上で高速化する手法を開発したことで、高速かつ高精度に相互反射を含む物体の色再現精度を向上させたことである。本論文で提案する手法により、複雑な相互反射や多重反射を含む物体をデザインするためにコンピュータによる支援が可能となる。

第 6 章

絹織物のデジタルアーカイブ手法

6.1 本章の概要

絹織物は独特な美しい光沢と質感を持っていることから、高い価値を持つものが多い。このことから精密な絹織物の映像化はファッションやデジタルアーカイブなどさまざまな分野で必要とされている。しかし絹織物には複雑な三次元的な織構造があるため[45]、絹の質感を反射特性として定量化することが難しい[42-45]。

物体表面の反射特性を計測する際、計測対象物体を映像生成するために双方向性分布関数 (BRDF) が多く用いられる[45]。これに加えて、双方向テクスチャ関数 (BTF) が表面テクスチャを持つ物体のために用いられる[46-48]。

本研究では、光反射モデルに基づいた絹織物のデジタルアーカイブ手法を提案する。絹織物の反射特性は計測したデータから反射モデルパラメータとして定量化する。このとき RGB カラーデータはカメラ感度と照明環境に依存することに注意しなければならない。そこで本研究では絹織物の分光ベースの画像生成手法を提案する。このとき物体固有の物理情報として分光反射率を用いる。分光反射率はカメラの感度と照明環境には依存しない情報である。本研究では Torrance-Sparrow モデルに基づいて分光的に絹織物表面の光反射モデルを構築した。光反射モデルのパラメータを決定するために、分光情報の統計解析から絹織物の分光反射特性を推定する手法を開発した。

また、絹織物の反射特性や表面構造を計測するため、二つのシステムを開発した。一つ目のシステムは、反射強度や分光反射率を計測するためのものである。このシステムは、照明、回転アーム、マルチバンドデジタルカメラで構成されている。そして、画像から絹織物の反射特性と分光反射率を推定することができる。このとき、カメラ出力から絹織物表面の分光反射率を推定するために、マクベスカラーチャートの分光反射率を統計的に分析する。マルチバンドカメラの感度特性と照明の影響はシステム変換行列によって除去する。分光反射率は、可視波長域(400~700nm)が 5nm 間隔で離散化する。推定した分光反射率の精度は RGB (3 バンド) によって得られたものと比較する。反射モデルのパラメータ (反射特性) が異なる照明方向と視線方向での反射強度を計測するために、カメラの計測値から推定する。次に、絹織物の 3D コンピュータグラフィックス (CG) をレンダリングし、視覚的に提案手法の有効性を確認する。提案手法では精密に環境照明下の CG を作成することができる。最後に絹織物の CG をリアルタイムにレンダリングするために提案手法を GPU 上に実装した。

6.2 絹織物表面の光反射モデル

絹織物表面の反射光は照明、物体、受光部の幾何的關係な關係で記述する。図 6.1 は Torrance-Sparrow モデル[6]の幾何モデル図である。絹織物表面の反射による視覚系の色信号 $C(\lambda)$ は(6.1)式のように示す。このとき右辺第一項と第二項は拡散反射成分と鏡面反射成分で

ある．ここで α と β は拡散反射成分と鏡面反射成分の重み係数を示している．また， $S(\lambda)$ と $E(\lambda)$ はそれぞれ物体表面の分光反射率と光源の分光分布である． λ は波長であり， F はフレネル関数， n は絹織物表面の屈折率， D は物体表面の滑らかさを表す微小面の分布関数であり， μ によって滑らかさを決める． φ は微小面の位相面， G は幾何的減衰係数， \mathbf{V} は視線ベクトル， \mathbf{N} は絹織物表面の法線ベクトル， \mathbf{L} は照明ベクトル， θ_i は \mathbf{N} と \mathbf{L} のなす角， θ_r は \mathbf{N} と \mathbf{V} のなす角を示している． \mathbf{H} は微小面の法線ベクトル， φ は \mathbf{L} と \mathbf{H} のなす角を示している．

$$C(\lambda) = \alpha \cos \theta_i S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(n, \theta_i) D(\mu, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_r} E(\lambda) \quad (6.1)$$

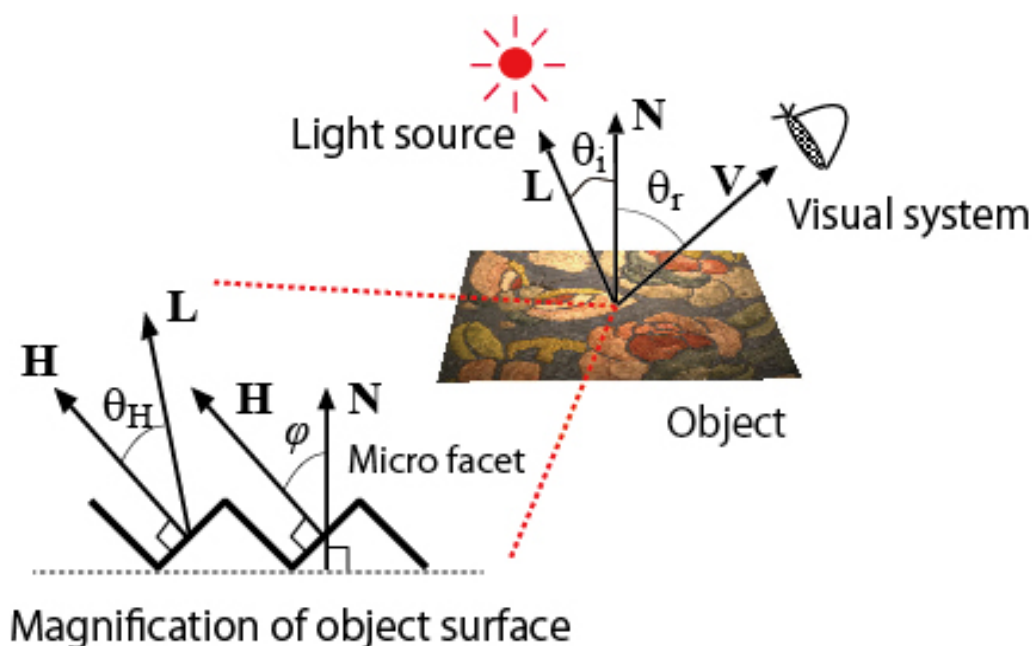


図 6.1 Torrance-Sparrow モデルの幾何モデル

6.3 絹織物表面の反射特性計測

絹織物表面の反射特性は反射モデルパラメータとして推定する．計測系は光源，回転アーム，デジタルカメラ（キャノン EOS 5D）で構成されている．このとき高精度な分光画像を獲得するため，デジタルカメラをマルチバンド化する．

このマルチバンドカメラは二枚の画像を用いる．一枚目はくし型透過フィルタを装着した状態で計測し，二枚目はフィルタが無い状態で計測する．マルチバンド画像はこの二枚の画像から構成される．図 6.2 は光反射特性の計測系の概略図である．

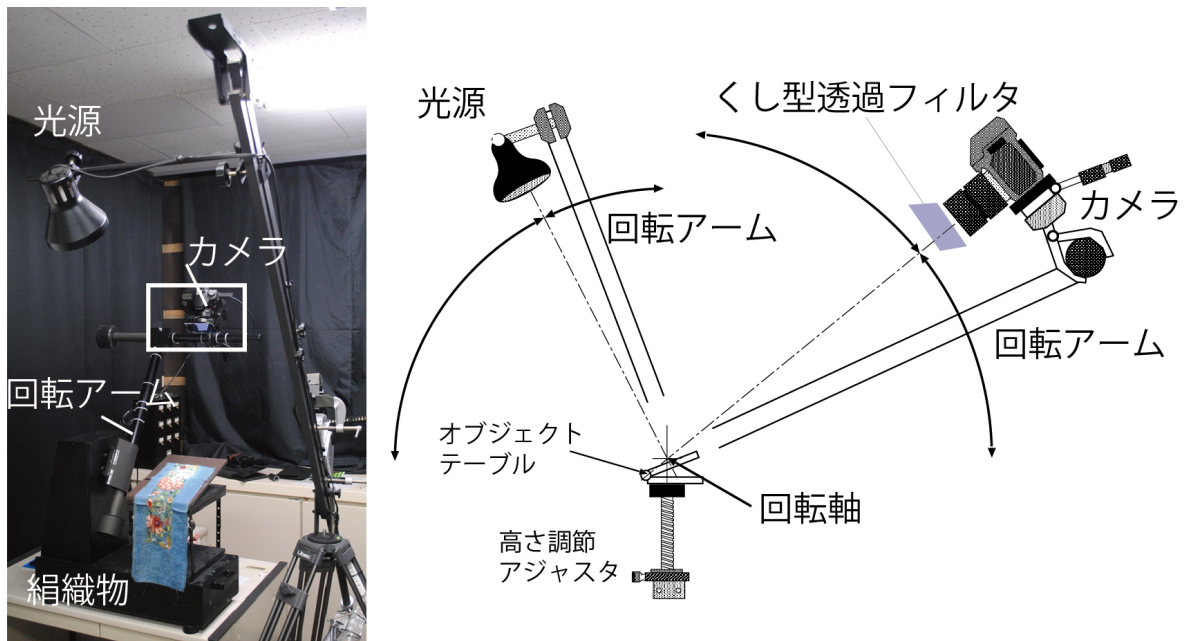


図 6.2 光反射特性の計測系の概略図

6.4 絹織物表面の反射特性推定

本研究ではカラーチャートを用いて分光反射率を推定するため、統計的な分析手法を提案する[48,49]. このとき Schmitt の方法に基づいてシステム変換マトリックスと直接分光情報を推定する手法を提案する[17]. 本研究では 2 ショットタイプのマルチバンドカメラ画像のためのシステム変換行列を生成するためのアルゴリズムを構築した. 物体表面の分光反射率は、いくつかの基底関数を用いて表現することができる[16]. カメラ出力の分光反射率を拘束条件として分光情報の統計的性質を持つ分光情報の連続的関数として推定できる. 分光反射率データベースを構築するために 176 のカラーパッチをマルチバンドカメラと分光光度計を用いて計測した. マルチバンカメラと分光反射率の対応関係を計測したデータから推定する. 分光反射率は、可視波長域(400~700nm)が 5nm 間隔で離散化する. 計測系から得られた画像は、絹織物表面の反射モデルパラメータを推定するために用いる. 未知パラメータとして α , β , μ は(6.2)式から推定する.

$$\min \left\{ \sum_j \left[\begin{array}{c} \alpha \cos \theta_j \\ + \beta \frac{F(n, \theta_{ij}) D(\mu_0, \varphi_j) G(N_j, V_j, L_j)}{\cos \theta_r} \end{array} \right]^2 \right\}. \quad (6.2)$$

6.5 絹織物表面の法線ベクトル推定

本研究では絹織物表面の 3 次元構造を照度差ステレオ法[50,51]を用いて表面の法線ベクトルマップとして推定する手法を提案する. 図 6.3 は表面形状を計測するために構築した計測

系である．ここでは4つの光源（3M社製のMP160プロジェクタ）を用いる．照明方向は鏡面球を用いて補正する．カメラはマクロレンズを装着したNikon D800Eを用いる．このときカメラが計測対象の絹織物に対して垂直になるように固定する．

このとき \mathbf{Y} , \mathbf{N} , \mathbf{L} はそれぞれ画像強度ベクトル，法線ベクトル，照明方向ベクトルの行列である．三つの関係はランバートの余弦則に従う． α は拡散反射に対する重み係数である． $\mathbf{Y} = \alpha(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})$ の場合， $\mathbf{N}' = \mathbf{Y}' \cdot \mathbf{L}^+$ は \mathbf{L} の一般化逆行列によって得ることができる．そして法線ベクトルは $\mathbf{N} = \mathbf{N}' / \|\mathbf{N}'\|$ から求まる．

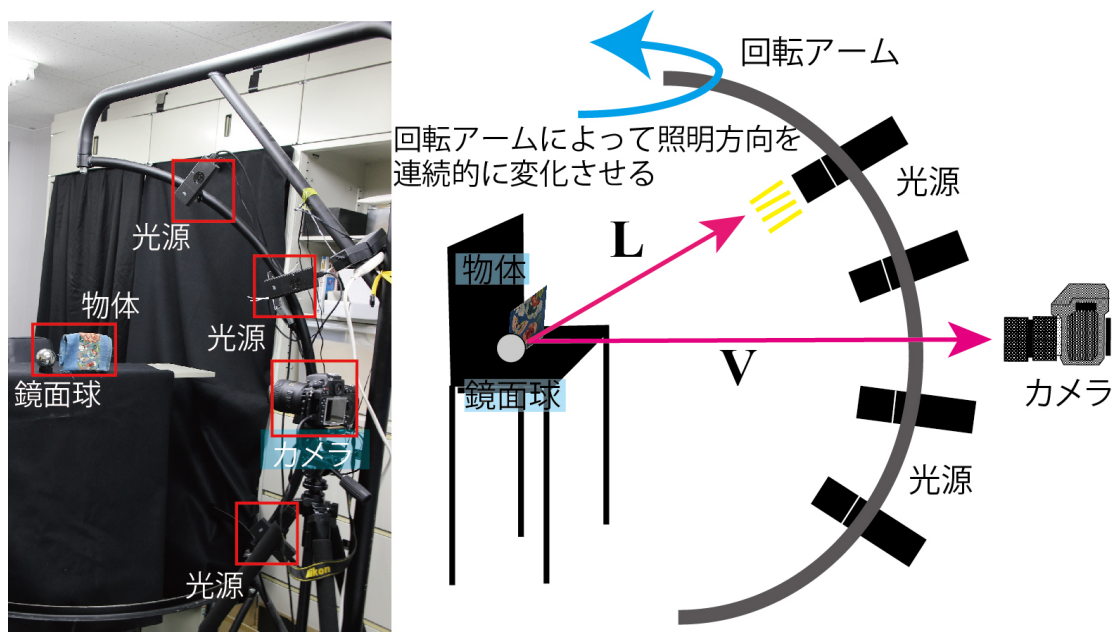


図 6.3 3次元構造の計測システム

6.6 画像生成手法

6.6.1 分光的な光反射モデルに基づいた画像生成システム

本研究の画像生成システムではカラーマネジメントシステムを用いた画像生成システムを開発した．この画像生成システムでは，CG 画像は三刺激値とカラーマネジメントシステムの表色特性（図 6.4）を使用してレンダリングする．このシステムでは精密に実シーン照明環境下の CG 画像を生成することができる．このときシーン全体の照明を計算するために分光分布を持つ全方位画像を用いた．図 6.4 は全方位画像とレンダリングシステムの関係性を示している．提案手法は，表示デバイスとしてカラーディスプレイを想定して GPU 上に実装する．分光放射輝度の三刺激値は(6.3)式で求める．

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} C(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (6.3)$$

6.6.2 照明環境の計算手法

本研究では、実際のシーン照明データを用いて絹織物を画像生成する。このときシーン照明環境の情報を取得するために全方位のハイダイナミックレンジ画像を計測した[52]。画像生成の速度を向上させるため、全方位画像[16]のための放射照度マップ（放射照度ルックアップテーブル）を構築する。放射照度マップはシーン内のすべての方向は $0 \leq \theta_1 \leq 2\pi$, で覆う方位角と $0 \leq \varphi_1 \leq \pi$ で覆う仰角によって表現されたマップと見なすことができる。(6.4)式のように放射照度マップが生成される。ここで I は各画素における放射照度であり、 Θ_i は照明入射角の関数である。放射照度マップは物体表面の拡散反射を計算するために用いる。そして(6.1)式は以下のように修飾する。図 6.5 は分光的な全方位画像とシーン照明との関係を示している。

$$I(\lambda, \theta_1, \varphi_1) = \iint_{\varphi, \theta} \cos \Theta_i(\theta_1, \varphi_1, \theta, \varphi) E(\lambda, \theta, \varphi) d\theta d\varphi \quad (6.4)$$

$$C(\lambda, \theta_1, \varphi_1, \theta, \varphi) = I(\lambda, \theta_1, \varphi_1) + \beta \frac{F(n, \theta_{ii}(\theta, \varphi)) D(\mu_0, \phi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L}(\theta, \varphi))}{\cos \theta_t} E(\lambda, \theta, \varphi) \quad (6.5)$$

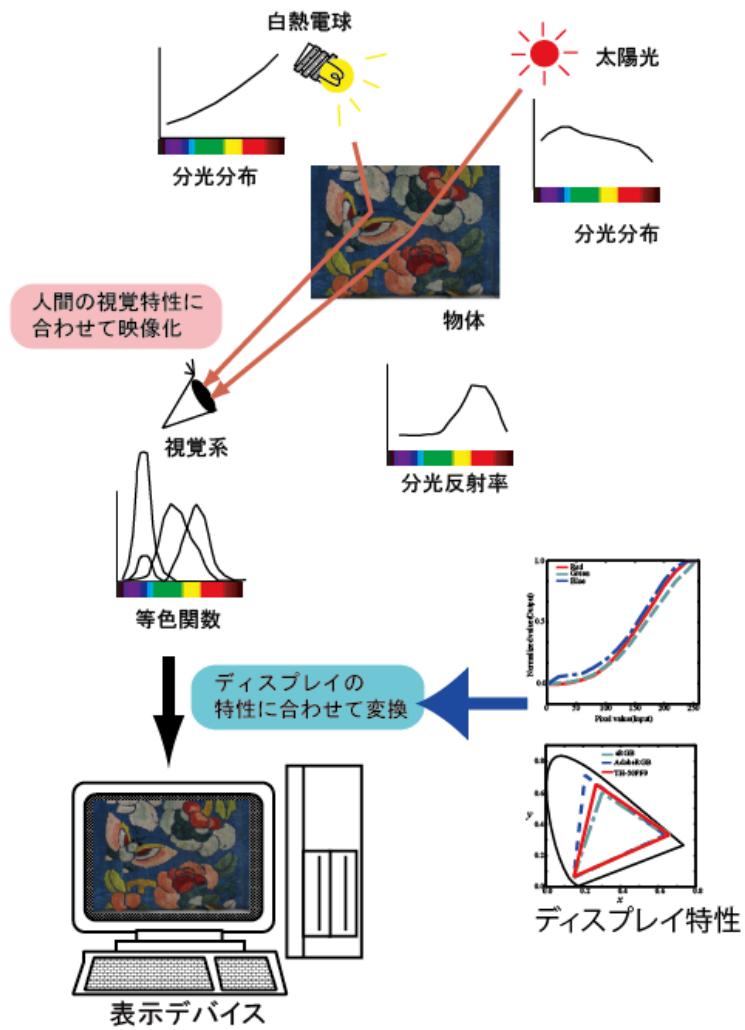


図 6.4 分光的な光反射モデルに基づいた画像生成システム

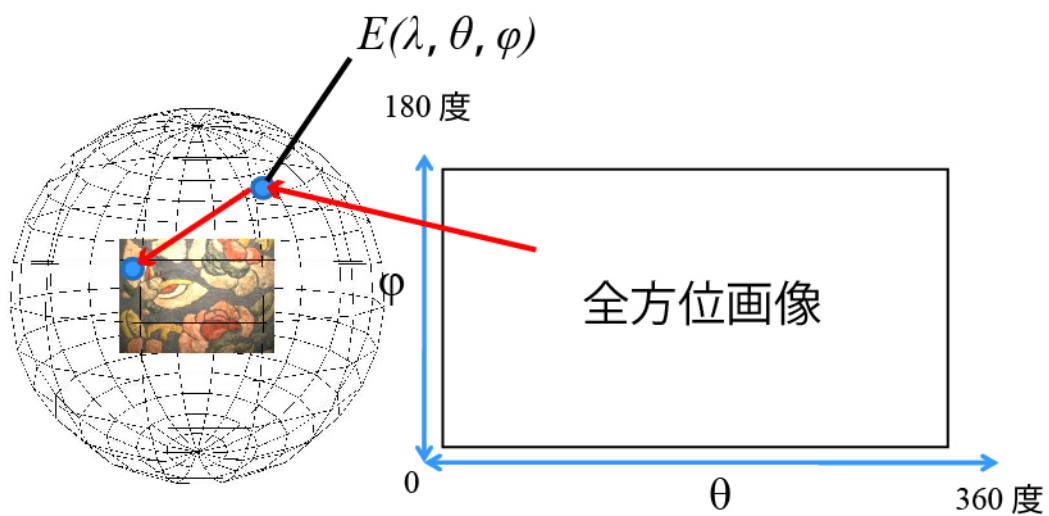


図 6.5 分光的な全方位画像と照明環境の関係

6.7 実験

本研究では、提案手法により絹織物を計測しCG再現する。図 6.7 は対象の絹織物である。この絹織物は江戸時代に織られた織物の切れ端である。

6.7.1 絹織物の光反射モデルパラメータ推定

ここではまず、カラーチャートをマルチバンドカメラと分光光度計を用いて計測した。図 6.7 は分光反射率とカメラ出力の関係をデータベース化するために使用したカラーチャートである。図 6.8 はカラーチャートのカラーパッチの分光反射率の基底関数を示す。対象物体の反射強度分布は、図 6.2 に示す計測系を用いて計測した。このとき入射角は 0.2 度刻みで 10~75 度の範囲とした。図 6.9 は図 6.6 の①~③の赤色の領域に対する分光反射率の推定結果である。ここで赤色の線は分光光度計による計測結果である。緑色の線は 6 バンドカメラによる推定結果、青色の線は RGB カメラによる推定結果である。図 6.10 は反射光強度の推定結果である。赤い線は計測値であり、青い線は反射モデルを用いて推定した結果である。表 6.1 は絹織物の分光反射率の推定手法ごとの平均二乗誤差 (RMSE) である。光反射モデルパラメータの推定結果は $a=1.2\times 10^3$, $\beta=8.2\times 10^4$, $\mu=1.6\times 10^{-1}$ となった。

6.7.2 絹織物表面の法線ベクトル推定

法線ベクトルマップを推定するため、提案した 3 次元構造の計測系 (図 6.3) を用いて絹織物表面を計測した。このとき光源を固定した回転アームの角度は経度方向に約-80 度~80 度の間を約 20 度間隔で設定し、緯度方向は 30 度間隔で設定した。計測で得られた画像は合計 10 枚となった。この計測画像から提案手法に基づいて絹織物表面の法線ベクトルマップを推定した。図 6.11 の①と②は推定した法線マップを用いて陰影画像を生成し、法線マップを可視化したものである。

6.7.3 絹織物の分光ベース映像生成

CG のレンダリングに用いた環境光の全方位画像の解像度は 7602×3802 画素となる。環境光のシーンは信州大学の講堂内である。図 6.12 が実際の全方位画像である。図 6.13 は図 6.12 から生成した放射照度マップであり、解像度は 1200×600 画素である。また、図 6.14 は白熱電球下のシーン照明の全方位画像である。図 6.15 は図 6.14 から生成した放射照度マップである。

次に、提案手法と推定したパラメータを用いて絹織物を画像としてCG再現した。図 6.16 と図 6.17 は絹織物の画像生成結果である。図 6.16①は絹織物を正面から見た際の再現結果である。図 6.16②は異なる視線方向にした際の再現結果である。図 6.16③は異なる照明方向の

CG 再現結果である。図 6.16④は絹織物表面を拡大した際の再現結果である。図 6.17①は白熱電球下のような異なるシーン照明下で再現した CG 再現結果である。図 6.17②は図 6.17①の絹織物表面を拡大した際の CG 再現結果である。

CG による画像再現は画面の解像度は 1200×800 画素とした。CG 生成するために用いた PC の仕様として CPU は intel Core i7 4930K, メモリは 32GB, GPU は Nvidia GeForceGTX680 が搭載されたものを用いた。このとき画像生成速度は毎秒約 60 フレームとなった。

6.8 まとめ

本研究では分光反射モデルに基づいた絹織物のデジタルアーカイブ手法を提案した。アーカイブした情報を 3 DCG 画像として画像生成した。絹織物の反射特性は反射モデルパラメータとして計測データから推定した。本研究では反射特性と絹織物の表面構造を計測するため、二つの計測系を構築した。一つ目は対象の絹織物の分光反射率と表面の反射特性を計測するためのものである。二つ目の計測系は織物表面の 3 次元構造を計測するためのものである。また、マルチバンドカメラの画像から統計分析による分光反射率を推定する手法を開発した。そして照度差ステレオ法に基づいて、絹織物の微細な 3 次元構造を推定した。次に、反射モデルと推定した情報を用いて絹織物を 3 DCG として画像再現した。提案手法の妥当性は生成した CG から視覚的に検証した。マルチバンドカメラを用いて得られた分光反射率の推定精度は、RGB カメラにより得られたものと比較した。このときマルチバンドカメラがより高い精度になることがわかった。

表 6.1 絹織物の分光反射率の平均二乗誤差 (RMSE)

	3-band Camera	6-band Camera
①Red	6.34×10^{-2}	4.07×10^{-2}
②Green	4.16×10^{-2}	3.33×10^{-2}
③Blue	2.31×10^{-2}	3.14×10^{-2}



図 6.6 計測対象の絹織物と推定に用いる領域



図 6.7 分光反射率とカメラ出力との関係をデータベース化するためのカラーチャート

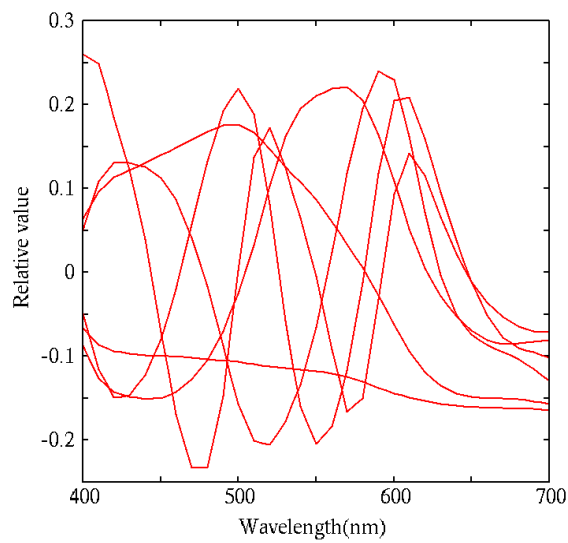


図 6.8 データベースから得られた分光反射率の基底関数

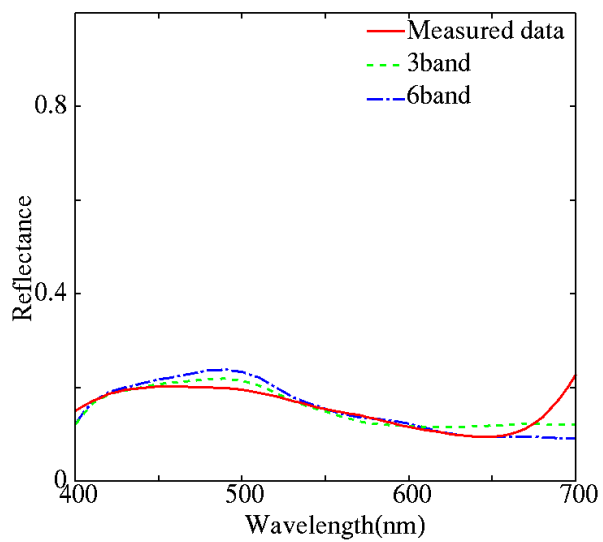
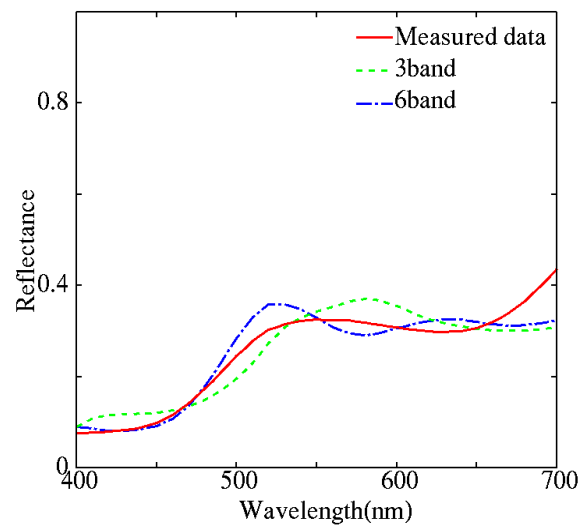
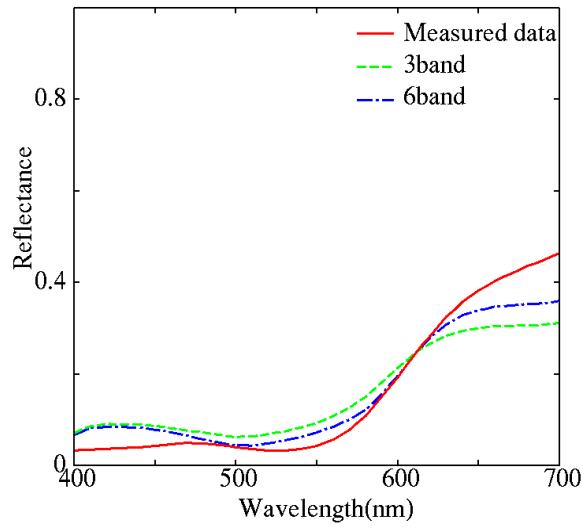


図 6.9 分光反射率の推定結果

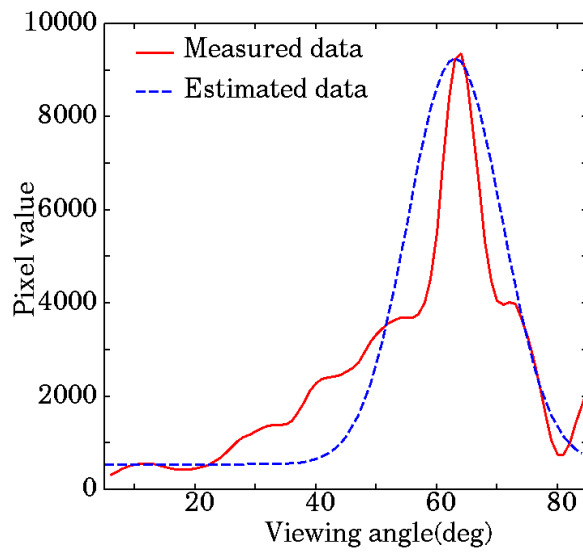
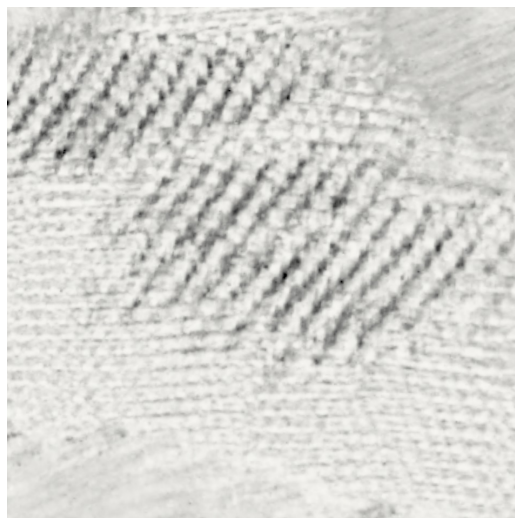


図 6.10 反射光強度の推定結果



① 法線マップの陰影画像



② 法線マップを拡大した陰影画像

図 6.11 法線マップの推定結果



図 6.12 蛍光灯照明下の全方位分光画像



図 6.13 の画像から生成した放射照度マップ



図 6.14 白熱電球下の全方位分光画像



図 6.15. 図 6.14 の全方位画像から生成した分光的な放射照度マップ



① 正面から見た絹織物



② 異なった照明方向から見た絹織物



③ 異なった視点から見た絹織物



④ 拡大した絹織物

図 6.16 提案手法と推定値を用いて CG 再現した絹織物



① 正面から見た絹織物



② 拡大した絹織物

図 6.17 白熱電球下の絹織物の CG 再現結果

第 7 章

スマートフォンを用いた分光反射率推定法

7.1 本章の概要

スマートフォンを活用したデザイン支援ツールの開発[53]は、デザインに関する作業を支援したり、簡便に様々な対象の材質を調査したりする上で重要な役割を果たすことが予想される[55]。スマートフォンは多くの人々が常時携帯できる小型の情報端末であり、カメラやネットワークと融合された携帯可能なコンピュータと考えることができるため、通話、メールそして写メといった従来の情報伝達ツールを超えた可能性を持つ。スマートフォンはデザイナーの立場で考えると、常時持ち歩くことのできるデザイン支援のための情報ツールの一つになる場合がある。たとえば、デザイナーが気になったシーンをスマートフォンのカメラで撮影して、それをネットワークで転送し、後の創作活動に使用するということは一般に行われている。ここで、さらにスマートフォンをコンピュータとして考え、ソフトウェアで様々な機能を与えれば、より高度なデザインツールとなる可能性が期待できる。

本稿ではスマートフォンといった制約されたハードウェア下での分光反射率の推定手法を開発する。物体の材質を知る上で、物体固有の物理情報である分光反射率は極めて重要な情報である[55]。特に物体の分光反射率がわかれば、原理的に RGB 値よりも蛍光灯のような波長変動の激しい光源下での色再現に有利になり、また、物体の多重反射のように繰り返しの色計算が必要な対象の色再現の精度が向上する。また、分光反射率は対象物体の材質の様々な特性の情報を持っているため、その波長変動から対象物の材質の特性を知る上で有効である[49]。たとえば、文化財は紫外線などによって材質が変化し劣化[56]するが、分光反射率情報を文化財推定に応用すれば、その材質の劣化状態を知ることができる[57]。また、人体に応用すればメラニンやヘモグロビンの量の推定といった医療や美容分野へ応用したりすることが可能である[58,59]。こういった分光反射率が手軽に調べることができれば、文化財の状態を調べたり、使用するデザイン材料の特性を知ったりするために有用である。色彩工学の分野では分光反射率の計測は分光光度計などを用いて計測するが、こういった特殊な計測器を使わなくても誰もが容易に分光反射率計測が可能となれば、その応用範囲は広がる。

本研究では、まずスマートフォンにこの分光反射率の推定機能を持たせる。ここではカメラで撮影された画像から各画素の分光反射率を推定するという問題がある[4]。通常、分光反射率を計測するためには一般のRGB三原色よりもバンド数の多いマルチバンドカメラ[60]などの大掛かりな計測システムを用いる必要があるため、日常的に分光画像計測を行うことは現実的でない。

しかし、ここで簡便かつ手軽でどこでも分光反射率計測ができるという条件を満たせば、その応用範囲は一気に広がる。

本研究では日常的に利用できるという視点から、スマートフォンに着目したが、スマートフォンを分光画像計システムとして利用するためには、その精度面の問題を解決しなければならない。その問題とはカメラ系の分光的な較正である。

ここでスマートフォンを用いる場合に注意しなければならない点は2つあり、1つ目は、そのハー

ドウェアの個々の性能のばらつきによる精度面の問題、2つ目はユーザに複雑な較正用のハードウェアを持たせることは一般に困難であるため、スマートフォン単体で分光反射率計測を行う必要があることである。

本研究では、そういった問題を解決するためにスマートフォンに内蔵されているカメラとは別に基準カメラを用意して、そのカメラの分光特性をデータベース化して利用することで、特殊なハードウェアを用いずにスマートフォンのカメラで分光反射率を推定する手法を提案する。ここでいうデータベース化とは特殊な計測機器を必要とする較正処理を独立させ、この基準カメラの較正情報を機種依存しないように公開用データとして構築することである。本研究では2種類のデータベースを扱うが、本稿では、この較正情報のデータベースを公開用データベースと呼ぶ。本研究では、この較正情報は単なる数値データなので、基準カメラの較正には分光光度計という特殊な測色器を必要とするものの、スマートフォンのユーザがその較正情報を自身のスマートフォンにコピーして利用し、色変換用の基準カラーチャートともに対象を撮影することで、特殊な計測機器を用いなくても分光反射率が推定できるようにする。

この方法は、さらにブラックボックス化されたスマートフォンの露出やホワイトバランスなどの自動調整機能を補正することも可能となる。これにより市販の一般的な未較正状態のスマートフォンのカメラで分光反射率計測を行う手法を提案する。

本研究で開発したシステムの評価は、実際の物体を対象にスマートフォンで分光反射率を推定し、その推定値を分光光度計で直接計測された計測値と比較し、そのRMSEを求めることでその精度を検証することで示す。

7.2 スマートフォンの分光カメラモデル

まずスマートフォンのカメラを分光的にモデル化する。実験などに用いられる計測用カメラや一眼レフカメラとは異なりスマートフォンのカメラは、撮影者の意思とは独立に露出やホワイトバランスが自動で調整される。このことは計測を不安定にするという問題を引き起こす。そこで図7.1のようなカメラ出力の分光モデルを構築した。このモデルは光源からの光が物体表面で反射してカメラ系に入力するといった光反射に基づくカメラ出力RGB値を得るまでのプロセスを記述したものである。このときのカメラ出力RGB値は光源の分光分布 $E(\lambda)$ と物体の分光反射率 $S(\lambda)$ を用いて光の可視波長域(400nm-700nm)でモデル化すると(7.1)式のように示すことができる。ここではそれぞれR(赤)、G(緑)、B(青)チャンネルの分光感度関数であるが、時間 t により感度特性が変化することで、そのカメラ出力も変化する。

$$\begin{bmatrix} R(t) \\ G(t) \\ B(t) \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} E(\lambda)S(\lambda) \begin{bmatrix} r_r(\lambda, t) \\ r_g(\lambda, t) \\ r_b(\lambda, t) \end{bmatrix} d\lambda \quad (7.1)$$

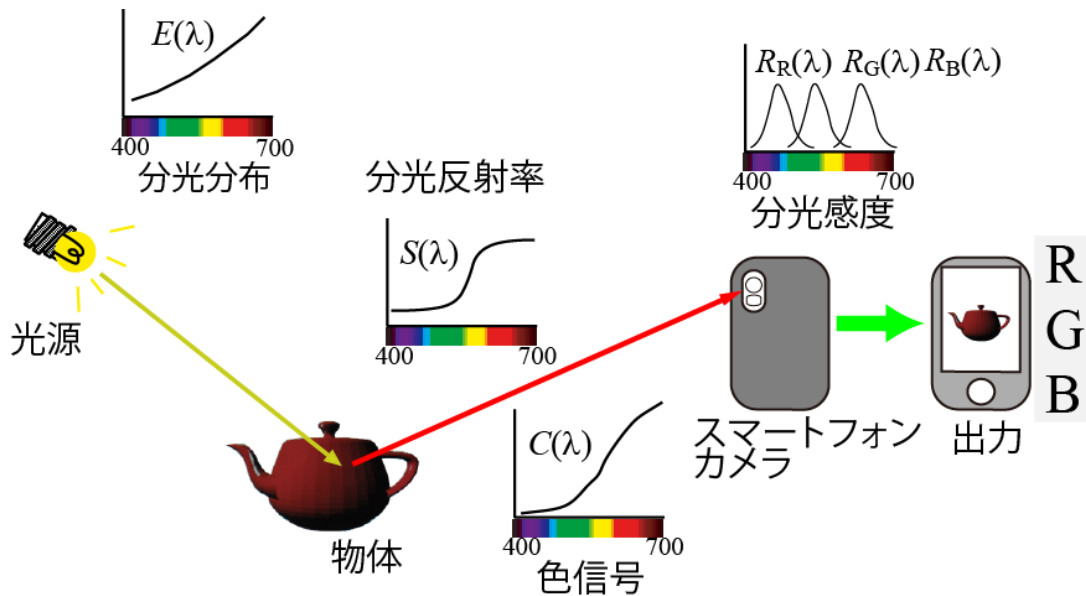


図7.1 カメラ出力の分光モデル

7. 3 画像からの分光関数の推定アルゴリズム

7. 3. 1 計測画像から分光関数を推定する方法

本研究においても分光反射率の言葉の定義のとおり，分光反射率は「入射光と反射光について，それぞれの放射束（光束）の分光密度の比」として扱う．カメラ出力（画像）から分光関数を推定しようとした場合，問題となるのがカメラのセンサ数が少なく有限個であることに対して分光関数が連続関数であるため高次元関数であることである．スマートフォンのカメラは一般に RGB カメラなのでセンサ数は3である．このときいくつかの先行研究によって一般的な物体表面の分光反射率は少数の基底関数の線形和で記述できることが示されている[21-24]．ここで得られた知見は分光反射率の存在には統計的な偏りがあり，その偏りを拘束条件として高次元情報である分光反射率を求めるものである．これらは有限次元線形モデルと呼ばれている．このモデルに基づいて分光反射率の推定においてシステム変換マトリックスを用いた線形変換の手法が提案されている[5][18]．本稿ではそういった先行研究の知見を基に分光反射率を以下のように線形モデルで記述する．ここでは RGB カメラのセンサ数に合わせて3つの基底関数を用いて表現された分光反射率 $\bar{S}(\lambda)$ は(7.2)式で示すことができる．このとき w_1, w_2, w_3 は，それぞれの基底関数の重み係数である．これらの重み係数は，それぞれがスカラー値である．このとき一度，基底関数が決定されると物体の分光反射率はこの3つの重み係数が分かれば元の分光反射率情報をほぼ復元することができる．つまり，計測物体の分光反射

率の推定はこの3つの数値を推定することに帰着する。RGB3つのセンサ出力と $\mathbf{w}=[w_1 \ w_2 \ w_3]^T$ の基底関数の3つの重み係数が線形な関係であれば、3対3の線形変換が可能となる。このときカメラのRGB出力 $\mathbf{p}=[R \ G \ B]^T$ から基底関数の重み係数への変換は3×3の変換行列 \mathbf{M} を用いて $\mathbf{w}=\mathbf{M}\mathbf{p}$ で示すことができる[4].

$$\bar{S}(\lambda)=[w_1 \ w_2 \ w_3] \begin{bmatrix} b_1(\lambda) \\ b_2(\lambda) \\ b_3(\lambda) \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

7. 3. 2 スマートフォンの撮影画像から分光関数を推定

まず本研究で求めたいものは、対象物体の分光反射率であり、図7.1の $S(\lambda)$ である。本稿で推定する分光反射率は、ハイパースペクトルカメラ等のように分光放射輝度 $P(x)S(\lambda)E(\lambda)$ を計測しようというものではない点に注意する。このとき関数 $P(x)$ は物体、カメラ、光源の幾何条件を示す関数で、 x は位置パラメータである。関数 $P(x)$ が含まれている理由は分光放射輝度がカメラ、物体、光源の幾何的な関係に依存するからである。また分光放射輝度は、光源の分光分布に依存するため、分光反射率情報と比較して物体の材質の推定には適していない。

次に、スマートフォンの撮影画像から分光反射率を推定するための提案手法の概要を述べる。ここで挙げられる問題点の一つにスマートフォンのような全自動タイプのカメラでは、感度特性が周囲の撮影環境に応じて常時変化する可能性があることである。このとき基底関数 $b_1(\lambda)$ 、 $b_2(\lambda)$ 、 $b_3(\lambda)$ と推定される分光反射率 $\bar{S}(\lambda)$ は不変であっても、カメラ出力 \mathbf{p} と重み係数ベクトル \mathbf{w} が周囲の環境に応じて変化する。これまでカメラ画像から分光反射率を推定する手法はいくつか提案されている[4]。しかしながら、こういった従来法では、使用するカメラについて安定したカメラ感度を持ち、露出設定などにブラックボックス的な要素が無いことが前提条件となっている。本研究では露出制御に不安定要因を持つスマートフォンのカメラ出力から分光反射率を推定するために基準となる較正カメラを用意して2段階の推定手法を提案する。この基準カメラを用意する理由は、特殊な計測機器を必要とする較正処理を独立させるためである。この基準カメラを用いて未較正カメラから分光情報を推定する手法は、光源の分光分布推定[16]のために提案されたものであるが、本研究ではこの手法をスマートフォンでの分光反射率推定に応用する。

この方法では、まず分光的に較正した基準カメラを用意する。この基準カメラの較正には分光光度計を用いるが、本研究では、特殊な計測機器を必要とする基準カメラの較正処理を独立させ、機種依存しない較正情報を構築する。つまり、一度、基準カメラを較正し、その

校正情報を利用すれば、色変換用に同じカラーチャートを同時撮影するだけで「スマートフォンのような任意のカメラ」で任意の物体の分光反射率を推定することが可能となる。ここで求める校正情報とは、24色程度のカラーチャートを基準カメラで撮影したときのそれぞれのカラーパッチのカメラ出力(RGB値)と、 3×3 の変換行列 \mathbf{M} である。この校正情報は、一度計測すれば他のカメラのハードウェア特性や撮影時の照明環境には依存しないので、たとえば、使用したカラーチャートの情報(市販のものであれば商品名等)と校正情報をインターネットで公開するだけで、自分の所有するスマートフォンを用いて任意のシーンで物体の分光反射率を推定できる。ここで、この色変換用に用いたカラーチャートは以降、色変換用カラーチャートと呼ぶ。

図7.2は提案手法の概略図を示したものである。基準カメラを校正するパートが存在するが、ここでは基準カメラの校正のみを行い、そこからは校正データを獲得する。この校正データは、一度獲得すれば良い。スマートフォンで対象物体を計測するパートでは、対象物体と色変換用カラーチャートを計測する。そしてこのカラーチャートのRGB情報と先に獲得した校正データを用いて対象物体の分光反射率を獲得する。

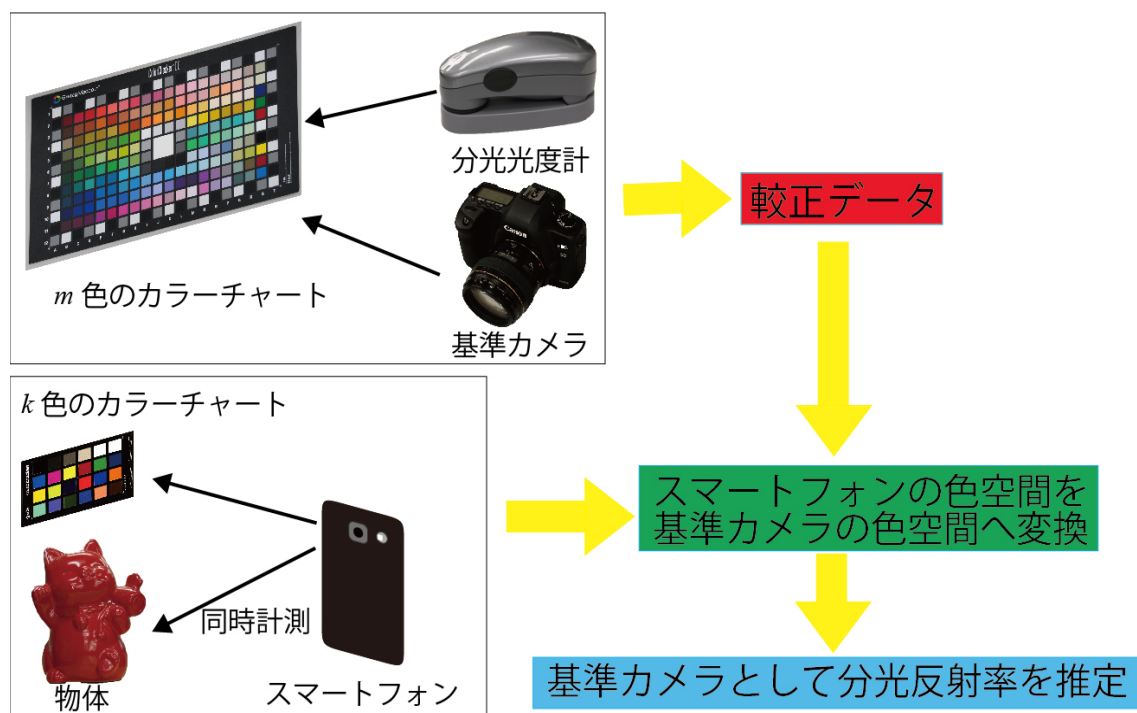


図 7.2 提案手法の概略図

7.3.2.1 基準カメラの較正法

基準カメラの較正は、基準カメラ固有のシステム変換マトリックス \mathbf{M} を決定することであるが、本稿では物体の分光反射率を対象とするため基準カメラの変換マトリックス \mathbf{M} の推定は、文献[15]の方法を直接用いるのではなく、[8]の知見に基づいた手法に改良する。[15]の方法では分光放射輝度を対象としているが、本稿では別途分光光度計で計測した分光反射率を用いることで、画像から分光反射率を直接計測できるようにする。分光情報は可視波長域(400nm-700nm)を 5nm 間隔でサンプリングし、61 次元のベクトルとして扱う。このとき較正用カラーチャートを用いて、その各カラーパッチについてカメラ出力と分光反射率の対応関係をデータベース化する。ここでは先に述べた基準カメラの較正データの公開用データベースと区別するために、推定用データベースと呼ぶ。

この較正用カラーチャート内のカラーパッチの数を m とすると、この m 個のカラーパッチの分光反射率は分光光度計で計測したものを推定用データベースに格納する。さらに同じカラーパッチを基準カメラで計測し、その各カラーパッチのカメラ出力(RGB 値)を求め、こちらも推定用データベースに格納する。したがって、ここでは m 個のカラーパッチに対するそれぞれの分光反射率とカメラ出力が対応した組ができる。

まず、ここで先に述べた知見に基づいて分光反射率の統計的な偏りを利用して低次元情報で分光反射率を表現する[11-13]。推定用データベース内の m 個の分光反射率データは $m \times 61$ の行列 $\mathbf{\Lambda}$ で示す。そして $\mathbf{\Lambda}$ に対応する RGB 値の組は $m \times 3$ の行列 \mathbf{P} とする。この $\mathbf{\Lambda}$ は分光光度計で計測した既知データであり、同じく \mathbf{P} もカメラによる計測データであるため既知データである。

まず、この $\mathbf{\Lambda}$ を主成分分析し、寄与率の高い順に 3 つの主成分ベクトルを求め、それら 3 つの主成分ベクトルは 61×1 のベクトル $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3$ で示す。この 3 つの主成分ベクトルを基底関数ベクトルとすれば、分光反射率は、この 3 つの基底関数ベクトルの線形結合で近似的に示すことができる。分光反射率を 61×1 の行列 \mathbf{s} で示すと分光反射率と基底関数ベクトルとの関係は(7.3)式のように記述できる。ここで w_1, w_2, w_3 は、それぞれの基底ベクトルの重み係数でありスカラー量である。ただし、この場合、少数の基底関数で近似的に分光反射率を記述しているため(7.3)式は誤差が含まれていることに注意する。このように分光反射率の統計情報に基づいた拘束条件を与えることで、少数の重み係数を用いて分光反射率情報が表現できるようになる。このとき RGB 値から w_1, w_2, w_3 を求めることができれば、カメラ出力から分光反射率を推定できることになる。

次にカメラの RGB 値から基底関数の重み係数 w_1, w_2, w_3 への変換の方法について述べる。このとき RGB 値から w_1, w_2, w_3 への変換の関係は 3×3 の変換行列 \mathbf{M} を用いて(7.4)式のように記述できる。つまり、このとき \mathbf{M} が決定できれば RGB 値から w_1, w_2, w_3 値が求まり、(7.3)

式から分光反射率が推定できることになる。このとき注意すべき点は、分光反射率は純粋な物体固有の物理情報であるが、それに対してカメラ出力である RGB 値は、カメラの感度特性や光源の分光分布の影響を含んだ撮影時の環境に依存した情報である。つまり、変換行列 \mathbf{M} は RGB 値からカメラの分光感度特性や光源の分光分布情報を除去し、物理情報である分光反射率へ変換するためのシステム変換マトリックス[18]となる。ガンマ特性の補正については、撮影するカラーチャートの RGB 値と分光反射率の関係がわかっている場合には、デガンマすることができるので、入出力特性は線形として扱う。

本研究では未知の変換行列 \mathbf{M} は分光反射率とカメラ出力の組との関係から推定する。この \mathbf{M} を求めるため本稿では、推定用データベースを用いる。推定用データベースに含まれる情報に限定すれば、カラーパッチの分光反射率とそれに対応するカメラ出力 RGB 値は既知の情報である。ここで \mathbf{A} に含まれるカラーパッチの分光反射率に対応する 3 つの重み係数の組 $m \times 3$ の行列を \mathbf{W} とする。そして $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3$ から作成した 3×61 の行列を \mathbf{B}' とすると \mathbf{W} は \mathbf{B}' の一般化逆行列 \mathbf{B}'^+ と(7.3)式の関係から(7.5)式のように求めることができる。そして変換行列 \mathbf{M} は、(7.4)式の関係から先ほど述べた RGB 値の組 $m \times 3$ の行列 \mathbf{P} の一般化逆行列を用いて(7.6)式のように求める。ここで \mathbf{M} は基準カメラの較正データとなる。この \mathbf{M} が求めれば(7.4)式から基底ベクトルの重み係数が求まるので、分光反射率の推定値の 61×1 の行列 $\bar{\mathbf{s}}$ は(7.7)式から求めることができる。

$$\mathbf{s} = w_1 \mathbf{b}_1 + w_2 \mathbf{b}_2 + w_3 \mathbf{b}_3 \quad (7.3)$$

$$[w_1 \quad w_2 \quad w_3] = \mathbf{M} [R \quad G \quad B] \quad (7.4)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{A} \mathbf{B}'^+ \quad (7.5)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{P}^+ \mathbf{W} \quad (7.6)$$

$$\bar{\mathbf{s}} = w_1 \mathbf{b}_1 + w_2 \mathbf{b}_2 + w_3 \mathbf{b}_3 \quad (7.7)$$

6.3.2.2 基準カメラを用いたスマートフォンからの分光反射率推定

未較正カメラであるスマートフォンのカメラで分光反射率を推定するために 24 色程度のカラーチャートを同時に計測し、それを手掛かりにスマートフォンのカメラの色空間を基準カメラの色空間へ変換する。ここで用いるカラーチャートは基準カメラを較正したときのものとは別のカラーチャートでよい。ここで用いるカラーチャートの色数を k とするととなる。この k 色のカラーチャートは先に述べた色変換用カラーチャートのことである。

スマートフォンで物体と同時にこの色変換用カラーチャートを計測すれば、その時点のカ

メラ感度特性の情報を獲得できるためカメラモデルに含まれる時間 t のパラメータを無視することができる。 k 色のカラーチャートを用いた場合、基準カメラのカメラ出力の組は $k \times 3$ の行列 ρ_0 となる。ただし k は RGB3 原色よりも多い値とする必要があるためとする。この $k \geq 3$ を用いて他のカメラの較正を行うが、この ρ_0 は他のカメラ系に依存しないので一度求めておけば良い。

次に実際にスマートフォンのカメラで対象物体を計測するときには、同じ k 色のカラーチャートを計測する。このときのカメラ出力を $k \times 3$ の行列 ρ_T とする。このとき ρ_T の色空間から ρ_0 の色空間への変換は 3×3 変換行列 M_2 を用いて (7.8) 式のように示すことができる。このとき ρ_0 は基準カメラで k 色のカラーチャートを計測したカメラ出力であるため既知データである。 ρ_T についても撮影時に決定できる既知データなので、変換行列 M_2 は (7.9) 式で求めることができる。そして、対象物体の撮影画像の RGB 値を 3×1 の行列 ρ_s とすると基底関数の重み係数 w_1, w_2, w_3 は、この M_2 と基準カメラの変換マトリックス M を用いて (7.10) 式で求めることができる。ここで求めた w_1, w_2, w_3 から (7.7) 式を用いて物体の分光反射率を推定する。このとき ρ_0 と M はユーザ側の計測系には依存しないため、一度計測すればよいので、この ρ_0 と M と、それに対応するカラーチャートの商品名等の情報をインターネットなどで較正データとして公開すれば一般のスマートフォンでも分光反射率の推定が可能となる。

$$\rho_0 = M_2 \rho_T \quad (7.8)$$

$$M_2 = \rho_0 \rho_T^+ \quad (7.9)$$

$$[w_1 \quad w_2 \quad w_3] = M M_2 \rho_s \quad (7.10)$$

7. 4 実験

提案システムを用いて画像から分光反射率推定を行った。本実験ではスマートフォンには Fujitsu Arrows NX F-06E を使用した。搭載されているカメラのセンサは裏面照射型 CMOS で最大解像度は約 1630 万画素である。較正した基準カメラシステムとしては Canon EOS 5D MarkII を用いた。このカメラのセンサはフルサイズの CMOS であり、最大解像度は約 2100 万画素となる。

まず、基準カメラの較正を行った。この基準カメラの較正までは分光光度計を用いる。分光反射率の推定に必要なデータベースの構築には Gretag Macbeth 社製のカラーチャート(図 7.3)の 176 色を用いた。このカラーチャート内の 176 色カラーパッチの分光反射率計測には X-Rite 社製の i1 Pro を用いた。この計測した 176 色カラーパッチの分光反射率は推

定用データベースに格納した。図 7.4 は、推定用データベース内、つまり計測した 176 色カラーパッチの分光反射率を主成分分析し、そこから得られた基底関数の寄与率の高い 3 つを抽出した結果を示すグラフである。

次にスマートフォンの色空間から較正した基準カメラの RGB 色空間への変換を行った。この変換によってスマートフォンのカメラのカメラ感度が疑似的に基準カメラのカメラ感度になり、計測環境も基準カメラで計測したときと同じ照明環境となる。

スマートフォンのカメラの色空間から基準カメラの色空間変換には、Gretag Macbeth 社製の 24 色のカラーチャートを基準として用いた。基準カメラを用いて 24 色カラーチャートと計測物体を同時に蛍光灯下で計測した。この色変換に必要なのは、基準カメラのシステム変換マトリックスと、基準カメラで撮影した 24 色カラーパッチの RGB 値のみである。計測物体は図 7.5 に示す。アクリル塗料(アサヒペン社製アクリルラッカー Sprey)を塗布した石膏の置物が三つである。それぞれの置物は個別に赤、青、緑色で塗布した。分光反射率の計測部位は黄色の四角部分である。

図 7.6 は基準カメラを用いて蛍光灯照明下で撮影した画像である。図 7.7 はスマートフォンのカメラを用いて同じ蛍光灯照明下で撮影した画像である。この図 7.7 の色空間を提案手法で基準カメラの感度特性かつ蛍光灯照明下での色空間に変換した結果を図 7.8 に示す。図 7.8 は、図 7.7 と比較したところ図 7.6 の色空間に近い状態へ変換されたことがわかった。これは、スマートフォンのカメラの分光感度と照明環境の影響を基準カメラの条件に合わせて変換したことを意味する。

次に、提案手法を用いて実際の物体の分光反射率を推定した。その推定値は、基準カメラで推定した推定値、分光光度計の計測値、それぞれと比較した。図 7.9 は計測した物体の分光反射率をグラフで示したものである。(a)が赤色の置物、(b)が青色の置物、(c)が緑色の置物を示している。それぞれのグラフ中の赤い実線が分光光度計で直接計測した分光反射率であり、緑色の一点鎖線が基準カメラで推定した分光反射率である。青い破線がスマートフォンのカメラで推定した分光反射率である。また、表 7.1 は較正カメラと未較正カメラの推定精度を Root Mean Square Error (RMSE) で示したものである。分光反射率の推定結果は、基準に用いた較正カメラ(EOS 5D Mark II)と比較すると当然のことながら推定精度は低下するが、分光反射率の概形の推定は可能となった。さらに、本研究の妥当性を検証するため、スマートフォンを用いて異なる光源下で計測した画像から分光反射率を推定する追加実験を行った。図 7.10 は白熱電球化で撮影した計測画像である。ただし、この画像はカメラの自動ホワイトバランス機能が働いているので、光源色に対する色は、ある程度適切に補正された画像となっている。図 7.11 は推定した分光反射率のグラフである。図 7.9 と同様(a)が赤色の置物、(b)が青色の置物、(c)が緑色の置物を示している。これらの実験においても、それぞれのグラフ中の赤

い実線が分光光度計で直接計測した分光反射率であり、緑色の一点鎖線が基準カメラで推定した分光反射率である。青い破線がスマートフォンのカメラで推定した分光反射率である。このように撮影時と異なる照明光を用いた場合、蛍光灯下で計測した画像からの推定結果と比較して、ほぼ同等の推定精度が確保できていることがわかる。このことにより、ユーザの立場では特殊な計測器を用いずにスマートフォンで物体の分光反射率の推定が可能となった。本論文では、カメラ出力から分光反射率を推定するためにシステム変換マトリックスを用いることを前提としている。また、基準カメラを用いることで異なる色空間（感度特性）を持つカメラを用いた場合でも高精度かつ簡便な分光反射率推定が可能となった。

表 7.1 較正カメラと未較正カメラの平均二乗誤差

	基準カメラ EOS 5DMarkII	スマートフォン Arrows NX F-06E
赤色の置物	8.44×10^{-2}	8.89×10^{-2}
緑色の置物	6.60×10^{-2}	3.36×10^{-2}
青色の置物	3.17×10^{-2}	6.67×10^{-2}

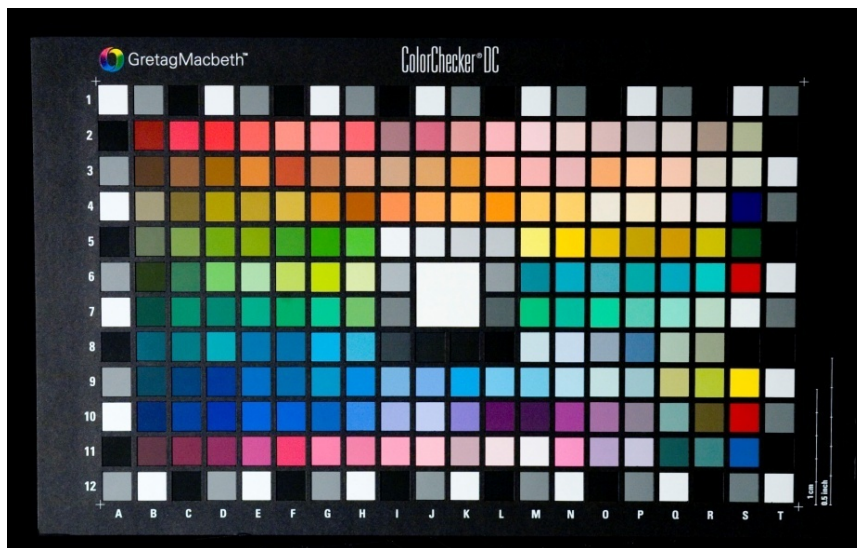


図 7.3 推定用データベースの構築に用いた色票 (176 色)

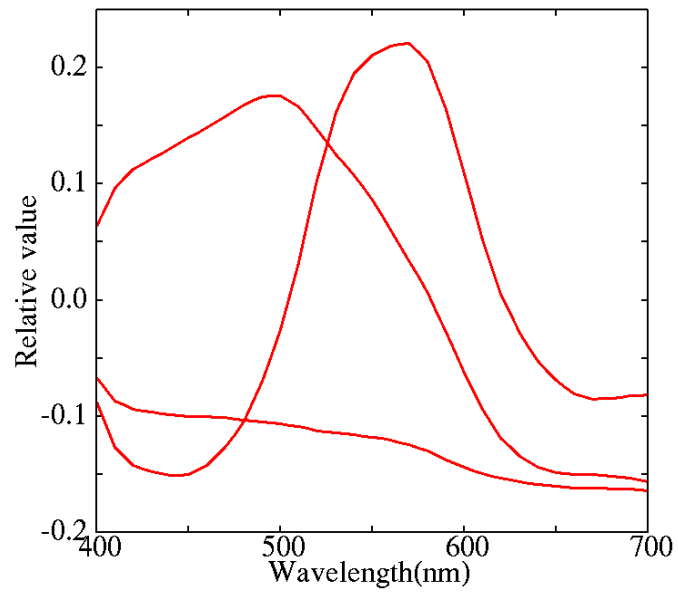


図 7.4 推定用データベースの分光反射率から得られた基底関数



図 7.5 計測対象物体と分光反射率の計測部位



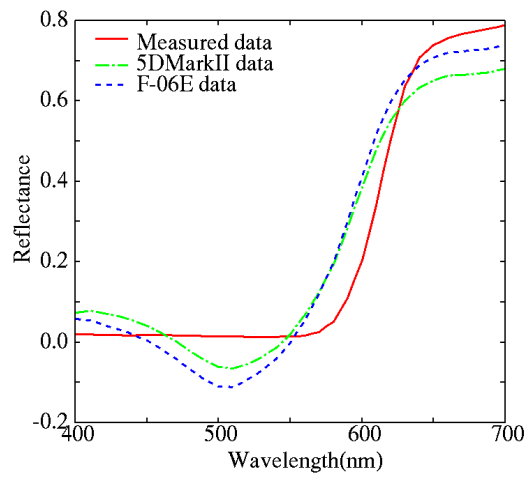
図 7.6 基準カメラ EOS 5DMarkII で撮影したオリジナル画像



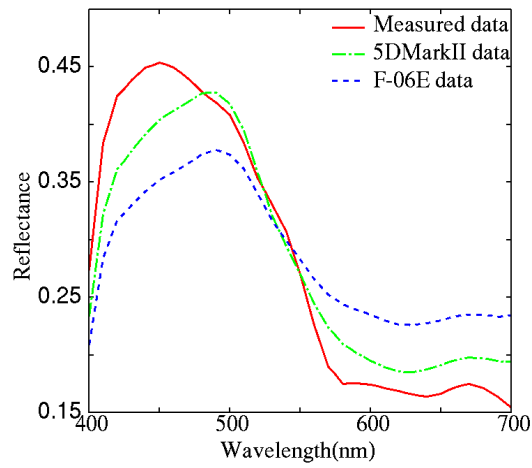
図 7.7 未校正カメラ(F-06E スマートフォン)で撮影した画像



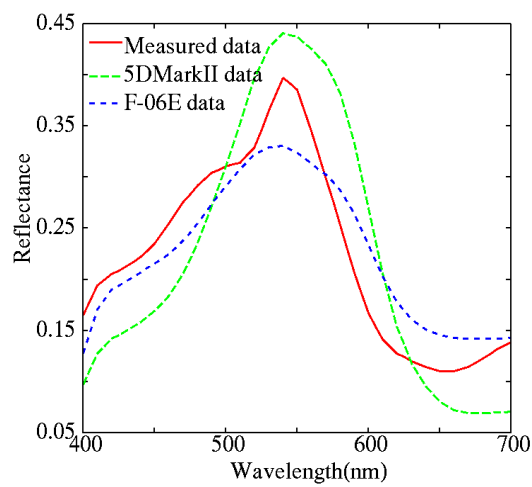
図 7.8 スマートフォンの画像を基準カメラ (EOS 5DMarkII) の色空間に変換した画像



(a)赤色の置物



(b)青色の置物

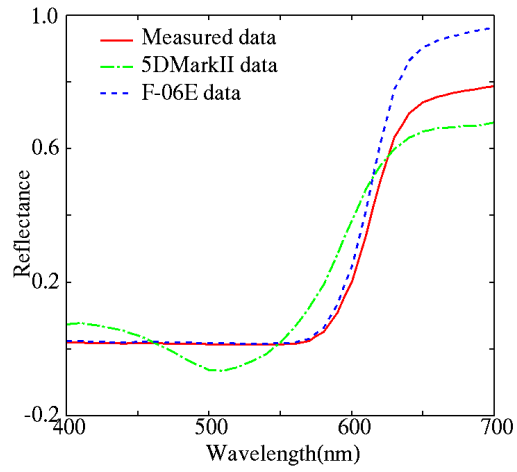


(c)緑色の置物

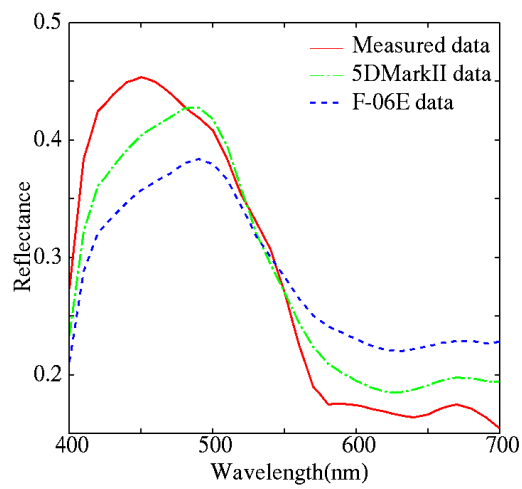
図 7.9 分光反射率の推定結果と分光光度計での計測値との比較



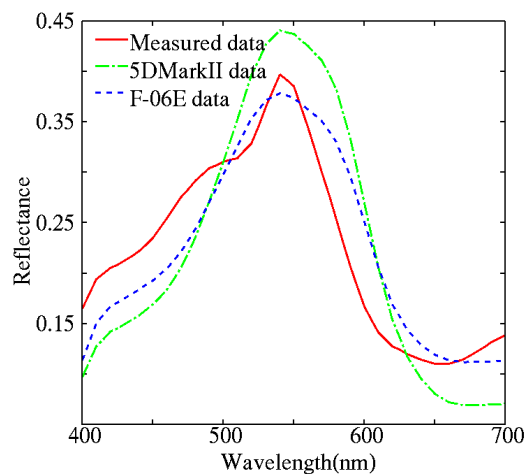
図 7.10 未校正カメラ(F-06E スマートフォン)で撮影した画像 (白熱電球下)



(a) 赤色の置物



(b) 青色の置物



(c) 緑色の置物

図 7.11 分光反射率の推定結果と分光光度計での計測値との比較（白熱電球）

7.5 まとめ

本稿ではユーザが複雑な較正用のハードウェアを使用せずにスマートフォン単体で分光画像計測が利用可能という点である。具体的には、最初に別に基準用カメラを用意して、そのカメラの分光反射率推定用のシステム変換マトリックスと色変換用のカラーチャートの RGB 値情報を機種依存しないように独立させる。そして、スマートフォン利用者の立場からは特殊なハードウェアを用いずに分光的な較正を行うことが可能となった。本研究で開発したシステムの妥当性は、実際の物体を対象にスマートフォンで分光反射率を推定し、その推定値を分光光度計で直接計測された計測値と比較することで精度を検証した。その結果、分光反射率の提案手法による推定結果と分光光度計で直接計測した計測値を比較した。その結果、推定誤差は 8.44×10^{-2} (赤の物体), 3.36×10^{-2} (緑の物体), 6.67×10^{-2} (青の物体)となった。

本研究の特徴的な点は、スマートフォンを利用するユーザの立場では公開用データベースの情報をダウンロードするだけで、特殊な計測機器を用いずに対象物体の分光反射率が推定できることである。

本研究によって、スマートフォンを用いて分光情報が手軽に推定できるようになったが、今後はこの推定された分光反射率を使ってデザイン材料の材質の特性等の推定に応用していく具体的な方法を提案する予定である。

第 8 章

結論

本章では本論文における結論を述べる。本研究の大局的な目的は CG 技術に色再現の知見を加えることにより、従来では CG が適用不可能であった分野に新たな応用の機会を与えることである。従来の CG 技術では色再現に関する技術開発が不十分であったため、その利用目的が映画やゲームといったエンターテインメント分野に限定されていた。

本論文では、文化財や美術品の高精度な画像再現や色再現に耐えうることを目的として計測データと分光情報に基づく 3次元コンピュータグラフィックス画像の生成手法を提案した。本提案で得られた知見により、実在する物体を高い色再現精度で 3DCG 再現できるようになった。本手法の色再現に関する有効性と妥当性は、分光光度計などの色彩計測機による計測データに基づいた検証を行ったことにより定量的に示すことができた。

また、本提案の特徴は、従来ではデザイナーや CG 製作者の経験に基づいた CG 生成を光反射のモデル化技術と計測データに基づいた定量的な CG 生成手法を開発したことである。高精度な画像再現をするために光反射モデルを用いて、それに与えるモデルパラメータは光反射計測に基づいて推定した。これにより製作者の経験といった主観的な要素を CG 制作の過程から取り除き、定量的かつ客観的な情報に基づいた高精度な CG が生成できるようになった。

さらに構築する光反射モデルはデバイスや照明環境に依存しない分光情報と人間の視覚が莫大に増えるため、提案手法を Graphics Processing Unit(GPU)と呼ばれるグラフィックス処理専用ハードウェアに実装する手法を提案した。

本研究では分光ベースによる手法が大きな特徴であるが、通常の RGB 情報と比較して次元数が極端に多くなる分光情報で画像情報を表現しようとするデータ量の問題が発生した。特に近年の CG 分野における画像品質の要求に応えるためには数千万画素といった高解像度の画像情報が必要となり、問題はさらに深刻になる。そこで本研究ではレンダリングに用いる分光情報の統計的特徴を解析し、分光画像の画像品質を保ちながら分光分布データを圧縮する方法を開発した。さらに、膨大に増加した計算量を削減するために分光放射照度マップと呼ばれるルックアップテーブルに基づく技術を開発したことにより、画像品質を低下させずに計算量を大幅に低下させた。これにより、GPU 上で分光的なマッピング画像を用いてフルハイビジョンよりも高精細なウルトラハイビジョンの高解像度 3DCG を生成することができた。圧縮前と圧縮後の分光画像を使用してレンダリング速度を比較し、その有効性を示した。これにより高精度な色再現を実現しながらもリアルタイムかつインタラクティブな CG 生成が実現できた。

また、透過や多重反射を含む物体を精密かつ高速に CG 再現するため、GPGPU(General Purpose Graphics Processing Unit)を用いた分光ベースのレイトレーシング手法を提案した。分光ベースの反射モデルに基づいて GPU 上のフラグメントシェーダにレイトレーシング法を実装した。そして、分光画像を用いた IBL による全方位照明光源下でのレンダリングは速度を高速化するために放射照度マップを用いて行った。本研究では GLSL と呼ばれるシェーディング言語を用いてグラフィックス API のレンダリングパイプラインに依存しない分光ベースのレイトレーシング法を実装する手法を述べ、実際にレンダリングを行った結果十分なレンダリング速度を得ることができた。また、実物とディスプレイに表示した CG の色の比較を視覚的に行い、実物に近い色で再現できていることがわかった。最後に、透過や屈折率が見えに大きく影響を与える物体にも対応できるようにするために、仮の透過率と屈折率を与えて再現してその見えを検証した。

本論文で述べた手法の有効性と妥当性を調べるために実際の美術品を対象として 3 DCG 再現する手法を述べた。対象とした美術品は江戸時代に織られた絹織物であり、光反射特性を計測するための手法の提案と計測系を設計し、画像計測から高精度に反射モデルパラメータを推定した。本研究では、色の計測精度を向上させるために通常の RGB カメラによる画像計測手法に加え、くし型分光透過フィルタを用いた 6 バンドマルチカメラを用いた計測系の試作と推定手法を提案した。これにより、通常の RGB カメラと比較して色の分解能を向上させることができたため、高い精度で分光反射率を推定することができた。そして分光情報とともに物体表面の反射光分布の計測データからモデルパラメータを推定し、その結果は計測機による計測結果と直接比較により妥当性を検証した。また、本研究では絹織物表面の 3 次元構造を、照度差ステレオ法を用いて表面の法線ベクトルマップとして推定する手法を提案し、絹織物表面の形状を推定することができた。

そして、絹織物の分光反射率と実際に存在する光源分布マップを使用することで、照明方向や見る位置によって、刻一刻と変化する絹織物の姿を CG 再現することが可能になった。

また、本論文で述べた提案手法の応用例の一つとして、スマートフォンのような多くの人々が持つデバイスを用いた分光反射率の推定法を述べた。

本研究の最も大きな成果は、実在する物体を高い色再現精度で CG 再現できるようになったことである。特に繊維物体における複雑な光反射を複数の視点から分析し、その反射特性を物理的に詳細に記述できるようになった。ここで得られた知見は、情報工学的な知見

に加え、色彩学やデジタル画像機器に関するハードウェア開発にも貢献できる基礎研究となる。本研究の特徴は、光反射モデルとモデルパラメータにより計測データから対象物体の材質の特性を定量化できることである。また、もう一つの特徴は、その定量化した情報から精密に対象物体をCG再現できることである。本研究のこの成果は美術品のデジタルアーカイブと、さらにアーカイブしたものをデジタル展示・鑑賞するためのシステムとして活用することができる。産業的には自動車塗装などの複雑な光反射特性を持つ工業製品や服飾製品のデザイン支援、新たな映像コンテンツの制作支援、文化面では文化財の復元や分析、医療分野では画像解析に基づいたリモート診断システムや手術シミュレータといった様々な分野への応用が可能である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くのご支援を賜りました。信州大学繊維学部 森川英明教授には丁寧なご指導を賜りました。長野大学企業情報学部 田中法博教授には丁寧なご指導や研究設備の提供など、学部、修士課程、博士課程を通じて終始ご支援を賜りました。信州大学繊維学部 石澤広明教授、乾滋教授、金井博幸准教授、千葉大学大学院 寺内文雄教授には本論文の審査にあたり重要なお指摘を賜りました。信州大学繊維学部 三浦幹彦教授には熱心なご指導を賜りました。長野大学企業情報学部 禹在勇教授、森俊也教授には研究面をはじめ、様々な面からご支援を賜りました。長野大学教職員の皆様には研究面、学生生活において、様々なご支援を賜りました。信州大学繊維学部 大谷毅教授、高寺政行教授にはご指導と研究備品の提供を賜りました。信州大学繊維学部 森島美佳助教には研究面でのご指導を賜りました。国立歴史民俗博物館 鈴木卓治准教授と千葉大学大学院 富永昌治教授には研究活動で様々な議論の中でお指導を頂きました。各学会の先生方には多くのご助言を賜りました。長野大学田中ゼミナールの皆様には共に研究活動で苦勞し様々なご支援を頂きました。特に、長野大学から信州大学大学院に共に進学した林一成君と荒井甫君とは苦勞を共にし、様々な支援を頂きました。長野大学卒業生の宮下朋也君と戸谷重幸君とは共に研究を行い様々なご支援を頂きました。信州大学繊維学部森川・森島研究室の皆様にはご支援を頂きました。本研究は、日本学術振興会特別研究員制度(2510497)のご支援を頂きました。シナノケンシ株式会社 金子元昭様には公益信託金子八郎基金によるご支援を賜りました。最後に、ここまでの研究生活は家族の理解と支えがあり、継続することができました。

ここに深く感謝致します。

参考文献

- [1]大田登, 色再現工学の基礎, コロナ社, 1997.
- [2]富永昌治, 田中法博: カラーカメラを用いた美術絵画の計測とレンダリング, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.1, pp.350-361, 2004.
- [3]上田克幸, 面家康孝, 岩崎 慶, 高木佐恵子, 吉本富士市: 多重薄膜で覆われた物体のリアルタイムレンダリング, Visual Computing グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2007 予稿集, pp.185-190, 2007.
- [4]田中法博, 禹在勇, 更科友啓, 望月宏祐, 分光的な光反射計測に基づいた物体の表面反射特性推定, 日本感性工学会論文誌, Vol.8, No.3, pp.943-950, 2009.
- [5]田中法博, 望月宏祐, 禹在勇: 物体表面の反射特性と分光反射モデルに基づいたリアルタイムレンダリング手法, 日本感性工学会論文誌, Vol.9, No.3, pp.311-321, 2010.
- [6]K.E.Torrance, E.M.Sparrow, "Theory for off-specular reflection from roughened surfaces", Journal of Optical Society of America A, Vol.57, No.9, pp.1105-1114, 1967.
- [7]R. Durikovic and R. Kimura, "GPU Rendering of the Thin Film on Paints with Full Spectrum", Proc. of the conference on Information Visualization, pp.751-756, 2006.
- [8]C. C. Chiao, T. W. Cronin, D. Osorio, "Color signals in natural scenes: Characteristics of reflectance spectra and effects of natural illuminants", Journal of the Optical Society of America A, Vol.17, No.2, pp. 218-224 ,2000.
- [9]S.Tominaga, A.Matsuura, T.Horiuchi, "Spectral analysis of omnidirectional illumination in a natural scene", Journal of Imaging Science and Technology, Vol.54, No.4, pp.040502-1 - 040502-9, 2010.
- [10]P. E. Debevec, "Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography", Proceedings of SIGGRAPH 98, pp.189-198, 1998.
- [11]田中法博, 梶本めぐみ, 富永昌治, "鏡面球を用いた光源の全方位分布の推定", 日本色彩学会誌, Vol.25, No.2, pp.92-101, 2001,
- [12]S.Tominaga, N.Tanaka, "Omnidirectional scene illuminant estimation using a mirrored ball", Journal of Imaging Science and Technology, Vol.50, No.2, pp.217-227, 2006.
- [13] N. Shimano, "Recovery of spectral reflectances of objects being imaged without prior knowledge", IEEE Transaction of Image Process, Vol.15, No.7, pp.1848-1856 2006.
- [14]S.Tominaga, "Multichannel vision system for estimating surface and illuminant functions", Journal of the Optical Society of America A, Vol.13, No.11, pp.2163-2173, 1996.

- [15]長谷川隆行, 飯野浩一, 津村徳道, 中口俊哉, 三宅洋一, “メタマ推定に基づく RGB 画像からの被写体の測色値予測(第一報 : 理論)”, 画像電子学会誌 Vol.38, No.4, pp.365-374, 2009.
- [16]田中法博, 望月宏祐, ”RGB カメラによる全方位分光画像計測と IBL への応用”, 画像電子学会論文誌, Vol.42, No.4, pp.466-476, 2013.
- [17]M. J. Vrhel, R. Gershon, L.S.Iwan, ”Measurement and analysis of object reflectance spectra”, Color Research and Application, Vol.19, No.1, pp.4-9, 1994.
- [18]F.Schmitt, H.Brettel, J.Y.Hardeberg, “Multispectral imaging development at ENST”, Proceedings of International Symposium of Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archive, pp.50-57, 1999.
- [19]田中法博, 富永昌治, ”3次元反射モデルの解析と推定, 情報処理学会論文誌 CVIM”, Vol. 41, No. SIG 10(CVIM 1), pp.1-11, 2000.
- [20]G. Miller, C. Hoffman, “Illumination and reflection maps: simulated objects in simulated and real environments”, In ACM SIGGRAPH 84 course notes, 1984.
- [21]納谷嘉信:産業色彩学, 朝倉書店, 1980.
- [22]J. Cohen, “Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips”, Psychonomical Science, Vol.1, pp.369-370, 1964.
- [23]L. T. Maloney, “Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters”, J. of Optical Society of America A, Vol.10, pp.1673-1683, 1986.
- [24]J. P. S. Parkkine, J. Hallikainen, T. Jaaskelainen “Characteristic spectra of Munsell colors”, J. of Optical Society of America A, Vol.6, No.2, pp.318-322, 1989.
- [25]M. J. Vrhel, et al., “Measurement and analysis of object reflectance spectra”, Color Res.andApp., Vol.19, pp.4-9. 1994.
- [26]望月宏祐, 田中法博, 林一成, 禹在勇, 富永昌治, ”分光画像圧縮に基づいた分光ベースレンダリングの高精細化”, 日本感性工学会論文誌, Vol.9 No.2, pp.301-309, 2010.
- [27]S. Tominaga, S. Ebisui, B.A. Wandell, “Scene illuminant classification -Brighter is Better-“, Journal of Optical Society of America A, Vol.18, No.1, pp. 55-64, 2001.
- [28]三宅洋一:分光画像処理入門, 東京大学出版会, 2006.
- [29]S. K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade, “Surface reflection: physical and geometrical perspectives”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13 ,Issue 7, pp. 611– 634, 1991.
- [30]H. Haneishi, T. Hasegawa, A. Hosoi, Y. Yokoyama, N. Tsumura, Y. Miyake, “System design for

- accurately estimating the spectral reflectance of art paintings”, *Applied Optics* Vol.39, No.35, pp.6621-6632, 2000.
- [31]J. R. Wallace, M. F. Cohen, D. P. Greenberg, “A Two-Pass Solution to the Rendering Equation: A Synthesis of Ray Tracing and Radiosity Methods”, *Computer Graphics* Vol.21, No.4, pp.311-320, 1987.
- [32] R. Fernando, et al., “GPU Gems: Programming Techniques, Tips and Tricks for Real-Time Graphics”, Addison-Wesley Professional, 2004.
- [33]富永昌治, ”反射モデルを用いた物体色画像の解析”, *テレビジョン学会誌*, Vol.50, No.5, pp.577-585, 1996.
- [34]眞鍋佳嗣, 佐藤宏介, 井口征士, ”光源移動による相互反射の検出”, *電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理 J78-D-2(1)*, pp.86-93, 1995.
- [35]S. Boivin, A.Gagalowicz, “Image-based rendering of diffuse specular and Glossy surfaces from a single image”, *Proc. SIGGRAPH '01*, pp.107-116, 2001.
- [36]G. Drettakis, L. Robert, S.Bougnoux, “Interactive common illumination for computer augmented reality”, *Eurographics Rendering Workshop 1997*, pp.45-56, 1997.
- [37] J. T. Kajiya, “The rendering equation”, *Proc. SIGGRAPH '86*, pp.143-150, 1986.
- [38]C.Loscos, G. Drettakis, L. Robert, “Interactive virtual relighting of real scenes”, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics*, Vol.6, No.4, pp.289-305, 2000.
- [39]Y. Yu, P.E. Debevec, J. Malik, T. Hawkins, “Inverse global illumination Recovering reflectance models of real scenes from photographs,” *Proc. SIGGRAPH '99*, pp.215-227, 1999.
- [40]E. Mansson, J. Munkberg, T. A. Moller, ”Deep Coherent Ray Tracing, Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing table of contents”, pp.79-85. 2007.
- [41]S. Hanan, ”Implementing Ray Tracing with Octrees and Neighbor Finding”, *Comput. & Graphics*, Vol.13, No.4, pp. 445-460. 1989.
- [42]T. Yasuda, S. Yokoi, J. Torikawa, K. Inagaki, “A shading model for cloth objects”, *IEEE Computer Graphics*, Vol.12, No.6, pp.15-24, 1992.
- [43]J. Yang, K. Ikeuchi, “A rendering method for woven clothes reflections”, *Information Processing Society of Japan Technical Report (Computer Vision and Image Media)*, 88, pp.34-40. 2003.
- [44]P. Irawan, S. Marschner, “Specular reflection from woven cloth”, *Journal ACM Transactions on Graphics*, Vol.31, No.1, 20 pages, 2012.
- [45]W. Wakita, T. Tanaka, “A Digital archiving for large 3D woven cultural artifacts exhibition”,

- ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol.2, No.3, pp. 236-247. 2014.
- [46]R. Ozeki, Y.Nishikawa, Y. Yakeda, Y.Yuasa, H.Tanaka, “Weave pattern modeling of silk-like fabrics from multi-illuminated HDR image analysis”, Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), pp.962-969, 2009.
- [47]M. Schneider, “Real-time BTF rendering”, 8th Central European Seminar on Computer Graphics 2004, pp.79-86, 2004.
- [48]K.J. Dana, B.V. Ginneken, S.K. Nayra, J.J .Koenderink, “Reflectance and texture of real-world surfaces”, In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.151–157, 1999.
- [49]X. Tong, J. Zhang, L. Liu, X. Wang, B.Guo, H. Shum, “Synthesis and rendering of bidirectional texture functions on arbitrary surfaces”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. Vol.10, No.3, 278-289, 2002.
- [50]N. Tanaka, K. Mochizuki, “A digital archive method based on multispectral imaging with goniometric multiband camera”, Bulletin of Japanese Society for the Science of Design. Vol.61, No.3, 10 pages (Accepted)
- [51]K. Mochizuki, N. Tanaka, H. Morikawa, “Estimation of reflection properties of silk textile with multiband camera”, International Congress of the International Association of Societies of Design Research, 6 pages, 2013.
- [52]R.J. Woodham, “Photometric method for determining surface orientation from multiple images”, Optical Engineering, Vol.19, No.1, pp.139-144. 1980.
- [53]P.E. Debevec, “Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography”, Proceedings of SIGGRAPH 98, 189-198. 1998.
- [54]田中法博, 望月宏祐, “スマートフォン用の分光ベースCGレンダリング手法”, デザイン学研究, Vol.61, No.6, 10pages (Accepted).
- [55]Y. Miyake, Y. Yokoyama, N. Tsumura, H. Haneishi, K. Miyata, J. Hayashi “Development of multiband color imaging systems for recording of art paintings”, Proc. SPIE: Color Imaging, Vol.3648, pp.218-225, 1999.
- [56]矢部政実, 田桐澤根, 岡本好広, “各種対候試験による塗膜の劣化メカニズムの解析”, 塗料の研究, No.146, pp. 8-15, 2006.
- [57]松田宗, 田中法博, 市川拓磨, 吉岡勇我, 望月宏祐, “分光反射モデルに基づいた紫外線劣化のCG再現”, 計測自動制御学会中部シンポジウム 2013 講演論文集, pp.12-15, 2013.
- [58]Y. Masuda, T. Yamashita, T. Hirao, M. Takahashi “An innovative method to measure skin

pigmentation”, *Skin Research and Technology*, Vol.15, pp.224-229, 2009.

[59]S. Toya, N. Tanaka, J. Woo, “Estimation of Human skin properties using Smartphone”, *AIC2012*, 4pages, 2012.

[60]K. Tonsho, Y. Akao, N. Tsumura, Y. Miyake, “Development of goniophotometric imaging system for recording reflectance spectra of 3D objects”, *SPIE Proceedings*, 4663, pp.370-378, 2001.