

博士論文

実物体の仮想化のための  
3次元幾何モデルのテクスチャリング手法

東京大学大学院  
情報理工学系研究科  
電子情報学専攻

運天 弘樹

指導教員 池内 克史 教授

# 概要

仮想現実感システムは、仮想モール、電子博物館、ゲーム等さまざまな分野での応用が期待されており、近年さまざまな取り組みがなされている。特に、仮想現実感モデルの効率的生成手法に関しては、精力的に研究が行われている。現在、仮想現実感モデルの多くは、オペレータにより手動で作成されているため、時間、コスト等の観点からして、自動化が強く望まれている。そこで、現実世界を計測することにより、仮想現実感モデリングを行う手法の開発が行われてきた。

仮想現実感モデリングは、大きく (1) 幾何モデリング, (2) 光学モデリング, (3) 環境モデリングの3つの要素に分離することが可能である。現実感の高い仮想現実感モデルを生成するためには、幾何モデリングにより生成された3次元幾何モデルを用いて、光学モデリング, 環境モデリングの手法を適用する必要がある。本論文は、光学モデリング, 環境モデリングの分野に関連する研究であり、幾何モデリングによって得られた3次元幾何モデルに色情報を付加することにより現実感を高めることに主眼を置いている。

3次元形状に色情報を付加するための有効な手法の一つとして、3次元幾何モデルのテクスチャリングが挙げられる。テクスチャリングとは、3次元幾何モデル上にデジタルカメラ等で計測したカラー画像(テクスチャ)を貼り付ける手法である。この手法には幾何学的問題、光学的問題の2つの問題がある。幾何学的問題は、テクスチャ撮影時のカメラと3次元幾何モデル計測時の距離センサの相対的な位置関係を決定する問題である。一般にカラー画像撮影時のデジタルカメラの位置と距離画像計測時の距離センサの位置は異なるので、得られた3次元幾何モデルの正しい位置にテクスチャを貼り付けるためには両

者の位置関係を決定する必要がある。一方，光学的問題は，入力テクスチャ間の色調の整合性を保つ問題である。観測される画像は，光源、物体の光学的、幾何的性質の影響を受けるため、光源状況が異なる複数の画像を用いて単純にテクスチャリングを行うと、テクスチャ間のつなぎ目に色の不連続が生じてしまうことになる。これらの影響を除去するために、得られた複数枚の画像間の色調補正を行う必要がある。

本研究では，幾何学的側面に関してテクスチャリングシステムを，光学的側面に関してテクスチャ間の色調補正手法を開発する。

テクスチャリングシステムは，距離画像とカラー画像を同時に計測し，その相対的な位置関係(カメラパラメータ)を決定し，得られた3次元幾何モデル上にカラー画像を貼り付けることにより現実感の高いモデルを生成するシステムである。既存の手法として，独立に観測された距離画像とカラー画像からそれぞれ特徴を抽出し，その特徴が矛盾なく一致するように最適化を行うことにより，自動的にカメラパラメータを推定する手法が提案されているが，最適化によりカメラパラメータを推定する手法では，初期条件や収束性等の問題が発生する場合がある。このため，本システムでは確実にカメラパラメータを推定するためにキャリブレーション物体を用いてあらかじめカメラパラメータを推定することとした。また，本システムでは，距離センサ上にデジタルカメラを固定し，距離画像とカラー画像を同時に撮影を行うため，距離センサとデジタルカメラの位置関係は一連の計測時には固定されており，一回のキャリブレーションを行うだけでよい。推定されたカメラパラメータを用いることにより，観測されたカラー画像を3次元幾何モデルの上に正しく貼り付けることが可能である。

次に，上記システムを用いて計測されたデータに対して光学的側面に関して検討を行う。カメラパラメータが正しく推定されていても，光源環境の異なる2枚の画像をそのまま3次元幾何モデル上に貼り付けると，画像間につなぎ目が生じてしまう。これは，観測される画像は，対象物体の周りの光源環境に依存していることに起因しており，つなぎ目なく貼り付けるためには，画像の色調補正を行うことが必要である。本研究では，物体の固有の性質である反射率(albedo)を考慮して色調補正を行う手法を2つ提案する。

1つ目の手法は、クロマティシティに基づく手法であり、観測された画像が無遠点光源下のものであり、クロマティシティが同じであれば画像強度は同じであるという仮定が成立する場合に適用可能な手法である。本手法では、各入力画像に対して、クロマティシティ T マップと呼ばれる分布図を作成し、それを元に擬似 albedo 画像を作成する。得られた擬似 albedo 画像は3次元幾何モデル上で同じ点であれば、それぞれの画像上でも同じ色となるので、これを3次元幾何モデルに貼り付けることによりつなぎ目の無いモデルを得ることが可能である。本手法は、特に、3次元幾何モデルの誤差が大きい場合にもその誤差を補正する効果が期待できる。

クロマティシティに基づく手法は簡便な手法であるが、点光源下であること等の制約がある。そこで手法を一般光源環境下でも適用可能となるように改良し、2つ目の手法である光源球に基づく手法を提案する。本手法は、複数光源環境下の画像やセルフシャドウ等が存在する画像に対しても適用可能な手法である。仮想的に物体を覆うような半球状の面光源(光源球)を考え、その面光源を多数の点光源で近似することにより光源環境を近似する。各点光源で白色の3次元幾何モデルをレンダリングし、これを基底画像とする。基底画像の線形結合で対象物体の光源情報画像(Illumination 画像)を近似する。一方で、画像強度は、albedo と Illumination 画像との積であり、光源環境の異なる2枚の画像が与えられると、2枚の画像から得られる albedo が同じ値をとることから、Illumination 画像に対する条件式が得られる。この条件式を解くことにより、2枚の画像の色調を連続手につなぎ合わせるための光源環境が得られ、入力画像より、擬似 albedo 画像を得る。先に述べたとおり、得られた擬似 albedo 画像は3次元幾何モデル上で同じ点であれば、それぞれの画像上でも同じ色となるので、これを3次元幾何モデルに貼り付けることによりつなぎ目の無いモデルを得ることが可能である。

本研究では，上記のテクスチャリングシステムを開発し，本システムを用いて得られた実データに対して2つの色調補正の手法を適用し，その有効性の確認を行う．

# 目次

|       |                    |    |
|-------|--------------------|----|
| 第1章   | はじめに               | 1  |
| 1.1   | 背景                 | 1  |
| 1.2   | 目的                 | 4  |
| 1.3   | 本論文の構成             | 4  |
| 第2章   | テクスチャリングシステム       | 9  |
| 2.1   | はじめに               | 9  |
| 2.2   | 提案システム             | 16 |
| 2.3   | データ取得              | 16 |
| 2.4   | キャリブレーション          | 17 |
| 2.5   | 実験                 | 21 |
| 2.6   | まとめ                | 31 |
| 第3章   | クロマティシティに基づく色調補正手法 | 36 |
| 3.1   | はじめに               | 36 |
| 3.2   | 提案手法               | 46 |
| 3.3   | 擬似 albedo 推定       | 46 |
| 3.4   | クロマティシティ-T マップ推定   | 49 |
| 3.5   | 手法の限界と適用可能性        | 52 |
| 3.5.1 | 仮定の妥当性             | 52 |
| 3.5.2 | 光源方向推定             | 54 |
| 3.6   | 実験                 | 63 |
| 3.7   | まとめ                | 69 |
| 第4章   | 光源球に基づく色調補正手法      | 73 |
| 4.1   | はじめに               | 73 |

|     |                           |     |
|-----|---------------------------|-----|
| 4.2 | 基底画像を用いた光源環境の表現 . . . . . | 77  |
| 4.3 | 色調補正手法 . . . . .          | 81  |
| 4.4 | 手法の適用可能性 . . . . .        | 84  |
| 4.5 | 実験 . . . . .              | 95  |
| 4.6 | まとめ . . . . .             | 101 |
| 第5章 | 結論 . . . . .              | 104 |
| 5.1 | 寄与 . . . . .              | 106 |
| 5.2 | 今後の課題と展望 . . . . .        | 107 |

# 目次

|      |                                   |    |
|------|-----------------------------------|----|
| 1.1  | 本論文の構成                            | 6  |
| 2.1  | 物体の輪郭線及び投影された3次元モデルの輪郭線           | 11 |
| 2.2  | RMS 誤差                            | 12 |
| 2.3  | 3次元幾何モデルへテクスチャの貼り付け結果             | 13 |
| 2.4  | 2次元カラー画像及び2次元エッジ                  | 14 |
| 2.5  | 3次元リフレクタンス画像及び3次元エッジ              | 14 |
| 2.6  | 2次元カラーエッジと3次元エッジの誤差               | 15 |
| 2.7  | 3次元幾何モデルへのテクスチャ貼り付け結果：鎌倉大仏        | 15 |
| 2.8  | システムに使用した機器                       | 17 |
| 2.9  | システムの構成                           | 19 |
| 2.10 | キャリブレーション物体                       | 20 |
| 2.11 | キャリブレーションフロー                      | 21 |
| 2.12 | レンズ歪み測定用パターン                      | 22 |
| 2.13 | レンズ歪みの影響：35mm単焦点レンズ，撮影距離3m        | 23 |
| 2.14 | レンズ歪みの影響：28mm単焦点レンズ，撮影距離2.5m      | 24 |
| 2.15 | レンズ歪みの影響：35mm単焦点レンズ，撮影距離3m        | 25 |
| 2.16 | 1スキャンで得られるデータ                     | 25 |
| 2.17 | 広目天像の3次元幾何モデル                     | 26 |
| 2.18 | テクスチャ付3次元幾何モデル                    | 27 |
| 2.19 | さまざまな視点からの見え                      | 28 |
| 2.20 | 広目天像の断面形状                         | 29 |
| 2.21 | 光源環境の変化のシミュレーション 日の出，日中，日没(左から右へ) | 30 |
| 2.22 | 光源位置変化による広目天像の表情の変化               | 30 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.1  | 再構成されたテクスチャ   | 38 |
| 3.2  | 色調補正結果  | 41 |
| 3.3  | 逐次色調補正結果  | 42 |
| 3.4  | 色調補正結果  | 43 |
| 3.5  | 光源環境の補間   | 44 |
| 3.6  | 重なり領域での画素のヒストグラム差分  | 45 |
| 3.7  | 擬似 albedo 推定の概要   | 48 |
| 3.8  | クロマティシティ-T マップ推定の概要   | 50 |
| 3.9  | 画像クロマティシティ画像および擬似 albedo 画像の比較：入力<br>画像(上)，画像クロマティシティ(左下)，擬似 albedo 画像(右下)          | 51 |
| 3.10 | 手法の限界   | 53 |
| 3.11 | 仮定の妥当性：入力画像(左)，推定された擬似 albedo   | 54 |
| 3.12 | 仮定の妥当性：入力画像(左)，推定された擬似 albedo   | 55 |
| 3.13 | 仮定の妥当性：入力画像(左)，推定された擬似 albedo   | 56 |
| 3.14 | 入力画像  | 57 |
| 3.15 | 光源方向推定結果．法線方向推定に使用した近傍点の数 30 の場<br>合．左：画像強度 vs. $\cos\theta$ ，右：画像強度 vs. $\theta$   | 58 |
| 3.16 | 光源方向推定結果．法線方向推定に使用した近傍点の数 300 の<br>場合．左：画像強度 vs. $\cos\theta$ ，右：画像強度 vs. $\theta$  | 59 |
| 3.17 | カメラ感度が線形で無い場合の画像強度と $\cos\theta$ の関係  | 61 |
| 3.18 | カメラの感度  | 62 |
| 3.19 | HDRI により推定されたカメラの感度   | 62 |
| 3.20 | 入力画像及び 3 次元幾何モデル  | 63 |
| 3.21 | (a) 入力画像，(b)3 次元幾何モデル，(c) 入力画像と 3 次元幾何<br>モデルの重ね合わせ                                 | 64 |
| 3.22 | $\cos\theta$ と画像の値との関係  | 65 |
| 3.23 | 推定されたクロマティシティ-T マップ   | 66 |
| 3.24 | 推定された擬似 albedo  | 67 |
| 3.25 | 画像 1 と画像 2 から推定された擬似 albedo の差分ヒストグラム：<br>(a)red チャンネル，(b)green チャンネル，(c)blue チャンネル | 67 |
| 3.26 | 統合擬似 albedo   | 68 |
| 4.1  | 合成画像と実画像との比較  | 76 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.2  | 点光源による光源環境の近似  | 78  |
| 4.3  | 基底画像の例   | 79  |
| 4.4  | 光源球に基づく色調補正の概要   | 80  |
| 4.5  | 基底画像の特異値   | 86  |
| 4.6  | 基底画像の特異値累積寄与率  | 87  |
| 4.7  | Inverse lighting におけるノイズの影響  | 90  |
| 4.8  | 光源球を用いた色調補正手法  | 91  |
| 4.9  | 光源球を用いた色調補正手法におけるノイズの影響  | 92  |
| 4.10 | 光源球を用いた色調補正手法 (入力画像に標準偏差 2.6 のガウシアンノイズを付加) における補正済み画像の差分ヒストグラム   | 93  |
| 4.11 | 光源球を用いた色調補正手法におけるノイズの影響  | 94  |
| 4.12 | CG 画像への適用結果  | 95  |
| 4.13 | 色調補正前の画像を貼り付けた結果   | 97  |
| 4.14 | 推定された擬似 albedo: (a) 画像 1, (b) 画像 1 及び画像 2, (c) 画像 2  | 98  |
| 4.15 | 画像 1 及び画像 2 から推定された擬似 albedo の差分の絶対値   | 99  |
| 4.16 | 画像 1 と画像 2 の差分ヒストグラム: (a) 色調補正前 red バンド, (b) 同 green バンド, (c) 同 blue バンド, (d) 色調補正後 red バンド, (e) 同 green バンド, (f) 同 blue バンド | 100 |

# 表 目 次

|   |    |
|---|----|
| 2.1 システムに使用した機器の仕様 . . . . .              | 17 |
| 2.2 レンズ歪み測定結果 . . . . .                   | 22 |
| 3.1 誤差推定条件 . . . . .                      | 53 |
| 3.2 誤差推定条件 . . . . .                      | 57 |
| 4.1 Inverse Lighting との比較 . . . . .       | 84 |
| 4.2 Inverse Lighting におけるノイズの影響 . . . . . | 88 |

# 第1章 はじめに

## 1.1 背景

仮想現実感システムは、仮想モール、電子博物館、ゲーム等さまざまな分野での応用が期待されており、近年さまざまな取り組みがなされている。特に、仮想現実感モデルの効率的生成手法に関しては、精力的に研究が行われている。現在、仮想現実感モデルの多くは、オペレータにより手動で作成されているため、時間、コスト等の観点からして、自動化が強く望まれている。そこで、現実世界を計測することにより、仮想現実感モデリングを行う手法の開発が行われてきた。

仮想現実感モデリングは、大きく以下の3つの要素に分離することが可能である。

- 幾何モデリング
- 光学モデリング
- 環境モデリング

幾何モデリングに関しては、スキャニング、位置合わせ、統合の3段階からなる手法 [1] が開発されている。また、光学モデリングに関しては、実物体の見えるをデジタルカメラ等のカラーイメージセンサで撮影し、距離センサ等で計測された3次元幾何モデルに貼り付けるテクスチャマッピングの手法が研究され

ている。環境モデルリングに関しては、光源分布を推定し、実環境に仮想物体を違和感なく配置する手法 [2] が開発されている。

テクスチャを3次元幾何モデルに貼り付けるテクスチャマッピングの手法は、仮想現実感モデリングの有効な手法の一つであり、コンピュータグラフィックスの分野でさまざまな研究が行われてきた [3, 4, 5]。このテクスチャマッピングの手法を現実の物体に適用し、距離センサで計測された3次元幾何モデルにデジタルカメラで撮影された2次元カラー画像を貼り付ける事により、現実世界の物体の仮想現実感モデルを生成することが可能であり、このような手法を3次元幾何モデルのテクスチャリングと呼ぶ [6]。3次元幾何モデルのテクスチャリングには、大きく以下の二つの側面がある。

- 幾何学的側面
- 光学的側面

幾何学的側面とは、テクスチャ撮影時のカラーイメージセンサと幾何モデル計測時の距離センサの相対位置関係を決定することである。幾何学的側面に関する研究としては、オペレータが3次元幾何モデルと2次元画像の対応を手動で与える方法 [7, 8, 9] などが提案されている。一方で、自動的に3次元幾何モデルと2次元画像を合わせる手法としては、倉爪ら [10, 11] によるレーザ距離センサのリフレクタンス値を用いるものがある。この手法では、レーザ距離センサを用いて3次元形状の計測を行った時に得られる、リフレクタンス値のエッジと、テクスチャ上でのエッジを対応付け、その誤差が最小となるようにカメラパラメータを推定している。また、Neugebauerら [6] により、3次元形状のアウトラインと画像のエッジの対応付けを行った後、画像の強度を元に複数の画像の位置あわせを行う手法も提案されている。幾何学的問題を解くことにより、デジタルカメラで撮影したカラー画像を3次元幾何モデルの正しい位置に貼り付けることが可能であり、各カラー画像撮影時の光源環境および物体位置が固定されていれば、カラー画像間のつなぎ目のない仮想現実感モデルを得ることが出来る。しかしながら、画像撮影ごとに、光源環境が変化したり、物体を動かした場合には、幾何学的側面を考慮するだけでは不十分であり、光学的

側面を考慮する必要がある。

光学的側面とは、テクスチャ間での色の整合性を保ちつつ、テクスチャを3次元幾何モデルに貼り付ける問題である。観測される画像は、光源、物体の光学的、幾何的性質の影響を受けるため、光源状況が異なる複数の画像を用いて、単純にテクスチャリングを行うと、テクスチャのつなぎ目に色の不連続が生じてしまうことになる。これらの影響を除去するために、得られた複数枚の画像間の色調補正を行う必要がある。光学的問題に対する手法は、大きく平均に基づく手法と physics-based の手法に分けられる。平均に基づく手法は、画像間の重なり合う領域において、対応画素間で平均を取る手法であり、簡便に行うことが出来る。複数枚のテクスチャ間で、サンプリング密度やはずれ値除去などを考慮して、重み付平均を取るもの [6] や、 $\alpha$  チャンネルによるブレンディング [12] を行うものなどがある。しかしながら、光源が移動した画像における色調補正は困難である。一方、physics-based の手法は、光源環境が変化しても物体の真の色は不変であることを用いて、色調補正を行う手法である。なんらかの形で光源環境を推定する必要があるが、光源が移動する場合においても適用可能である。Physics-based の手法として、Beauchesneら [13] により、重なり合うテクスチャのリライティングを行う事により複数枚のテクスチャの光学的整合性をとる手法が提案されている。この手法では光源環境の変化は考慮されているが、すべての点において法線方向を正しく推定する必要がある、3次元幾何モデルを非常に高精度に計測する必要がある。また、Wenら [14] により、球面調和級数基底を用いて、Radiance environment map [15] を表現し relighting を行う手法が提案されている。この手法では、凸なランバertian物体の場合は、陰影情報が低次の球面調和級数基底で展開可能であることに基づいており、物体が自分自身に落とす影 (セルフシャドウ) を含まない場合には非常に有効な手法であると考えられるが、球面調和級数基底を用いているので、セルフシャドウの取り扱いが困難である。

## 1.2 目的

本論文では、実物体を計測することにより自動的に仮想現実感モデルを生成する手法を開発することを目的とする。1.1章に述べたとおり、テクスチャリングは仮想現実感モデルに有効な手法であるので、基本的な枠組みとしては、デジタルカメラで撮影したカラー画像を距離センサで計測した3次元幾何モデルに貼り付けるテクスチャリングを用いる事とする。テクスチャリングの幾何学的側面に間しては、カラー画像撮影、3次元幾何モデル計測を統合して行い、得られたカラー画像と3次元幾何モデルのカメラパラメータを推定するシステムを開発することを目的とする。自動的にカメラパラメータを推定する手法はいくつか存在するが、確実性を高めるためにカメラキャリブレーションの手法を用いてカメラパラメータ推定を行う事とする。ただ、本システムでは、一連の計測ではデジタルカメラと距離センサの関係は固定されており、最小限のカメラキャリブレーション(理論的には1回)で良い。一方、光学的側面に関しては、各カラー画像撮影時の光源環境が異なる異なる入力画像が与えられた場合に、各カラー画像の補正を行い、3次元幾何モデルに貼り付けたときに、画像間のつなぎ目をなくす手法を開発することを目的とする。本手法では、各カラー画像撮影の光源環境を考慮して、擬似 albedo の推定を行い、推定された各擬似 albedo 画像を、3次元幾何モデルに貼り付ける事により、画像間のつなぎ目のない仮想現実感モデルを生成するという方針をとっている。また、1.1章に述べたとおり、このような色調補正の手法はいくつか提案されているが、法線方向を高精度に計測する必要があることや、画像内にセルフシャドウが含まれている場合に適用が困難である等の問題があることから、それぞれの問題を解決するために、クロマティシティに基づく手法、光源球に基づく手法を開発することとする。

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。

|     |                    |
|-----|--------------------|
| 第1章 | はじめに               |
| 第2章 | テクスチャリングシステム       |
| 第3章 | クロマティシティに基づく色調補正手法 |
| 第4章 | 光源球に基づく色調補正手法      |
| 第5章 | 結論                 |

図 1.1 に各章の関係を示す。また、以下に本論文の流れの概略を示す。第2章では、テクスチャリングシステムについて述べる。本システムはテクスチャリングの幾何学的問題を解くシステムであり、カラー画像と3次元幾何モデルを統合的に計測し、両者間の相対的な位置関係(カメラパラメータ)を決定する。次に、テクスチャリングの光学的問題に関しては、色調補正の手法を行う2つの手法を提案する。いずれの手法も物体表面の albedo が光源環境に依存しないことを用いて、擬似 albedo 画像を推定し、推定された画像を3次元幾何モデルに貼り付けることにより、画像間のつなぎ目のない仮想現実感モデルを生成している。第3章で提案するクロマティシティに基づく手法では、3次元幾何モデルの測定精度が高くない場合においても有効に働く手法である。クロマティシティに基づく手法は、容易に適用することが出来るという点ですぐれているが、基本的には一つの点光源下の画像に対してのみ適用可能である点や、画像内にセルフシャドウが存在する場合に適用困難であることなどから、これらの問題を解決する手法として、第4章で、光源球に基づく手法を提案した。最後に第5章で結論を述べる。第2章のテクスチャリングシステムを用いて、カラー画像及び3次元幾何モデルを取得し、両者間のカメラパラメータを推定後、第3章、第4章の色調補正手法を適用することにより、幾何学的、光学的に整合性のとれた仮想現実感モデルを生成することが可能である。

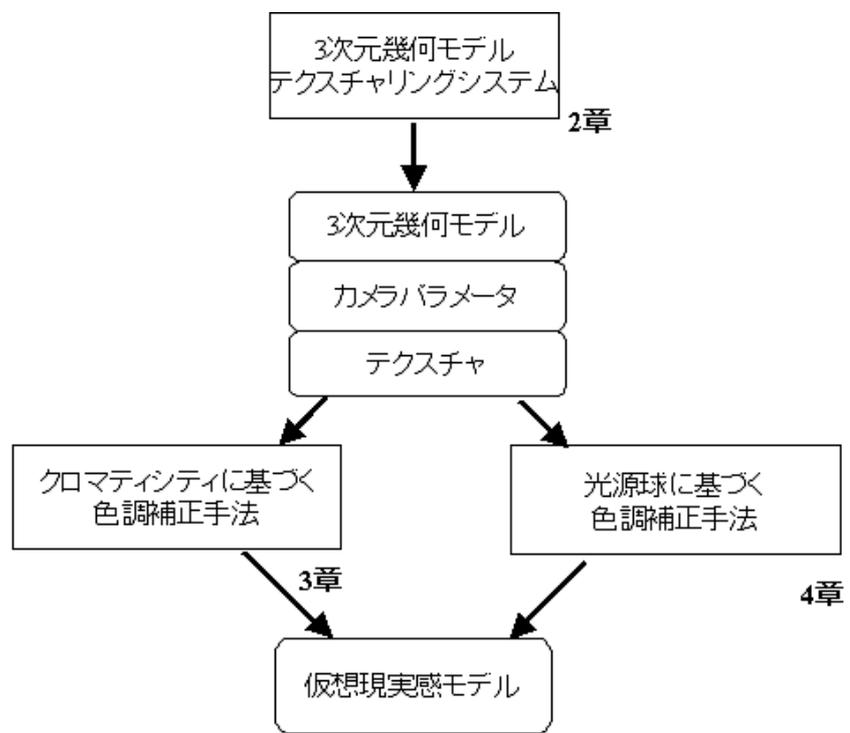


図 1.1: 本論文の構成

## 参考文献

- [1] 池内克史, 倉爪亮, 西野恒, 佐川立昌, 大石岳史, 高瀬裕, “The great buddha project –大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化–”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.7, no.1, pp.103-113, 2002.
- [2] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, “Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol.5, pp.1-12, 1999.
- [3] E. Praum, A. Finkelstein, and H. Hoppe, “Lapped textures,” in Proc. SIGGRAPH, pp.465-470, 2000.
- [4] P.V. Sander, J. Snyder, S.J. Gortler, and H. Hoppe, “Texture mapping progressive meshes,” in Proc. SIGGRAPH, pp.355-360, 2001.
- [5] B. Levy, “Constrained texture mapping for polygonal meshes,” in Proc. SIGGRAPH, pp.417-424, 2001.
- [6] P.J. Neugebauer, and K. Klein, “Texturing 3D models of real world objects from multiple unregistered photographic views,” in Proc. EUROGRAPHICS’99, 1999.
- [7] P. Hanrahan, and P.E. Haeberli, “Direct wysiwyg painting and texture on 3D shape,” in Proc. SIGGRAPH90, pp.215-223, 1990.
- [8] H.K. Pedersen, “Decorating implicit surfaces,” in Proc. SIGGRAPH95, pp.291-300, 1995.

- [9] P. Litwinowicz, and G. Miller, “Efficient technique for interactive texture placement,” in Proc. SIGGRAPH94, pp.119-122, 1994.
- [10] R. Kurazume, M.D. Wheeler, and K. Ikeuchi, “Mapping textures on 3D geometric model using reflectance image,” in Proc. Data Fusion Workshop in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2001.
- [11] R. Kurazume, K. Nishino, Z. Zhang, and K. Ikeuchi, “Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute,” in Proc. Fifth Asian Conference on Computer Vision (ACCV), vol.1, pp.99-106, 2002.
- [12] H. Lensch, W. Heidrich, and H.P. Seidel, “Automated texture registration and stitching for real world models,” in Proc. Pacific Graphics’00, pp.317-326, 2000.
- [13] E. Beaugues, and S. Roy, “Automatic relighting of overlapping textures of a 3D model,” in Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.166-173, 2003.
- [14] Z. Wen, Z. Liu, and T. Huang, “Face relighting with radiance environment maps,” in Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), vol.2, pp.158-165, 2003.
- [15] B. Cabral, M. Olano, and P. Nemeč, “Reflection space image based rendering,” in Proc. SIGGRAPH, pp.165-170.

## 第2章 テクスチャリングシステム

### 2.1 はじめに

テクスチャを3次元幾何モデルに貼り付けるテクスチャマッピングの手法は、仮想現実感モデリングの有効な手法の一つであり、コンピュータグラフィックスの分野でさまざまな研究が行われてきた [1, 2, 3]. このテクスチャマッピングの手法を現実の物体に適用し、距離センサで計測された3次元幾何モデルにデジタルカメラで撮影された2次元カラー画像を貼り付ける事により、現実世界の物体の仮想現実感モデルを生成することが可能であり、このような手法を3次元幾何モデルのテクスチャリングと呼ぶ [4]. このような仮想現実感モデリングの手法を用いて、文化財のデジタル化を行っているものとして、Levoyらによる Digital Michelangelo Project がある [5]. 現実世界を観測することにより得られたカラー画像を3次元幾何モデルに貼り付けるためには、カラー画像撮影時のデジタルカメラの位置と3次元形状計測時の距離センサとの相対的な位置関係を決定する必要がある。これが1.1章で述べたテクスチャリングの幾何学的問題である。この問題に関する研究として、オペレータが3次元幾何モデルと2次元画像の対応関係を手動で与える手法が提案されている [6, 7, 8]. 一方で、自動的にカメラパラメータを推定する手法に関する研究も行われている。カメラパラメータを推定することは、基本的には2次元画像、3次元距離画像それぞれから、特徴を抽出し、その特徴を矛盾なく一致させることであり、どのような特徴を利用するかにより分類することが可能である。2次元画像と3次元幾何モデルの点对応に基づく手法として、検出可能な特徴的な点により2次元と3次元の点对応を取る手法があり、人工的にマーカーを配置し検

出されたマーカーにより対応を取るもの [9] や，T-junction と呼ばれる特徴を利用するもの [10] などがある．

直接 2 次元と 3 次元の対応点对を利用する以外には 2 次元の属性を利用するものが挙げられる．2 次元上での属性を使用するものとしては，Silhouette を使用するもの [11] や，等高線を使用するもの [12] や，distance map と呼ばれる画像上での特徴的な距離を使用するもの [4] などがある．

3 次元上での特徴に基づく手法としては，レーザー距離センサから得られるリフレクタンス値を利用するもの [13, 14] や，人口構造物等は，直線的なエッジを持っているものが多いことを利用し，3 次元モデルを平面で近似し，それらの交線エッジを利用するもの [15] などが挙げられる．

以下では，この中から，distance map を用いた手法とリフレクタンス値を用いた手法を取り上げる．Neugebauer ら [4] により提案された手法では，視点の異なる複数枚の画像を，1．点对応，2．輪郭線対応，3．画像属性（たとえば，画像強度）対応からなる 3 つの指標を考慮して，各画像のカメラパラメータを推定する．なお，本手法では，外部パラメータとして，回転，並進の計 6 つと，内部パラメータとして u 軸方向，v 軸方向の焦点距離の計 2 つを考慮しており，内部パラメータは全ての画像で，同じであるとしている．以下に手法の詳細を述べる．まず，パラメータの初期値を推定するために，各画像と 3 次元幾何モデルの対応点を手動で取得し，この対応関係から得られるパラメータを初期値とする．次に先に述べた 3 つの指標を元にパラメータを推定する．1 番目の点对応の目的関数としては，式 (2.1) を用いる．

$$\epsilon^2(\theta) = \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{m_i} \rho(\pi(\eta_i, \phi_i, p_{il}) - q_{il}) \quad (2.1)$$

ここで， $\theta = (\eta_1, \dots, \eta_n, \phi)$  は，各画像の外部パラメータ及び，内部パラメータであり， $(p_{il}, q_{il}) \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^2, i \in 1, \dots, n, l \in 1, \dots, m_i$  はそれぞれ，対応点，画像の指標，対応点の指標である．2 番目の輪郭線の目的関数としては，図 2.1 に示されている二つの関数の差を用いる．ここで， $d_i^{model} : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  は，画像上のある点から 3 次元幾何モデルを画像上に射影したものの輪郭線への最小距離であり， $d_i^{image} : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  は，画像上のある点から画像の輪郭線への最小距

離である．ここで，輪郭線は，手動もしくは半自動によって，計算されるものとする．これら2つの関数の差がパラメータの性質を決定し，両方の輪郭線が一

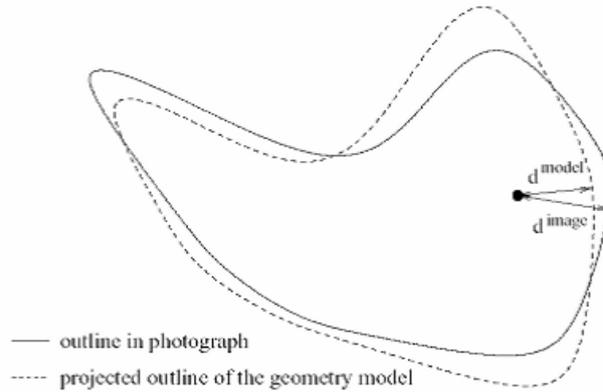


図 2.1: 物体の輪郭線及び投影された3次元モデルの輪郭線 [4]

致すれば，この値は最小値をとる．目的関数は，式(2.2)で表される．

$$\epsilon^2(\theta) = \sum_{i,p \in M_i} \rho \left( \frac{d_i^{image}(\pi(\eta_i, \phi, p)) - d_i^{model}(\pi(\eta_j, \phi, p))}{\sum_i |M_i|} \right) \quad (2.2)$$

3番目の指標は，画像間での画素の属性（画像強度など）の類似性である． $i$ 番目の画像の属性を $g_i$ とすると，2枚の画像で見えている画素属性の差分を取ることにより，式(2.2)の目的関数が得られる．

$$\epsilon^2(\theta) = \sum_{i < j, p \in T, w_i(p)w_j(p)=1} \rho \left( \frac{g_i(\pi(\eta_i, \phi, p)) - g_j(\pi(\eta_j, \phi, p))}{\sum_{i < j, p \in T} w_i(p)w_j(p)} \right) \quad (2.3)$$

ここで， $w_i(p)$ はvisibility関数であり，画像に $p$ が写っていれば，1をとり，写っていなければ0を取る関数である．属性として画像強度をそのまま使用すると，ノイズの影響を受けやすく，高精度の初期値を必要とする．このため，本手法では，生の画像強度を利用するのではなく，各画像に対してsobelオペレータでエッジを抽出し，エッジからの距離を表すdistance mapを作成し，これを画像属性として使用している．ただし，通常の2次元のdistance mapと異

なり，本手法では，あらかじめ計算された z buffer を用いて 3次元距離を使用している．図 2.2 に生の画像強度を使用した場合（上）及び提案した distance map を使用した場合（下）での，3つの回転方向に対して，パラメータを変化させた場合の RMS 誤差の振る舞いを示す．Distance map を用いた場合の方が，初期値の依存性が小さいことが理解できる．これまで述べた 3つの目的関数を用いてパラメータを推定することが可能である．本手法では，まず点対応の目的関数を用いて，パラメータを推定し，次に，輪郭線対応及び画像属性類似度を用いた目的関数によりパラメータ推定を行っている．本手法を用いてテクスチャを 3次元幾何モデルに貼り付けた結果を図 2.3 に示す．なお，本手法では，複数枚のテクスチャでの画素の平均化の手法も提案しており，3章で述べる．

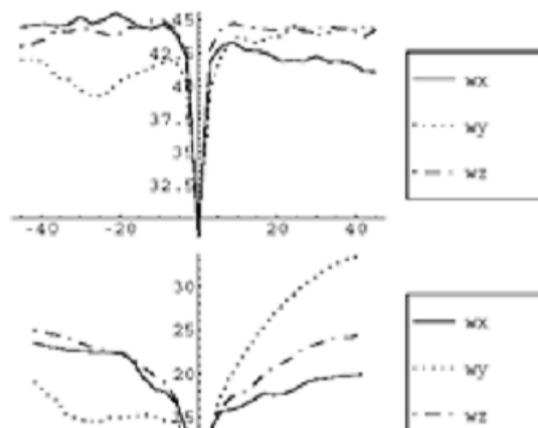


図 2.2: RMS 誤差 [4]

次に 3次元幾何モデル上のリフレクタンス値を用いた手法 [13, 14] について述べる．レーザレンジセンサを用いて 3次元計測を行うと，3次元座標だけではなく，その点におけるリフレクタンス値も得ることが出来る．このリフレクタンス画像はカラー画像と非常に類似性が高いため，3次元上でのリフレクタンス値と 2次元でのカラー画像を対応付けることによりカメラパラメータを推定することが可能である．本手法では，リフレクタンス画像及びカラー画像からエッジ画像を生成し（図 2.4, 2.5），そのエッジ点を一致させることにより両



図 2.3: 3次元幾何モデルへテクスチャの貼り付け結果 [4]

センサ間の相対的位置関係を推定した。図 2.6 に示すようにまず、3次元エッジ点  $P$  を 2次元画像平面へ投影し、点  $u$  を求める。次にその点  $u$  に最も近い画像平面上の 2次元エッジ点  $y$  を 3次元エッジ点の対応点として選択する。カメラ中心と 2次元カラーエッジ点  $y$  を結ぶ直線を 3次元エッジ方向に延長し、3次元エッジ点からこの線へおろした垂線  $PH$  の長さを 3次元誤差とし、この誤差を最小化することにより、カメラパラメータを推定した。なお、最適化を行う際には、 $M$ -推定を用いてロバストに推定を行っている。また、カラー画像を 3次元幾何モデルに貼り付けた結果を図 2.7 に示す。

## 第2章 テクスチャリングシステム

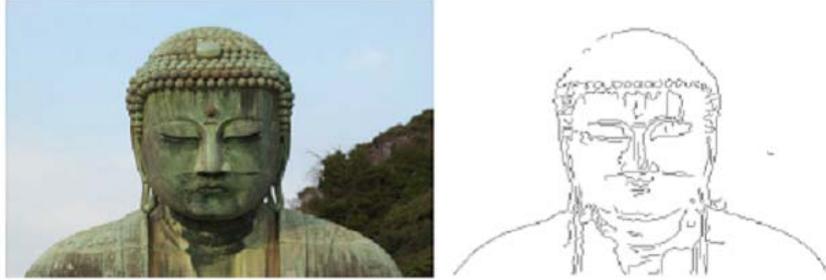


図 2.4: 2次元カラー画像及び2次元エッジ [13]

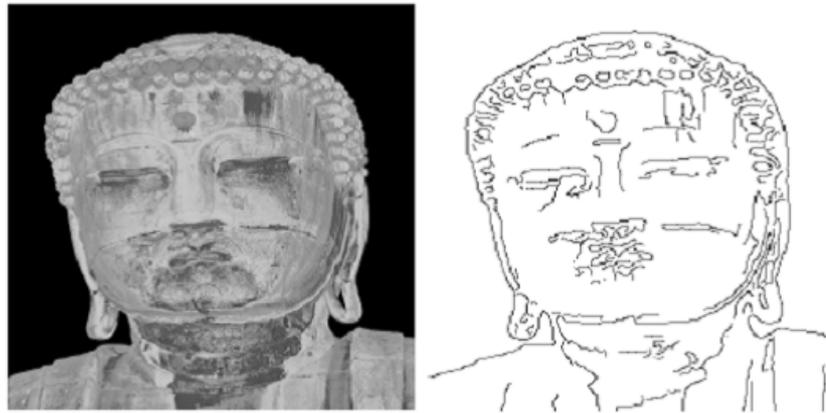


図 2.5: 3次元リフレクタンス画像及び3次元エッジ [13]

## 第2章 テクスチャリングシステム

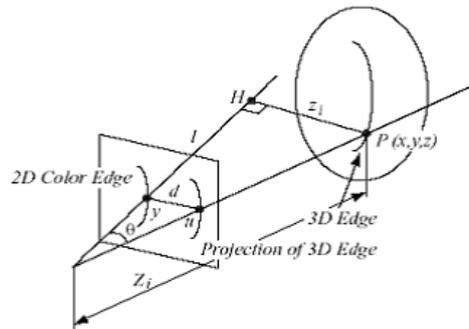


図 2.6: 2次元カラーエッジと3次元エッジの誤差 [13]



図 2.7: 3次元幾何モデルへのテクスチャ貼り付け結果：鎌倉大仏 [13]

## 2.2 提案システム

本章では、デジタルカメラで撮影したカラー画像を距離センサで計測した3次元幾何モデルに貼り付けるテクスチャリングの手法を用いることにより、仮想現実感モデルを生成するシステムについて提案する。2.1章で述べたとおり、自由な視点から撮影したカラー画像をカラー画像、3次元幾何モデルのさまざまな特徴を基に両者の相対的な位置関係を決定する手法が存在するが、デジタルカメラと距離センサ間のキャリブレーションを行った状態で、計測を行う方法が最も確実であると考えられるので、本システムでは、キャリブレーションを行うこととした。また、距離センサの上にデジタルカメラを固定することにより、一連の計測では、一度のキャリブレーションを行うだけで十分である。本システムは、大きく、データ取得とカメラキャリブレーションの2つのプロセスから構成されており、以下にそれぞれについて述べる。

## 2.3 データ取得

まず、対象物体の3次元形状を距離センサーで取得する。このとき、距離センサから死角となる部分や、距離センサの測定範囲の問題があるため、複数の場所から計測を行い、複数の部分距離画像を得る。その後アライメント、マーキングからなる一連の手法 [16] により統合された3次元幾何モデルを得ることが出来る。本システムでは、MinoltaのVIVID900[17]を用いて、3次元形状を計測した。VIVID900の精度は1mm以下であり、対象物体の3次元形状を高精度に計測することが可能である。一方、光学情報は、デジタルカメラを用いてテクスチャを計測する。本システムでは、NikonのD1x[18]を使用した。VIVIDは3次元形状だけでなく、カラー画像を得ることが出来るが、高品質の画像をテクスチャとして使用するためデジタルカメラを用いて、別途、テクスチャの計測を行った。システムに使用した機器及び、その主な仕様をそれぞれ、図2.8、表2.1に示す。通常、対象物体の計測を行うためには、センサからのオクルージョン等が存在するため、対象物体全体を計測するためにはセンサ

## 第2章 テクスチャリングシステム

を移動させて複数回のスキャンを行う必要があが、本システムは、カラー画像計測のデジタルカメラと3次元形状計測のための距離センサが一体となったシステムであり、複数の場所から、同時にカラー画像と距離画像の計測を行う。



図 2.8: システムに使用した機器

表 2.1: システムに使用した機器の仕様

|          |      |           |
|----------|------|-----------|
| Vivid910 | 測定範囲 | 0.6-2.5m  |
|          | 精度   | 0.0008m   |
|          | 解像度  | 640x480   |
| D1x      | 解像度  | 3008x1960 |

## 2.4 キャリブレーション

デジタルカメラで計測した画像を距離センサで計測した3次元幾何モデルの上に正しく貼り付けるためには、計測時の距離センサとデジタルカメラの相対

## 第2章 テクスチャリングシステム

的な位置，方向を知ることが必要である．距離センサとデジタルカメラの相対的な関係は，3次元幾何モデル上の座標 ( $\tilde{M}$ ) と，2次元画像上での座標 ( $\tilde{m}$ ) とし，ピンホールカメラモデルを用いると，以下のとおり表すことが出来る．

$$\tilde{m} = A [ R \ t ] \tilde{M} \quad (2.4)$$

ここで， $A, R, t$  はそれぞれ，カメラの内部パラメータ，回転行列，並進ベクトルを表している．これらのパラメータを推定することにより，3次元幾何モデル上に，2次元画像を正しく貼り付けることが出来る．先に述べたとおり，2次元カラー画像と3次元幾何モデルからカメラパラメータを自動的に推定する手法が存在しているが，あらかじめキャリブレーションを行い，カメラパラメータを推定する方法が最も確実であると考えられるので，本システムではキャリブレーションを用いたカメラパラメータ推定を行うことにした．また，図2.9に示すとおり，距離センサ上にデジタルカメラを固定し，テクスチャ計測と3次元形状の計測を同時に行い，一連の計測では同一のカメラパラメータを利用することとし，複数の場所から計測を行った場合でも一度キャリブレーションを行えば十分である．本キャリブレーションでは，図2.10に示すキャリブレーション物体を用いてカメラパラメータを推定した．キャリブレーション物体の形状は，立方体であり，各面の周りに，楕円状のマーカを配置しており，各マーカの重心位置を検出し，各重心を結ぶ直線の交点からなる仮想格子点を用いて，高精度のカメラパラメータ推定を行っている．カメラパラメータ推定を行うために，本システムで取得する画像及び距離画像を図2.10(a),(b),(c)に示す．本システムで使用している距離センサでは，距離画像及びカラー画像を取得することが出来，この距離画像とカラー画像はセンサ内でキャリブレーションが行われており，カメラパラメータは既知である．図2.10(a)がデジタルカメラで計測された高解像度のカラー画像であり，図2.10(b),(c)がそれぞれ，距離センサで取得したカラー画像及び，3次元幾何モデルである．先に述べたとおり、距離センサから得られるカラー画像と距離画像は，センサ内でキャリブレーションが行われており，この画像を貼り付けることにより，テクスチャ付の3次元幾何モデルを得ることが出来るが，本システムでは現実感の高い仮想現実感モデル生成を目的としているため，高品質のテクスチャを取得することが可能なデジタルカメラを用いてカラー画像の撮影を行い，3次元幾何モデルのテクスチャリングに使用する．



図 2.9: システムの構成.

以下に、本システムでのカメラパラメータ推定手法を示す．まずはじめに距離センサでこのキャリブレーション物体を計測する (図.2.10(b), (c))．一方で、デジタルカメラでキャリブレーション物体の計測を行う (図.2.10(a))．次にそれぞれの画像を2値化し、キャリブレーション物体の各面の周りにある楕円状のマーカを抽出する．向かい合う辺の楕円状のマーカを直線で結び、その全ての交点を仮想格子点とする (図.2.11(b),(c))．距離センサで得られた距離画像での3次元座標を  $X$ 、カラー画像での2次元座標を  $x'$ 、デジタルカメラで得られた高品質カラー画像での2次元座標を  $x$  とすると、仮想格子点の対応関係から、 $x$  と  $x'$  の関係が決定される (図.2.11(d))．ここで、距離センサ内で両者の関係はキャリブレーション済みであり、カメラパラメータは既知であるので、 $x'$  と  $X$  の関係が求められる (図.2.11(e))．以上のことより、高品質カラー画像の2次元座標 ( $x$ ) と3次元幾何モデルとの関係が求められる (図.2.11(f))．全ての仮想格子点に対して本処理を実施することにより、高品質カラー画像の

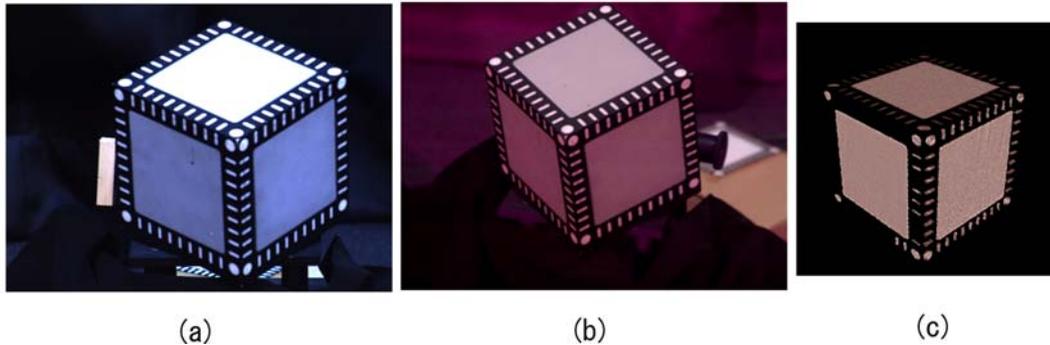


図 2.10: キャリブレーション物体:(a)D1xで撮影したカラー画像, (b)VIVIDにより計測された距離画像, (c)VIVIDにより計測されたカラー画像

2次元座標と対応する3次元幾何モデル上の3次元座標の組が複数個求まる。この組に対して、式(2.4)において最小二乗法を適用することによりカメラパラメータを推定することが可能である。カメラパラメータが推定されると、撮影したカラー画像を3次元幾何モデル上の幾何学的な整合性が取れた位置に貼り付けることができ、3次元幾何モデルのテクスチャリングにおける幾何学的問題は解決されたことになる。

なお、本システムでは、式(2.4)のピンホールカメラモデルを用いているが、レンズには、ピンホールカメラモデルでは表現できない、レンズ歪みがあることが知られており、レンズ歪みの与える影響に関して、考慮する必要がある[19]。レンズ歪みの影響について検証するため焦点距離の異なるいくつかの単焦点レンズを用いてレンズ歪みの測定を行った。測定には、図2.12に示すような白黒の格子を用い、レンズ歪みの推定には、camera calibration toolbox[20]を用いた。レンズ歪みの測定結果を表2.2に示す。また、それぞれのレンズ歪みの分布を図2.13, 2.14, 2.15に示す。いずれの場合も、画像サイズ(3000x1960ピクセル)に対して、せいぜい歪みは20ピクセル程度であり、相対誤差約1%であることが確認できた。また、画像の中心付近では、レンズ歪みが非常に小さいことから、本システムでは、特にレンズ歪みの補正は行わず、ピンホールカメラモデルを用いたカメラパラメータ推定を行っている。

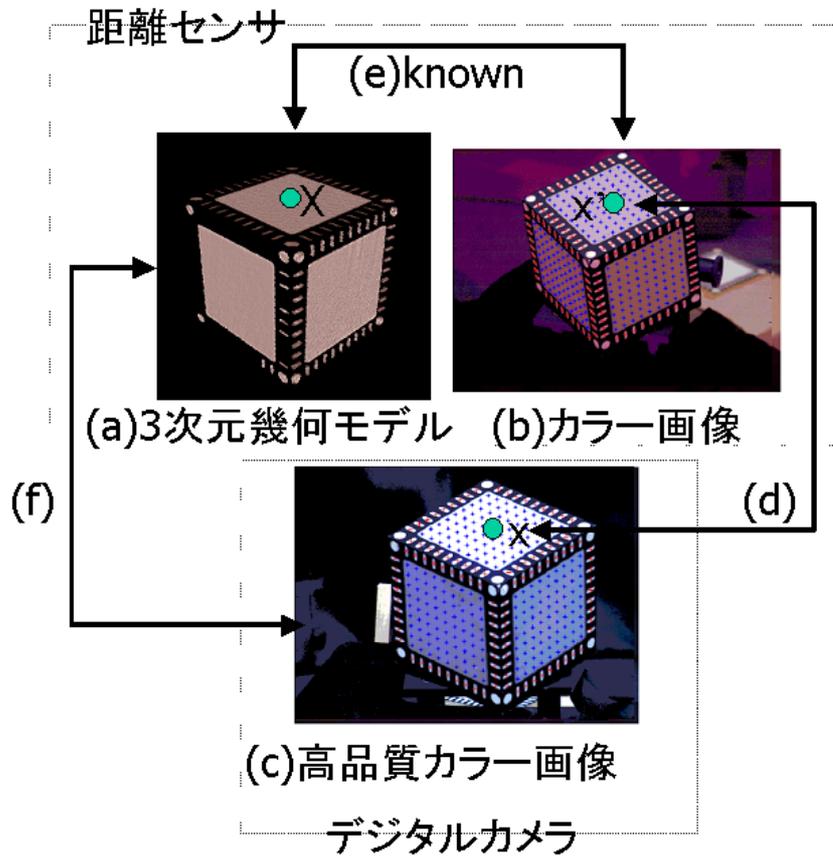


図 2.11: キャリブレーションフロー

## 2.5 実験

本システムを用いて東大寺の広目天像の仮想現実感モデルを生成した。広目天像は、東大寺戒壇院に安置されている四天王の一つであり、天平時代に出来上がったとされている。高さが160cm程度の塑像であり、国宝に認定されている。

まず、はじめに、2.4章に述べた手法により、カメラパラメータを決定し、デ

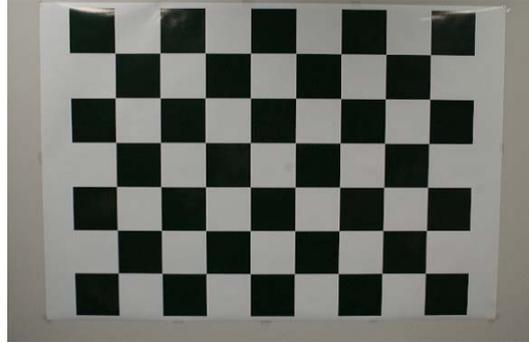


図 2.12: レンズ歪み測定用パターン

表 2.2: レンズ歪み測定結果

| レンズ  | 撮影距離 (m) | 平均誤差 (ピクセル) | 最大誤差 (ピクセル) |
|------|----------|-------------|-------------|
| 35mm | 3        | 0.6         | 25          |
| 28mm | 2.5      | 0.5         | 20          |
| 24mm | 2        | 0.5         | 25          |

デジタルカメラと距離センサの相対的な位置関係が決定した状態で、広目天像の計測を行った。一回のスキャンで、図 2.16 に示されているような範囲を計測し、広目天像全体を計測するのに約 60 回のスキャンを行った。また、部分距離画像を一連のアライメント、マージンの手法により、統合 3 次元幾何モデルを生成したものを図 2.17 に示す。次に、あらかじめキャリブレーションにより推定されたカメラパラメータを用いて、デジタルカメラで撮影したカラー画像を距離センサで計測した 3 次元幾何モデル上に貼り付け、テクスチャ付の 3 次元幾何モデルを生成した結果を図 2.18 に示す。

一度、本システムを用いて仮想現実感モデルを生成すると、さまざまな応用に使用することが可能である。以下に、得られた仮想現実感モデルを用いて、視点位置の変更や、光源環境の変更により、広目天像のさまざまな見えが生成できることを示す。実際の物体、特に、貴重な文化財等では、視点位置は大きく制約を受けるのが一般的である。物体の周りに柵が設けられており、物体の

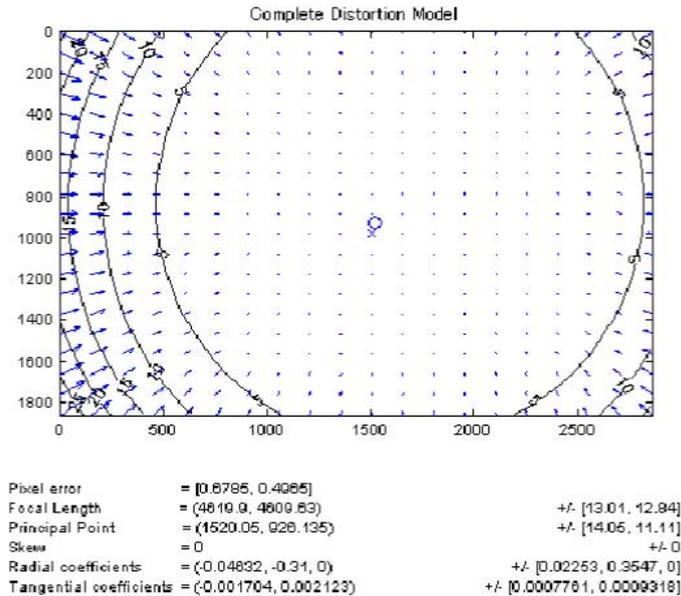


図 2.13: レンズ歪みの影響：35mm 単焦点レンズ，撮影距離 3m

近くに近づけなかったり，物体上方からの様子を見ることが不可能であったりする．しかしながら，生成された仮想現実モデルを用いると，さまざまな方向から物体を見ることが可能である(図 2.19)．次に，広目天像の断面形状計測の様子を示す(図 2.20)．本システムで得られた仮想現実感モデルでは，詳細な 3次元形状を保有しているため，特定の場所での切断面の形状を生成することが可能である．また，このモデルには，テクスチャ情報も含まれているので，特定の模様の部分の断面形状の解析等に使用することが可能である．

また，他の応用例として，光源環境の変化による広目天の見えの変化のシミュレーションを行うことが出来る．広目天像の日中の見えの時間変化をシミュレーションした結果を図 2.21 に示す．これは，屋外に置かれた広目天像が日の出，日中，日没と，どのように見えが変化するかをシミュレーションした結果であり，光源環境の変化により，広目天像の見えが大きく変化していることが見て取れる．また，光源の位置による広目天像の顔の表情の変化に着目

## 第2章 テクスチャリングシステム

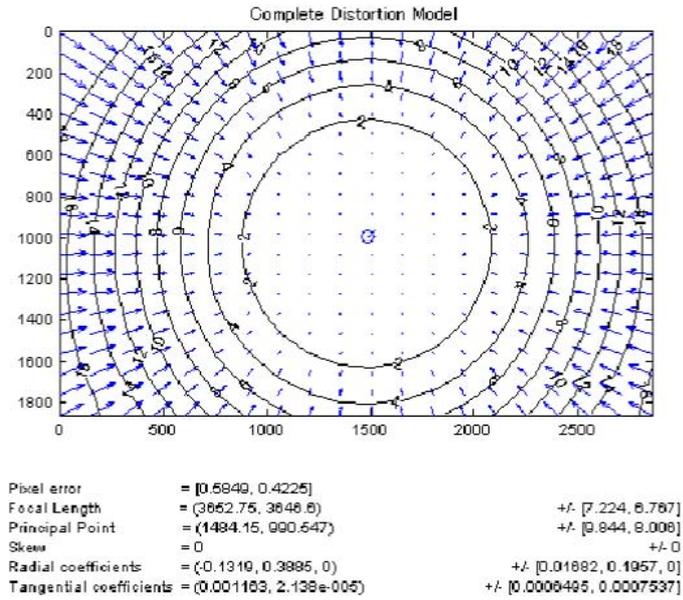


図 2.14: レンズ歪みの影響：28mm 単焦点レンズ，撮影距離 2.5m

したシミュレーション結果を図 2.22 に示す．光源の位置を変化させるだけで，顔の表情が大きく変化することが確認できる．

## 第2章 テクスチャリングシステム

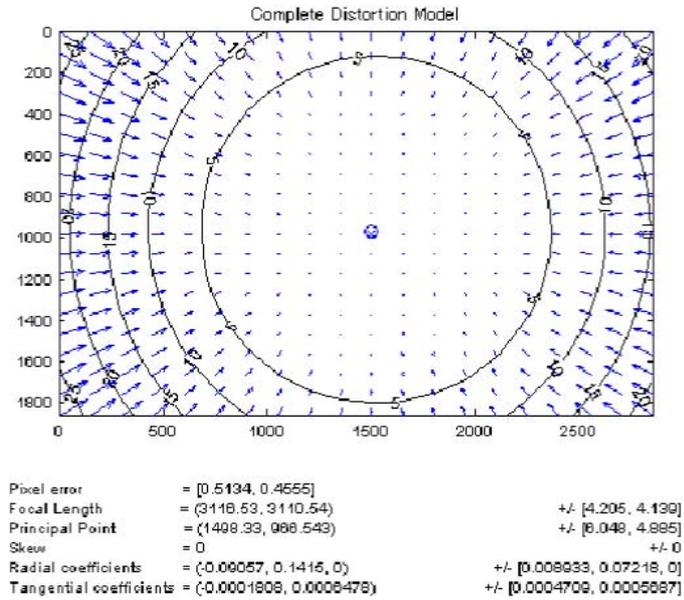


図 2.15: レンズ歪みの影響：35mm 単焦点レンズ，撮影距離 3m



図 2.16: 1 スキャンで得られるデータ



図 2.17: 広目天像の3次元幾何モデル

## 第2章 テクスチャリングシステム



図 2.18: テクスチャ付 3次元幾何モデル



図 2.19: さまざまな視点からの見え

## 第2章 テクスチャリングシステム

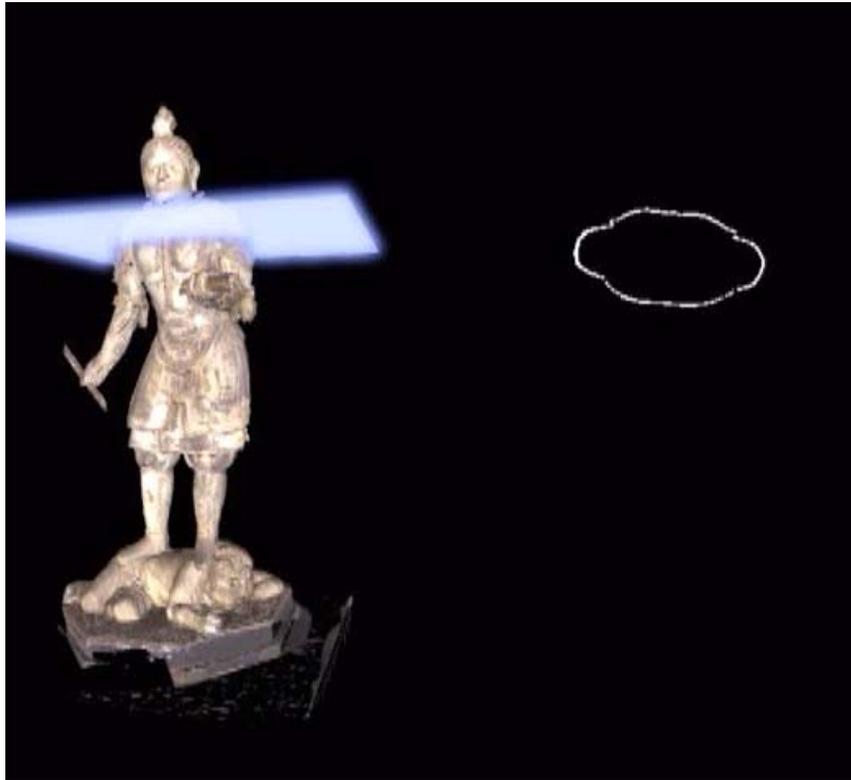


図 2.20: 広目天像の断面形状

## 第2章 テクスチャリングシステム



図 2.21: 光源環境の変化のシミュレーション 日の出, 日中, 日没 (左から右へ)



図 2.22: 光源位置変化による広目天像の表情の変化

## 2.6 まとめ

本章では、実物体を観測することにより得られた2次元画像と3次元幾何モデルを用いて、自動的に仮想現実感モデルを生成する手法を開発した。本システムは、2次元カラー画像を3次元幾何モデルに貼り付けることにより、テクスチャ付の3次元幾何モデルを生成するシステムであり、テクスチャリングにおける幾何学的問題を解決する一つの手法である。既存の手法として、独立に観測された距離画像とカラー画像からそれぞれ特徴を抽出し、その特徴が矛盾なく一致するように最適化を行うことにより、自動的にカメラパラメータを推定する手法が提案されているが、最適化によりカメラパラメータを推定する手法では、初期条件や収束性等の問題が発生する場合がある。このため、本システムでは確実にカメラパラメータを推定するためにキャリブレーション物体を用いてあらかじめカメラパラメータを推定することとした。

本システムでは、距離センサの上にデジタルカメラを固定し、両者の相対的な位置関係を固定することにより、一連の計測に対して、一度だけカメラパラメータを推定すればよい。カメラキャリブレーションに用いるマーカーとしては、実際に画像および距離画像から観測された特徴より抽出された多数の仮想格子点を用いており、高精度のカメラパラメータ推定を行うことが可能である。また、推定されたカメラパラメータを用いることにより、観測されたカラー画像を3次元幾何モデルの幾何学的に整合性の取れた位置に貼り付けることが可能である。なお、本システムで用いた距離センサでは、カラー画像も同時に得ることが出来るが、テクスチャリングに使用する画像に高品質の画像を用いる必要があるため、デジタルカメラを用いて別途、高品質のカラー画像を計測している。

また、本システムを用いて、東大寺の戒壇院にある広目天像の仮想現実感モデルを生成し、本システムの有効性を確認した。広目天像の仮想現実感モデルを用いたいくつかの応用例を示した。

なお、テクスチャリングに関しては、本システムで示した幾何学的問題だけでは、不十分であり、画像撮影時に光源環境が変化する場合では、得られた画

## 第 2 章 テクスチャリングシステム

像の見えが大きく異なってしまい、カラー画像を 3 次元幾何モデル上の幾何学的に正確な位置に貼り付けたとしても、画像間の見えの違いにより、つなぎ目が生じてしまう。このようなテクスチャリングの光学的問題に関して次章以降で扱う。

## 参考文献

- [1] E. Praum, A. Finkelstein, and H. Hoppe, “Lapped textures,” in Proc. SIGGRAPH, pp.465-470, 2000.
- [2] P.V. Sander, J. Snyder, S.J. Gortler, and H. Hoppe, “Texture mapping progressive meshes,” in Proc. SIGGRAPH, pp.355-360, 2001.
- [3] B. Levy, “Constrained texture mapping for polygonal meshes,” in Proc. SIGGRAPH, pp.417-424, 2001.
- [4] P.J. Neugebauer, and K. Klein, “Texturing 3D models of real world objects from multiple unregistered photographic views,” in Proc. EUROGRAPHICS’99, 1999.
- [5] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, and D. Fulk, “The digital michelangelo project: 3D scanning of large statues,” Siggraph 2000, pp.131–144, 2000.
- [6] P. Hanrahan, and P.E. Haeberli, “Direct wysiwyg painting and texture on 3D shape,” in Proc. SIGGRAPH90, pp.215-223, 1990.
- [7] H.K. Pedersen, “Decorating implicit surfaces,” in Proc. SIGGRAPH95, pp.291-300, 1995.
- [8] P. Litwinowicz, and G. Miller, “Efficient technique for interactive texture placement,” in Proc. SIGGRAPH94, pp.119-122, 1994.

- [9] G. Guenter, C. Grimm, D. Wood, H. Malvar, and F. Pighin, "Making faces," in Proc. SIGGRAPH, pp.55-66, 1998.
- [10] D.J. Kriegman, B. Vijayakumar, and J. Ponce, "Constraints for recognizing and locating curved 3d objects from monocular image features," in Proc. ECCV, vol.588 of LNCS, pp.829-833, 1992.
- [11] H. Lensch, W. Heidrich, and H.P. Seidel, "Automated texture registration and stitching for real world models," in Proc. Pacific Graphics'00, pp.317-326, 2000.
- [12] L. Brunie, S. Lavalée, and R. Szelski, "Using force field derived from 3d distance maps for inferring the attitude of a 3d rigid object," in Proc. ECCV, 1992.
- [13] R. Kurazume, M.D. Wheeler, and K. Ikeuchi, "Mapping textures on 3D geometric model using reflectance image," in Proc. Data Fusion Workshop in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2001.
- [14] R. Kurazume, K. Nishino, Z. Zhang, and K. Ikeuchi, "Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute," in Proc. Fifth Asian Conference on Computer Vision (ACCV), vol.1, pp.99-106, 2002.
- [15] I. Stamos, and P. K. Allen, "Integration of range and image sensing for photorealistic 3d modeling," in Proc. the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1435-1440, 2000.
- [16] 池内克史, 倉爪亮, 西野恒, 佐川立昌, 大石岳史, 高瀬裕, "The great buddha project -大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化-", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.7, no.1, pp.103-113, 2002.
- [17] <http://konicaminolta.jp/>.
- [18] <http://www.nikon-image.com/jpn/index.htm>.

## 第2章 テクスチャリングシステム

- [19] J. Heikkila, and O. Silven, “A four-step camera calibration procedure with implicit image correction,” IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.1106-1112, 1997.
- [20] [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/).

## 第3章 クロマティシティに基づく 色調補正手法

### 3.1 はじめに

第2章では、3次元幾何モデルのテクスチャリングの手法の幾何学的問題について述べた。幾何学的問題を解くことにより、デジタルカメラで撮影したカラー画像を3次元幾何モデルの正しい位置に貼り付けることが可能であり、各カラー画像撮影時の光源環境および物体位置が固定されていれば、カラー画像間のつなぎ目のない仮想現実感モデルを得ることが出来る。しかしながら、画像撮影ごとに、光源環境が変化したり、物体を動かした場合には、幾何学的側面を考慮するだけでは不十分であり、光学的側面を考慮する必要がある。光学的側面とは、テクスチャ撮影時における光源状況の変化を考慮して、色の不連続性なく、テクスチャを幾何モデルに貼り付ける問題である [1, 2, 3, 4]。

観測される画像は、光源、物体の光学的、幾何的性質の影響を受けるため、光源状況が異なる複数の画像を用いて、単純にテクスチャマッピングを行うと、テクスチャのつなぎ目に色の不連続が生じてしまうことになる。これらの影響を除去するために、得られた複数枚の画像の色調補正を行う必要がある。光学的問題に対する手法は、大きく平均に基づく手法と physics-based の手法に分けられる。平均に基づく手法は、画像間の重なり合う領域において、対応画素間で平均を取る手法であり、簡便に行うことが出来る。しかしながら、光源が移動した画像における色調補正は困難である。一方、physics-based の手法は、光源環境が変化しても物体表面の反射率は変化しないことを用いて、色

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

調補正を行う手法である．なんらかの形で光源環境を推定する必要があるが，光源が移動する場合においても適用可能である．以降，各画像のカメラパラメータが推定された状態で画像間の色調の連続性を保つ手法を，平均の基づく手法及び physics-based の手法に分けて述べる．

まず，画像間の平均を用いて色調補正を行う手法としては，Neugebauer ら [5] による手法がある．この手法では，visibility, sampling density, smooth transition, elimination of outliers を考慮して，重なり合う領域で画像強度の重み付平均を取り，色調補正を行う．visibility に関しては，点 が画像 内で見えていれば 1 見えていなければ 0 を取る visibility 関数 を用いて扱う．高解像度のテクスチャが得られるところで，低解像度のテクスチャを用いてしまうことにより画像が不鮮明になること防ぐために各画像の Sampling density を考慮する．物体表面上 での接ベクトルで，画像面への射影が となるものを考える．この二つの接ベクトルで張られた領域の面積は，物体表面上での sampling density と比例関係にあるので，この二つの接ベクトルの外積の逆数を として，sampling density の metric とする．次に，テクスチャ間のつなぎ目において，色の不連続を除去するように補正を行うことを考える (smooth transition) ．このために 2 つ目の重み係数 を考える．これは，各画像の端からどれくらいの距離にあるかを示す基準である． $w_d$  は，式 (3.1) で表す．

$$d_i(q) = \min_q \{ |q - \hat{q}| \hat{q} \text{ is not defined in image } i \}$$

$$w_d(q) = \frac{d_i^2(q)}{d_i^2(q) + (d_{max} - d_i(q))^2} \quad (3.1)$$

はずれ値を除去するために，3 番目の重み係数  $w_i$  を考慮する．M 推定を用いて， $w_q \cdot w_d$  により重みの付けられた画像強度平均 ( $\mu_c$ ) 及び分散 ( $\sigma_c$ ) を推定する．最後に，全ての重みを考慮して，画像  $i$  で見えているある点  $q_i$  での色を  $c_i$  として，以下のとおり表せる．

$$w_q \cdot w_d \cdot w_d \left( \frac{c_i - m\mu_c}{\sigma_c} \right) \quad (3.2)$$

図 3.1 に本手法の結果を示す．左が，単純に平均を取った場合であり，真中がのみを考慮した場合である．右が全ての重み係数を考慮した場合である．また，本手法以外に，Lensch ら [6] により重なり合うテクスチャ間でつなぎ目の

付近での  $\alpha$ -blending を行うことにより色調補正を行う手法も提案されている。



図 3.1: 再構成されたテクスチャ:重み無し平均 (左),  $W_q, w_d$  のみの重み付平均 (中), 全ての重み付平均 (右)[5]

一方, Physics-based の手法に関しては, また, 異なる点光源下の複数枚のテクスチャから, 物体固有の反射率である albedo を求めることにより色調を補正する手法が考えられる. 光源を一つの無限遠点光源とし, 画像撮影ごとにその位置が変化する状況で, 反射特性として拡散反射成分 (ランバーシアン) のみを持つ物体を撮影した画像に対して本手法を適用する. ランバーシアン物体の場合を無限遠点光源下で観測した画像の強度は式 (3.3) で表される.

$$I_i = \rho_i L_i \cos \theta_i \quad (3.3)$$

ここで,  $I, i, L, \rho, \theta$  はそれぞれ, 画像強度, 画像の指標, 光源強度, albedo, 物体表面上の法線方向と光源方向のなす角度である. ここで, 法線方向及び光源方向が 3.3 章の手法等により既知であるとする. 光源位置の異なるが重なり部分が存在する 2 枚の画像 ( $I_1, I_2$ ) が与えられると, albedo は光源環境によらない物体固有の値であり,  $\rho_1 = \rho_2$  が成立することから, 式 (3.4) より, 最小二乗

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

法を用いて，光源パラメータ  $(L_1, L_2)$  の推定を行うことが可能である．

$$\min_{L_1, L_2} |\rho_1 - \rho_2| = \min_{L_1, L_2} \left| \frac{I_1}{L_1 \cos \theta} - \frac{I_2}{L_2 \cos \theta_2} \right| \quad (3.4)$$

光源パラメータを推定できれば，式(3.3)より，それぞれの入力画像から，albedo 画像  $(\rho_i)$  を計算することが可能であり，得られた画像を3次元幾何モデル上に貼り付けることにより，画像間のつなぎ目のないテクスチャ付の3次元幾何モデルが生成される(図3.2)．本手法を用いて光源位置の異なる2枚の画像の色調補正を行い，その結果このように光源パラメータの逐次推定を行うと誤差の蓄積が起り，オブジェクトを一周回った場合等に誤差が非常に大きくなってしまふことが考えられる．図3.3に12枚の補正結果の画像を，3次元幾何モデル上に右回りに貼り付けていった結果を示すが，隣り合う2枚ずつを見れば，色調の不連続性が見られないが，一番最初に貼り付けた画像と一番最後に貼り付けた画像の部分でつなぎ目が見られている(図3.3下の右側部分)．このような問題は，複数の距離画像の位置あわせを行う場合にも発生する問題であり，同時位置あわせを行う手法[7]が提案されている．本手法においても，同様にして，逐次的色調補正を行った後，同時色調補正を行うことにより，全ての画像間でつなぎ目のない色調補正結果が得られる(図3.4)．

また、Beauchesneら[8]により光源環境の異なる2枚の画像を共通の光源環境に relighting を行うことにより色調補正を行う手法が提案されている．本手法での画像での画像強度は式(3.5)で表す．

$$I_i(p, d_i) = A(p)B_i(N(p), d_i) \quad (3.5)$$

ここで， $p, d_i, N(p), A(p), B_i(N(p), d_i)$  はそれぞれ，画素の指標，視線方向，法線方向，物体色(albedo)，光源環境及び法線方向によって決まる明るさ関数である．次に，ガウス球上の各法線方向での光源分布を表す illumination sphere( $L$ ) を考える．画像  $I_i$  での光源環境が  $L_i$  である時，異なる光源環境  $L'_i$  での画像  $I'_i$  は，式(3.6)で表される．

$$\begin{aligned} I'_i &= A(p)B'(N(p), d_i) \\ &= \frac{B'(N(p), d_i)}{B(N(p), d_i)} I_i(p, d_i) \\ &= C_i(N(p), d_i) I_i(p, d_i) \end{aligned} \quad (3.6)$$

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

ここで、 $C_i$  は相対光源環境を表す lightsphere であり、 $B'_i$  は光源環境が  $L'$  であるときの明るさ関数である。なお  $C_i, B'_i$  は画素ごとに決まる関数ではなく、画素での法線方向によって決まる関数である。2枚の画像  $I_1, I_2$  が与えられたとき、それぞれの明るさ関数  $B_1, B_2$  の非負係数の線形結合により、新たな明るさ関数  $B'$  を作成することが可能である。また、このときの lightsphere は式 (3.7) で表せる。

$$\begin{aligned}
 C_i(N(p), d_i) &= \frac{B'(N(p), d_i)}{B(N(p), d_i)} \\
 &= \frac{k_1 B_i(N(p), d_i) + k_2 B_{3-i}(N(p), d_{3-i})}{B_i(N(p), d_i)} \\
 &= \frac{k_1 I_i(N(p), d_i) + k_2 I_{3-i}(N(p), d_{3-i})}{I_i(N(p), d_i)} \quad (3.7)
 \end{aligned}$$

画像の重なりあう領域の各  $p$  に対して  $C_i(N(p), d_i)$  を求めることが出来るが、本手法では、ガウス球上で  $C_i(N(p), d_i)$  を量子化し、各  $p$  での値を投票することにより、よりロバストに推定を行っている。また、画像に写っていない領域に関しても投票後の lightsphere の重み付平均を取ることで、lightsphere を推定している。図 3.5 に本手法の顔画像への適用結果を示す。光源環境の異なる2枚の画像をさまざまな光源環境下で relighting している。図 3.6 に重なり合う領域での2枚の画像のヒストグラム差分を示す。補正前より補正後の方が、差分が小さくなっていることが確認できる。

Beauchesne ら [8] による光源環境の異なる2枚の画像を共通の光源環境に relighting を行うことにより色調補正を行う手法は、量子化された法線方向空間で両画像の強度の比較を行っており、3次元形状が高精度に求まっていれば非常に有効な手法であると考えられる。しかしながら、各点の法線方向に応じて relighting を行うので、法線方向が信頼できない点に関しては、誤った補正が行われてしまうことになる。そこで、本章では法線方向が信頼できない点に関しても、クロマティシティの同じ値をとるその他の点を用いて、正確に色調補正を行う手法を提案する。なお、本章では、カラー画像と3次元幾何モデルの間のカメラパラメータは、第2章のシステム等を用いて決定されているものとし、光学的側面にのみ着目する。

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

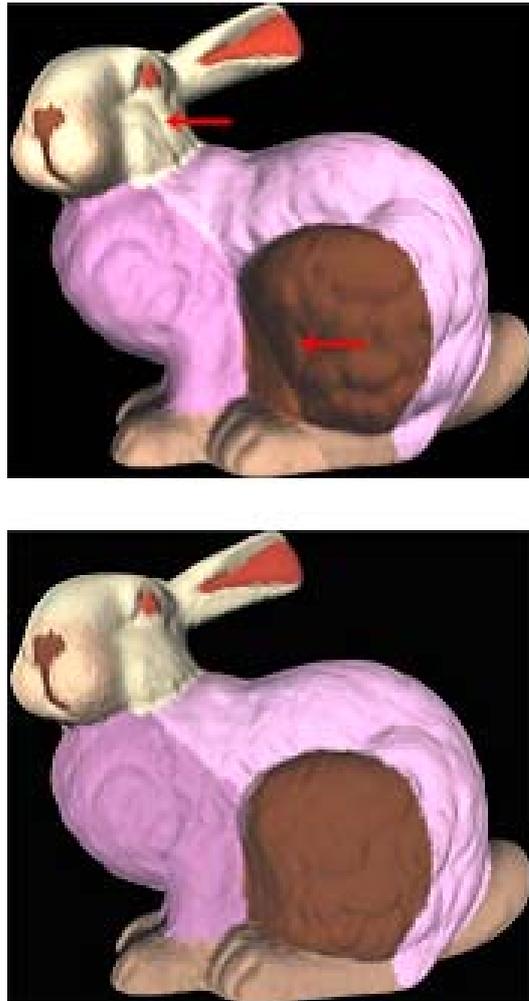


図 3.2: 色調補正前(上), 色調補正後(下)の画像を3次元幾何モデルに貼り付けた結果

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法



図 3.3: 逐次色調補正結果

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

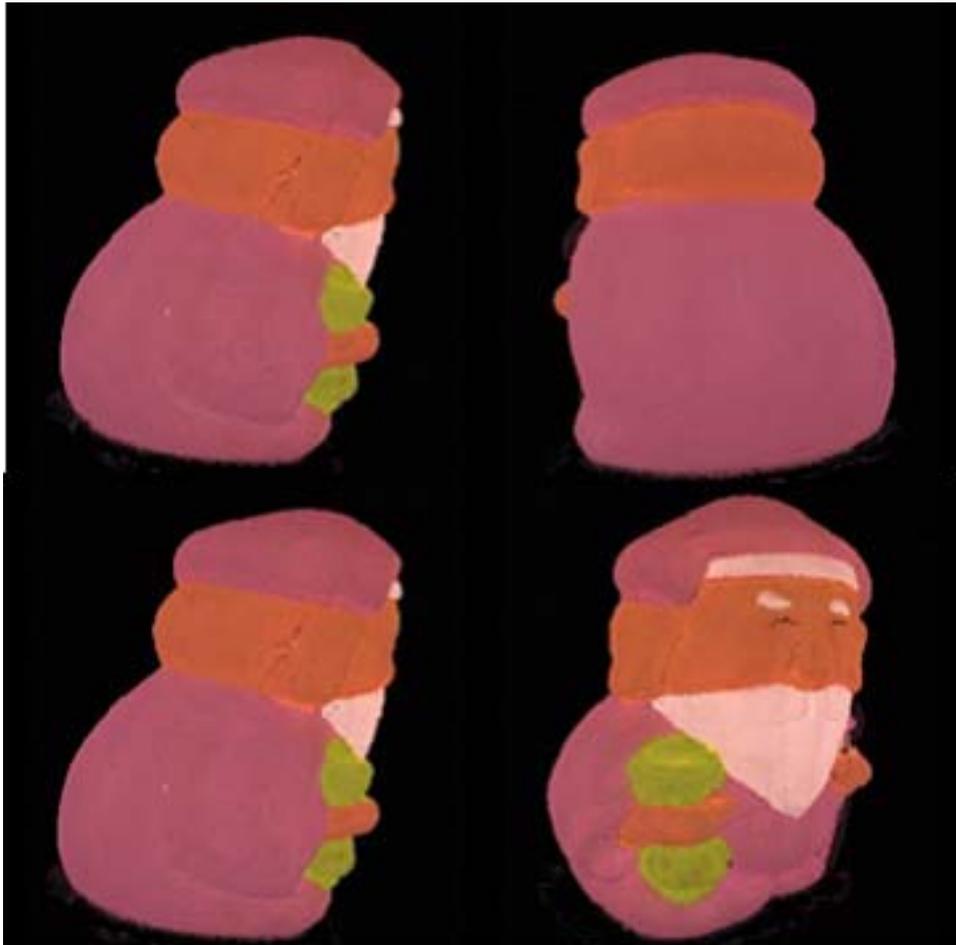


図 3.4: 色調補正結果

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法



図 3.5: 光源環境の補間 . 画像 1 が左側で画像 2 が左側に貼り付けられている . 右上の画像から左回りに , 元の画像 ,  $B' = B_2$  の画像 ,  $B' = (B_1 + B_2)/2$  の画像 ,  $B' = B_1$  の画像 [8] .

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

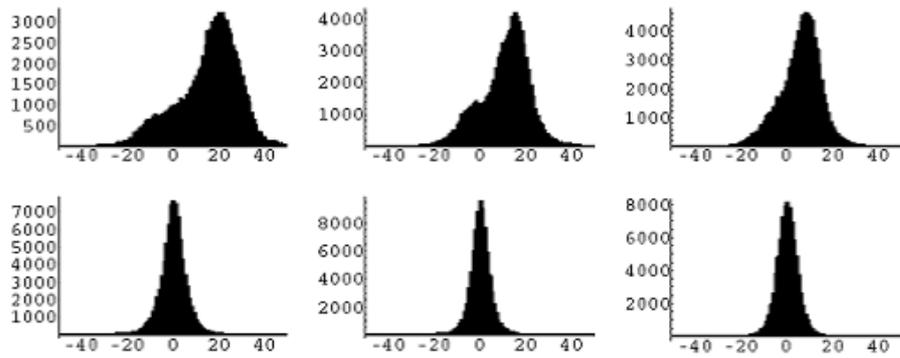


図 3.6: 重なり領域での画素のヒストグラム差分. 上列が補正前 (左から ,R,G,B) , 下列が補正後 [8].

## 3.2 提案手法

本章以降，クロマティシティを用いた点光源下の画像に対する色調補正の手法を提案する．

本手法では，光源は無遠点光源であるが，テクスチャ取得毎に移動するものとする．また，物体の反射特性はランバーシアンであるとし，さらに，画像色度が同じ点には同じ反射率を持つという仮定が成立する物体を対象とする．入力データは，複数枚のテクスチャと距離センサで計測された3次元幾何モデルである．

ランバーシアン物体の場合，点光源下での画像の値は以下の式で表すことができる．

$$I_x(c) = L(c)S_x(c)\cos\theta_x \quad (3.8)$$

ここで， $c = \{r, g, b\}$  であり， $x$ ， $I_x(c)$ ， $L(c)$ ， $S_x(c)$ ， $\theta_x$  はそれぞれ，ピクセルの指標， $x$  での画像の値，光源色， $x$  での反射率， $x$  での物体の法線方向と光源方向のなす角度である．また，以降， $L(c)S_x(c)$  を擬似 albedo と呼ぶことにする．擬似 albedo は光源方向に依存しない値なので，各入力画像より，擬似 albedo を推定し，それを3次元幾何モデルに貼り付けることにより，テクスチャ間の色調の連続性の保たれた3次元幾何モデルを生成することが可能である．

## 3.3 擬似 albedo 推定

図 3.7 に擬似 albedo 推定の概要を示す．まず始めに，3次元モデルより計算された法線方向（図 3.7: ブロック (a)）を用いて，以下に示す手法で，光源方向を推定する（図 3.7: ブロック (b)）．

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

まず，以下の画像クロマティシティを計算する．（図 3.7:ブロック (c)）．

$$I_{x,c} = \frac{I_x(c)}{\sum_c I_x(c)} \quad (3.9)$$

ここで，画像クロマティシティがある同じ値をとる点からなる画素の集合を  $A$  とする．画像クロマティシティが同じ値をとる点とは，クロマティシティ空間を細かいグリッド上に分割し，画像クロマティシティをこの空間にプロットした時に同じグリッド内に入る画素を意味するものとする． $\mathbf{n}(x)$ ， $\mathbf{L}$  をそれぞれ  $x$  での法線方向，光源方向とすると，物体上でクロマティシティの同じ点は，同じ反射率を持つ仮定しているので， $S_x(c)$  は  $A$  内では一定 ( $S_{const}(c)$ ) となり， $A$  内の点に対して以下の式が成立する．

$$I_x(c) = L(c)S_{const}(c)\cos\theta_x = g\mathbf{n}(x) \cdot \mathbf{L} \quad (3.10)$$

ここで， $g$  は定数である．領域  $A$  での  $I_x(c)$ ， $\mathbf{n}(x)$  を式 (3.10) に代入し，最小二乗法を適用することにより  $\mathbf{L}$  を推定し， $\cos\theta_x$  を得る（図 3.7:ブロック (d)）．なお，光源方向を決定する手法としては，光源環境を魚眼レンズを用いて決定する手法や [9]，光源位置を物理的に計測する方法等も存在するが，これらの手法を用いると，テクスチャ計測の労力が増えるため，本手法を採用した．

$I_x(c)$ ， $\cos\theta_x$  が既知であれば，擬似 albedo は式 (3.8) より推定可能である．しかしながら，式 (3.8) より各点に対して，擬似 albedo を推定すると，3次元幾何モデルが正確に求められておらず，法線方向の精度が低い点では，不自然な色となることが推定される．このため，本論文では，式 (3.8) より各点に対して擬似 albedo を求めるのではなく，画像クロマティシティが物体の幾何形状に依存しないことを利用して，クロマティシティが同じである画素の集合毎に擬似 albedo を推定する．

以下に，擬似 albedo 推定する手法を述べる．式 (3.8) 及び式 (3.9) より擬似 albedo は以下の通り表すことが出来る．

$$L(c)S(c) = I_{x,c} \sum_c \frac{I_x(c)}{\cos\theta_x} = I_{x,c}T_x \quad (3.11)$$

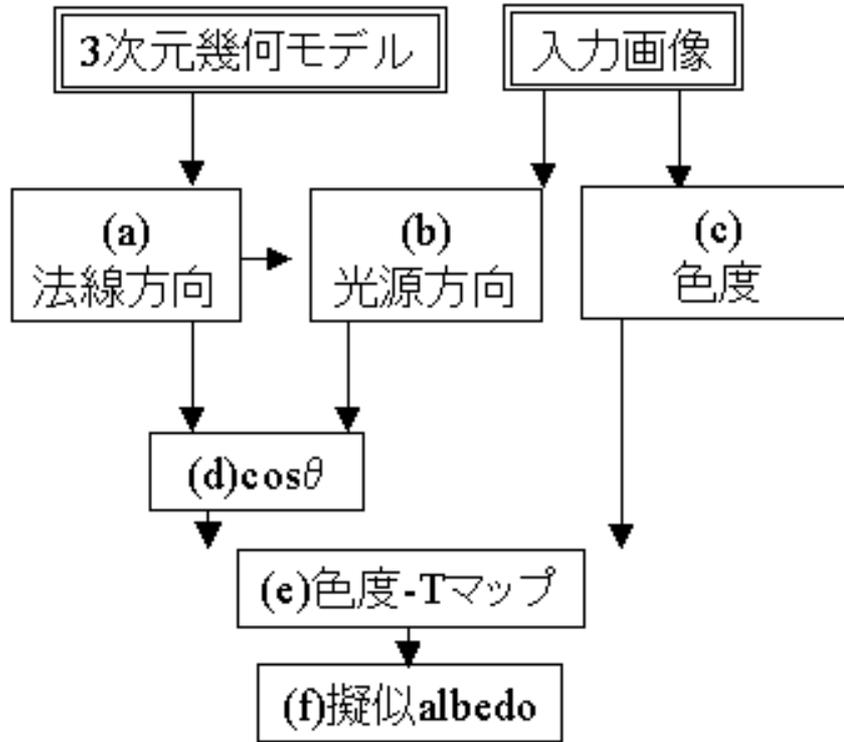


図 3.7: 擬似 albedo 推定の概要

ここで,  $T_x$  は以下の通りである.

$$T_x = \sum_c \frac{I_x(c)}{\cos\theta_x} \quad (3.12)$$

先に述べた通り, クロマティシティが同じ点は, 反射率も同じ, すなわち, 点  $p, q$  において,  $I_{p,c} = I_{q,c}$  ならば,  $S_p(c) = S_q(c)$  が成立すると仮定しており,  $L(c)$  は画像内では一定であるので,  $I_{p,c} = I_{q,c}$  ならば,  $L(c)S_p(c) = L(c)S_q(c)$  が成立する. さらに, 式 (3.8) を用いると,  $T_x = \sum_c L(c)S_x(c)$  であるので,  $T_p = T_q$  が成立する. つまり,  $T_x$  は  $x$  に直接は依存せず, 画像クロマティシティのみで決定される値であり, 以下, これを  $T$  と表し, クロマティシティ-Tマップと呼ぶ.

### 3.4 クロマティシティ-Tマップ推定

クロマチシティ-Tマップの生成手法について以下に述べる．図 3.8 にクロマチシティ-Tマップ作成の概要を示す．まず，各ピクセル ( $x$ ) に対し， $T_x = \sum_c I_x(c) / \cos\theta_x$  を計算し (図 3.8: ブロック (a))，その値をクロマチシティ空間の点  $I_c = I_{x,c}$  に投票する (図 3.8: ブロック (b))．全てのピクセルの投票後，光源推定時と同様にクロマチシティ空間を細かいグリッドに分割し，各グリッドに対して， $T$  の値のヒストグラムを生成する (図 3.8: ブロック (c))．ヒストグラムの中間値をそのグリッドにおける  $T$  の値とすることにより，クロマチシティ-Tマップを作成する (図 3.8: ブロック (d))．異なる視点から得られた全ての入力画像からクロマチシティ-Tマップを作成すると，式 (3.11) の関係を用いて，擬似 albedo が推定可能である．各擬似 albedo を 3次元幾何モデルに貼り付けることにより，テクスチャ間のつなぎ目のない現実感の高い3次元モデルを得ることが可能である．なお，光源色が白色板等で既知の場合，擬似 albedo から albedo を推定することが可能である．本手法での物体に対する仮定 (物体上で画像クロマチシティが同じ点は，同じ反射率を持つ) は，全ての物体に対して成立するわけではないが，現実世界の多くの物体に対して成立すると考える．なお，式 (3.9) で定義される画像クロマチシティの値を入力画像の画像の色と置き換えることにより，クロマチシティ画像を生成することが出来るが，画像クロマチシティでは，強度情報が除去されており，望ましい結果が得られないが，本手法では，強度情報も正しく復元している (図 3.9)．

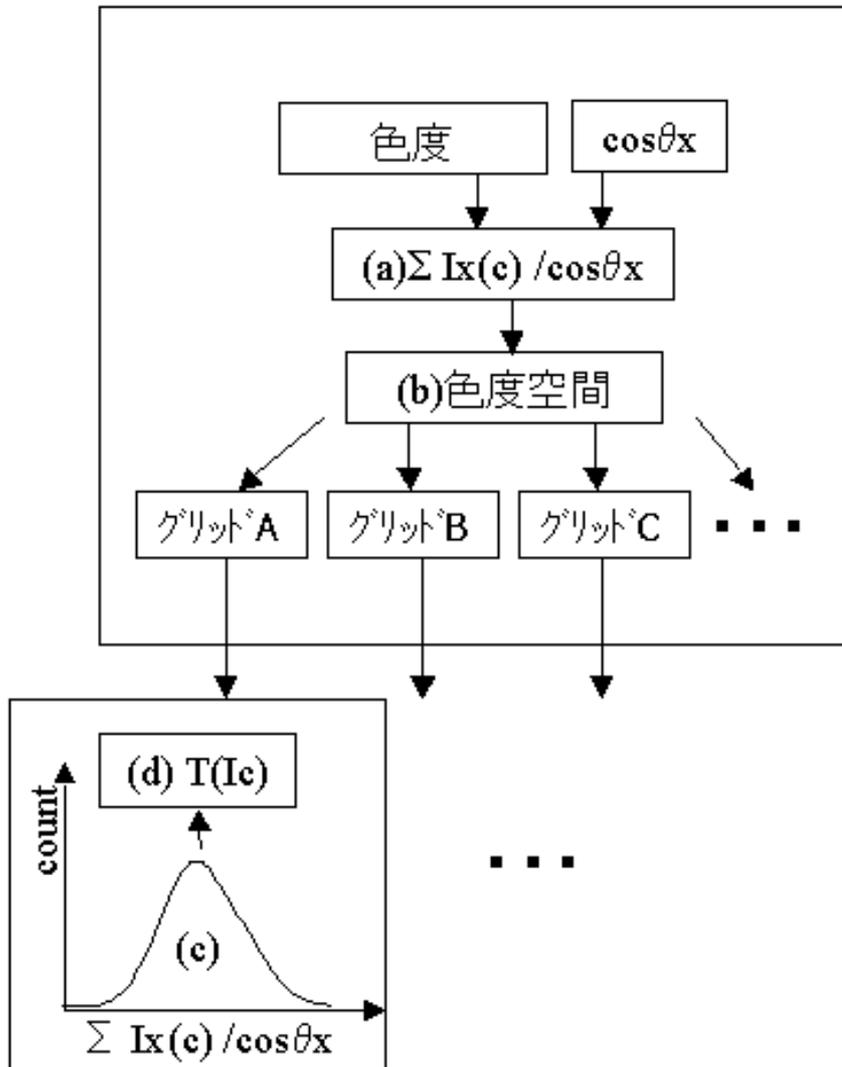


図 3.8: クロマティシティ-T マップ推定の概要

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

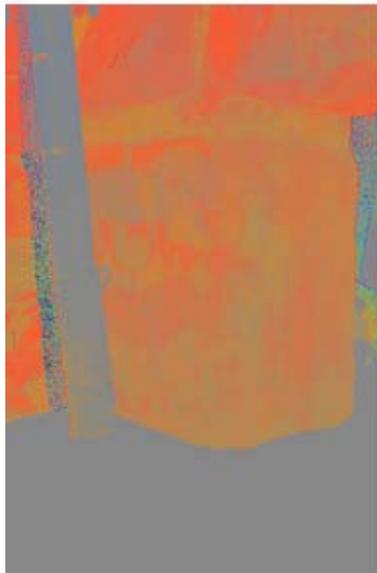


図 3.9: 画像クロマティシティ画像および擬似 albedo 画像の比較：入力画像 (上), 画像クロマティシティ(左下), 擬似 albedo 画像 (右下)

## 3.5 手法の限界と適用可能性

### 3.5.1 仮定の妥当性

本章では「クロマティシティが同じであれば albedo も同じである」という仮定を用いていたが、この仮定の妥当性について考察を行う。この仮定は、現実世界に存在する色素は有限であり、対象物体に使用されている色の数は限られており、クロマティシティが同じであればその反射率 (albedo) も同じであると考えてよい状況が多く存在する、という事を前提とした仮定である。あらかじめ対象となる物体に対して、厳密に本仮定が成立するか否かを確認することは困難であるが、以下に、観測された結果から、本仮定が成立するか否かを検証する手法について検討する。

まず、計測誤差等が無い理想的な状況を考える。物体表面上のある点における画像の強度 ( $I = R + G + B$ ) とその点での表面の方向と光源方向のなす角 ( $\theta$ ) とすると、クロマティシティがある値をとる点の集合では、以下の関係式が成立する。

$$\frac{I}{\cos\theta} = \text{const.} \quad (3.13)$$

実際には、計測誤差、クロマティシティのクラスタリングに伴う誤差等を考慮して、 $\frac{I}{\cos\theta}$  のばらつきは、以下のとおりである。

$$\Delta \frac{I}{\cos\theta} = \frac{I}{\cos\theta} \Delta I + \frac{I \sin\theta}{\cos^2\theta} \Delta\theta \quad (3.14)$$

ここで、表.3.1 のような条件の下でばらつきを評価すると、 $\Delta \frac{I}{\cos\theta} \sim 0.3$  となる。なお、ここでは、画像は 8bit で表現されているものとする。よって、観測された画像からクロマティシティが同一である点を抽出し、この点の集合の  $\Delta \frac{I}{\cos\theta}$  のヒストグラムを計算し、この標準偏差が、 $\Delta \frac{I}{\cos\theta}_{\text{estimate}} \sim 0.3$  と同程度以下であれば、本手法の仮定が成立していると言える。逆に、上記の条件が成立していない場合は、適用が困難であると考えられる。

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

表 3.1: 誤差推定条件

|                                 | 誤差     |
|---------------------------------|--------|
| $\langle \Delta I \rangle$      | 5      |
| $\langle \Delta \theta \rangle$ | 5deg.  |
| $\langle I \rangle$             | 100    |
| $\langle \theta \rangle$        | 50deg. |

本実験で使用したデータから  $\Delta \frac{I}{\cos \theta}$  のヒストグラムを計算した結果を図.3.10に示す. 図.3.10の色がついている部分が平均からのばらつきが0.3以内の領域であり, 本データの場合は, 標準偏差が0.11程度であり,  $3\sigma(\frac{I}{\cos \theta})_{measure} \sim 0.33$  であり, 確かに  $\Delta \frac{I}{\cos \theta}_{estimate}$  と同程度である事が確認できる.

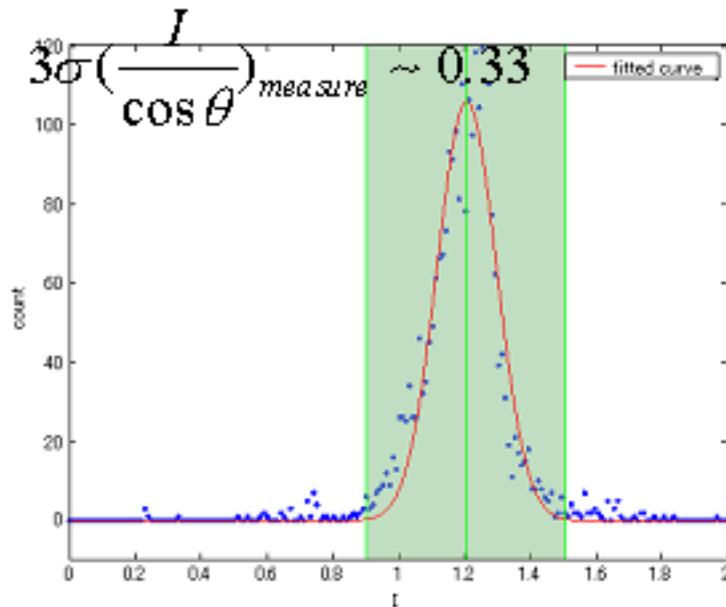


図 3.10: 手法の限界

また, いくつかの物体に対して, 本手法の仮定が成立しているか, すなわち, 正しく albedo が推定可能であるかを実験を行った結果を図 3.11,3.12,3.13

に示す。



図 3.11: 仮定の妥当性：入力画像 (左)，推定された擬似 albedo

### 3.5.2 光源方向推定

光源方向を決定する手法としては，光源環境を魚眼レンズを用いて決定する手法や [9]，銀面球を用いて計測する手法 [10]，光源位置を物理的に計測する方法等も存在するが，これらの手法を用いると，テクスチャ計測の労力が増えるため，本手法では，光源方向を推定するために，クロマティシティが同じ集合 ( $A$ ) に対して，式 (3.10) を用いて， $\cos\theta$  を推定した．ここで，以下に本手法での光源方向の推定精度を検証する．本手法での光源方向推定精度に影響を与える要素としては，以下の2点を考慮する．

- 法線ベクトルの推定誤差



図 3.12: 仮定の妥当性：入力画像 (左)，推定された擬似 albedo

- カメラの感度

#### 法線ベクトル推定誤差

まず，法線ベクトル推定誤差について，検証を行う．本手法では，ある点の法線ベクトルを推定するために，その点の  $N$  個近傍点を用いて，推定を行っているおり，光源方向が既知の CG 画像を用いて，光源方向推定に与える誤差



図 3.13: 仮定の妥当性：入力画像 (左)，推定された疑似 albedo

の評価を行った．本来なら，対象物体ごとに本検証を行う必要があるが，任意の物体に対して検証を行うことは困難であるので，球状の物体を用いて検証を行っている．

以下に，法線ベクトル推定に使用する近傍点の数を変化させて，光源方向推定を行った結果を示す．入力画像としては，図 3.14 を用いた．図 3.15 に近傍点を 30 個にした場合の，図 3.16 に近傍点 300 個にした場合の，画像強度と推定された光源方向から決定される  $\cos\theta$  との関係を示す．図 3.15 及び図 3.16 から分かるとおり，光源方向推定結果は，近傍点の数にほとんど依存しないことが確認できる．ただ，本検証では，球状の形状を用いているが，凹状の部分を用いると，本検証より，精度が悪くなることが予測されるが，そのような部分に関しては，局所的なはずれ値と考え，ロバスト推定の手法を用いることにより除去することが可能であると考えられる．また，推定した結果と真値との比較を表 3.2 に示す．

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

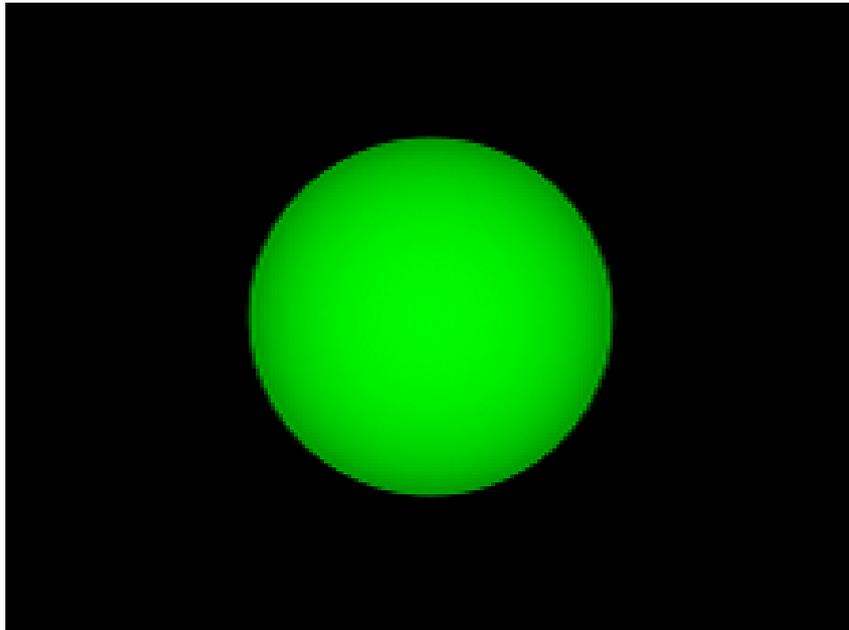


図 3.14: 入力画像

表 3.2: 誤差推定条件

| 真値             |              | 推定値            |              |
|----------------|--------------|----------------|--------------|
| $\theta(deg.)$ | $\phi(deg.)$ | $\theta(deg.)$ | $\phi(deg.)$ |
| 0              | 0            | 0              | 0            |
| 45             | 35           | 48             | 36           |

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

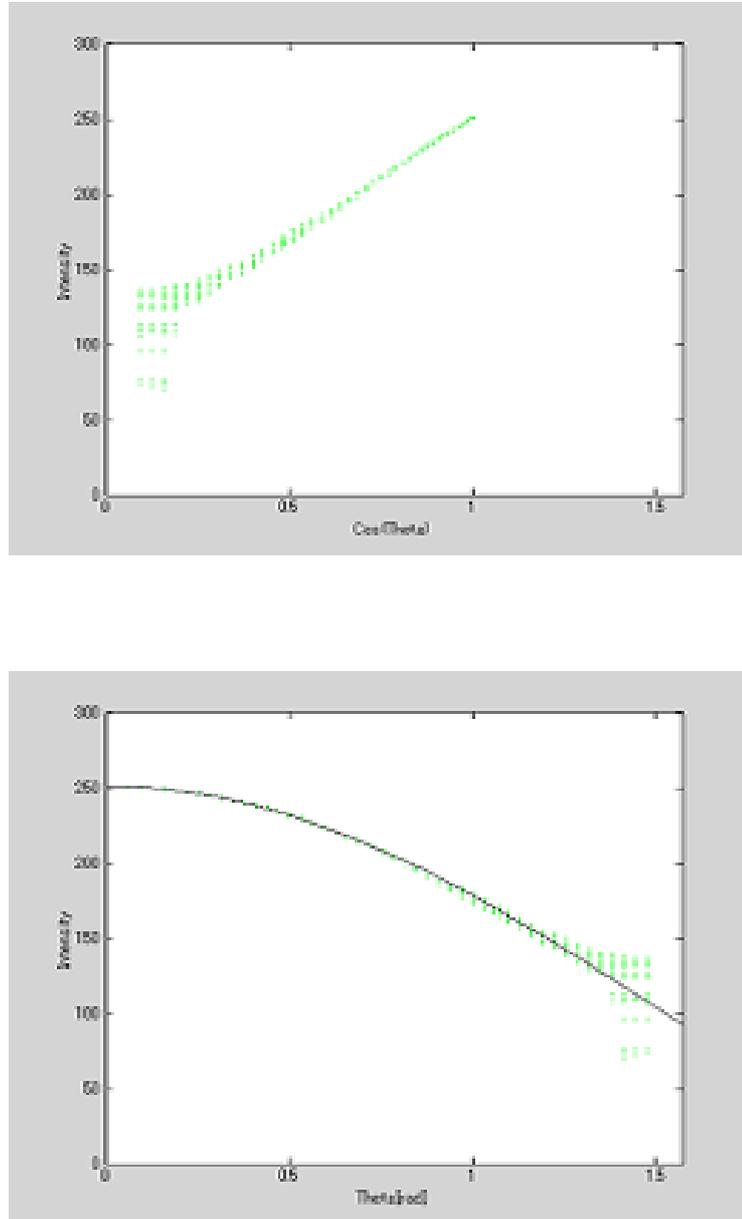


図 3.15: 光源方向推定結果．法線方向推定に使用した近傍点の数 30 の場合．  
左：画像強度 vs.  $\cos\theta$ , 右:画像強度 vs.  $\theta$

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

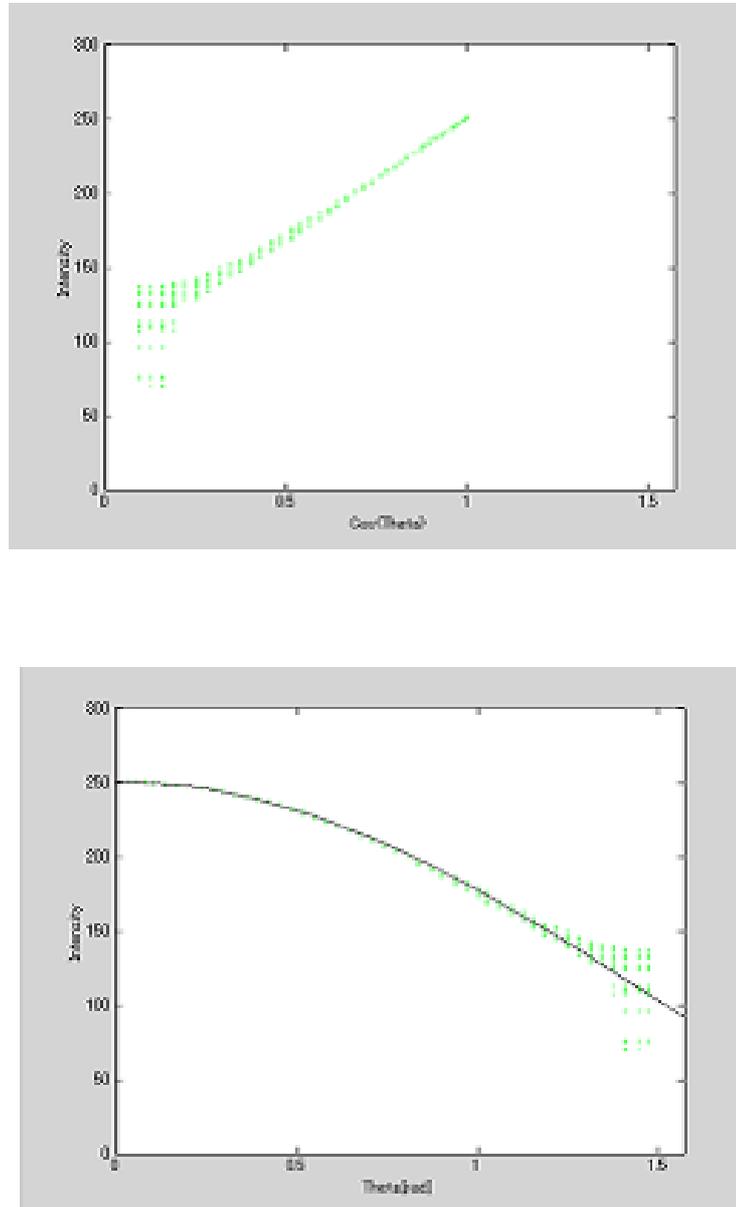


図 3.16: 光源方向推定結果．法線方向推定に使用した近傍点の数 300 の場合．  
左：画像強度 vs.  $\cos\theta$ , 右:画像強度 vs.  $\theta$

#### カメラ感度

次にカメラの感度に関して検証を行う。本実験では、ビクターの KY-F70 を用いた。CCD の特性として、ある程度以上の光量の光が入射すると飽和することが知られており、実際、既知の光源方向の下での、画像を撮影し、画像上のある点における R,G,B 各バンドの画像強度と光源方向及び法線方向から決定される  $\cos\theta$  をプロットしたものを図 3.17 に示す。カメラの感度が線形である場合は、画像強度と  $\cos\theta$  の関係は、直線になるべきであるが、画像強度が 200 付近で不連続に折れ曲がっていることが確認でき、カメラの感度が線形でないことを示唆している。この影響を考慮するため、画像上の同じ点を露光時間を変化させて計測することにより、線形性の確認を行った。R,G,B の各バンドの撮影時の露光時間に対する輝度値の変化を図 3.18 に示す。図 3.17 と同様に、画像強度が 200 付近から、飽和していることが確認できる。このようなカメラ感度が線形でないカメラから得られた画像を補正する手法として、High Dynamic Range Image[HDRI][11] の手法が知られている。この手法を用いてカメラ感度を推定した結果を図 3.19 に示す。HDRI で推定したカメラ感度曲線を実線で、実際に観測された画像強度を点で示しており、全体として、推定されたカメラ感度曲線と観測値が良く一致していることが確認できる。

物体表面での正確な輝度値を得るためには、カメラ感度が線形で無い場合には、上記のように HDRI の手法を用いる必要があるが、3次元幾何モデルのテクスチャリングのためには、画像撮影の簡便性が損なわれてしまうため、あらかじめカメラ感度をキャリブレーションしておくか、カメラ感度が線形であることが確認できているカメラを用いることが望ましい。

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

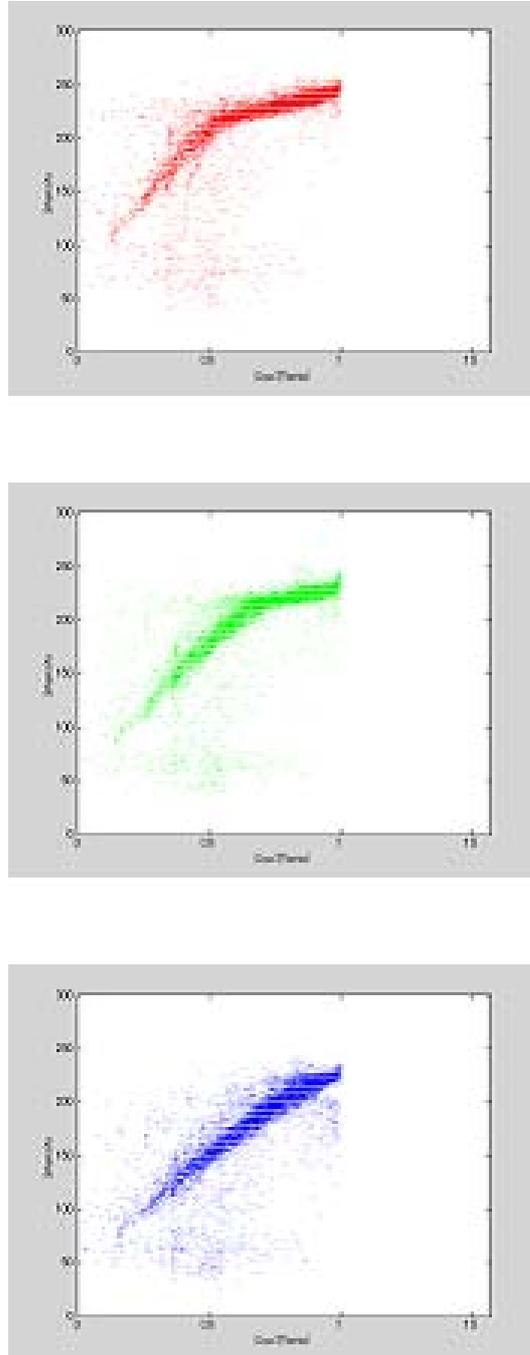


図 3.17: カメラ感度が線形で無い場合の画像強度と  $\cos\theta$  の関係

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

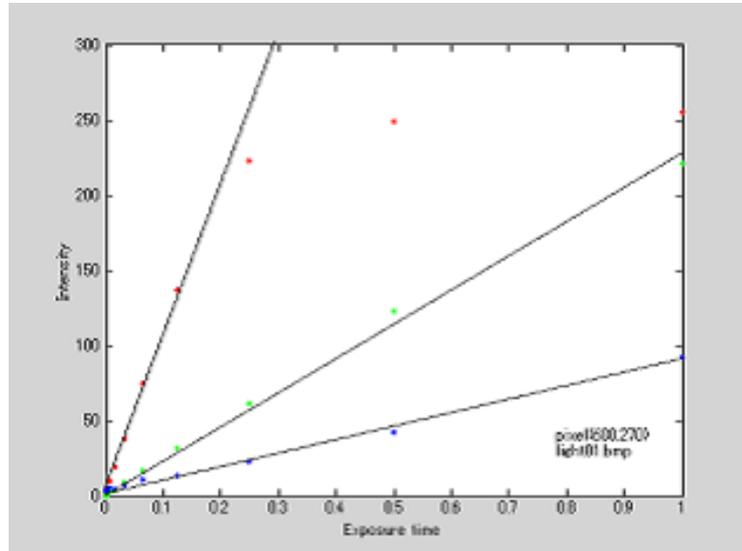


図 3.18: カメラの感度

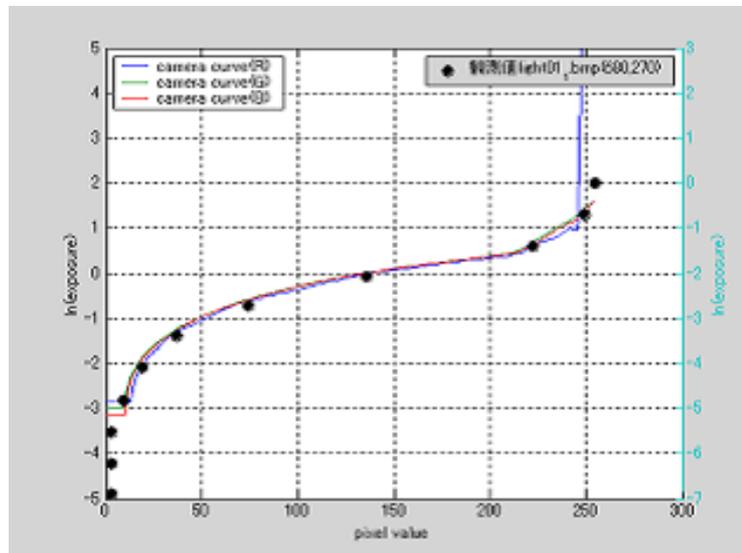


図 3.19: HDRI により推定されたカメラの感度

### 3.6 実験

入力画像の一部と3次元幾何モデルを図3.20に示す。テクスチャ、3次元幾何モデルはそれぞれ、Sony DXC-900、Minolta VIVID900により計測を行った。VIVID900はテクスチャ計測を同時に行うことも可能であるが、高画質の画像を得るためにテクスチャ計測にはDXC-900を利用した。あらかじめ、キャ



図 3.20: 入力画像及び3次元幾何モデル

リブレーション物体を距離センサ、カメラで撮影し、最小二乗法により、カメラパラメータを推定した。その際に、内部パラメータとして、焦点距離、光学中心、スキューを、外部パラメータとして、回転と並進を考慮した。得られたカメラパラメータを用いることで3次元幾何モデル上にテクスチャを幾何学的整合性が取れた状態で重ねあわせることが出来る(図3.21)。図3.21(c)では、入力画像の上に半透明の3次元幾何モデルを重ねており、位置が合っているこ

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

とが確認できる．次に得られた3次元幾何モデルの各点に対して，近傍点の座標値の主成分分析を行い，主成分が一番小さい方向を法線方向とした [12]．上

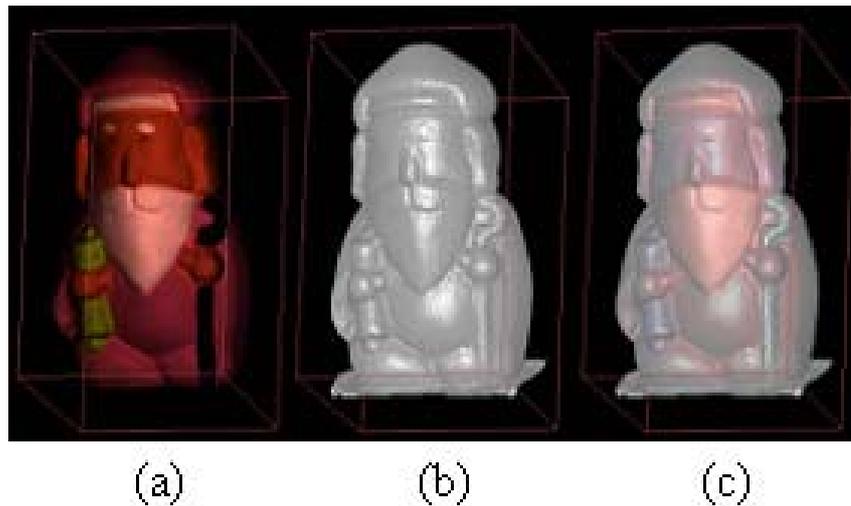


図 3.21: (a) 入力画像，(b) 3次元幾何モデル，(c) 入力画像と3次元幾何モデルの重ね合わせ

記の処理で得られた各画素の集合 ( $A$ ) に対して，各点の法線方向を用いることにより，全ての入力画像に対して，光源方向を推定した．図 3.22 に画像クロマティシティがある同じ値を持つ点の集合での， $\cos\theta$  と画像の値の関係を示す．図 3.22 において，式 (3.10) の  $\cos\theta$  と画像の値が比例関係にあることが確認できる．次に，全ての入力画像に対して，クロマティシティ-T マップを推定した．推定されたクロマティシティ-T マップを図 3.23 に示す．図 3.23 は，クロマティシティ空間の各点 ( $I_r, I_b$ ) での  $T$  の値を示す．このクロマティシティ-T マップを用いて，各入力画像に対して擬似 albedo を推定した．図 3.24 に二枚の画像 (画像 1 及び画像 2 と呼ぶ) から推定された擬似 albedo を示す．また，図 3.25 に R, G, B 各 256 階調で推定された擬似 albedo のオーバーラップ領域でのヒストグラムの差分を示す．ゼロ付近にピークが見られ，テクスチャ間の色調の連続性の保たれた 3次元モデルを得るのに十分な精度が得られている．最後に図 3.26 に 12 枚の入力画像を用いて擬似 albedo を推定し，3次元幾何モデル上の貼り付けた結果を示す．3次元幾何モデル上で，複数のテクスチャが

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

対応する点に関しては，画像の値の中間値をその点におけるテクスチャとした．全ての擬似 albedo を貼り付けた結果では，テクスチャ間のつなぎ目は見られない．また，幾何エッジの部分においても自然な色調が得られている．

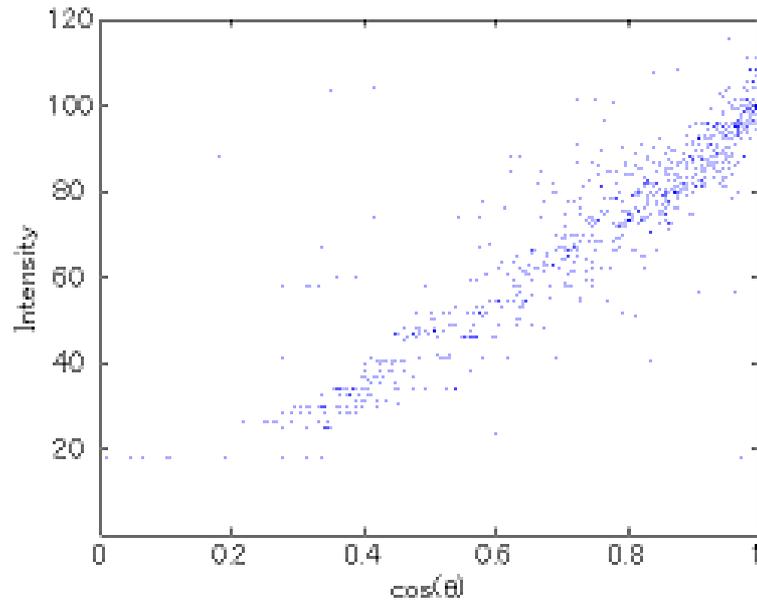


図 3.22:  $\cos\theta$  と画像の値との関係

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

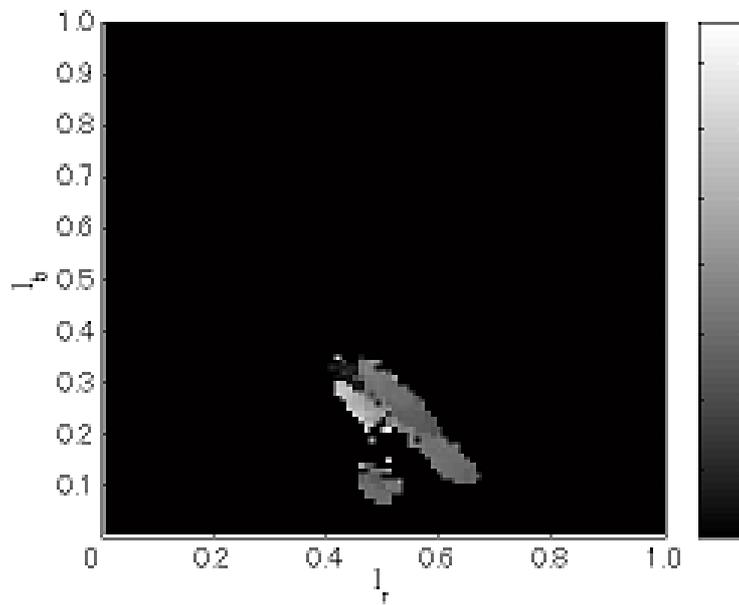


図 3.23: 推定されたクロマティシティ-T マップ

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

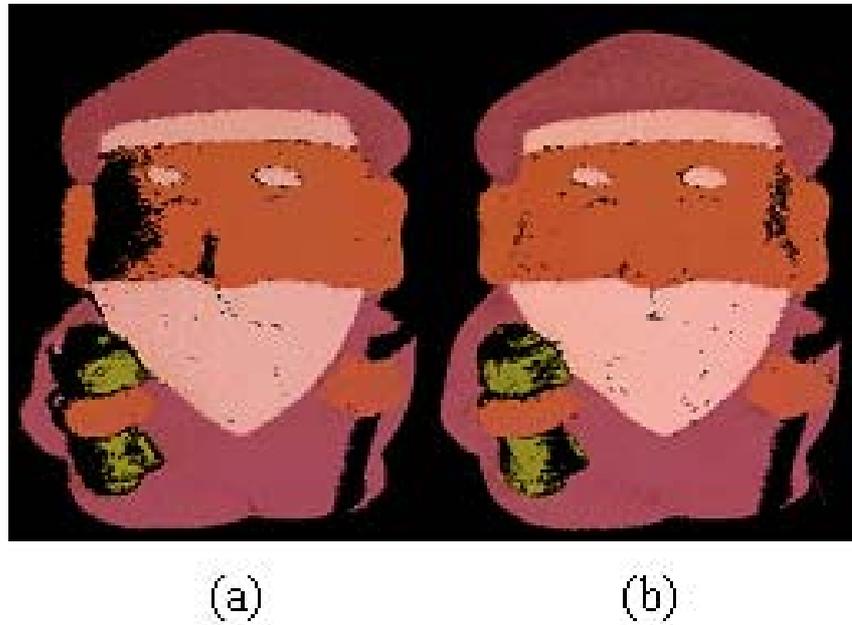


図 3.24: 推定された擬似 albedo

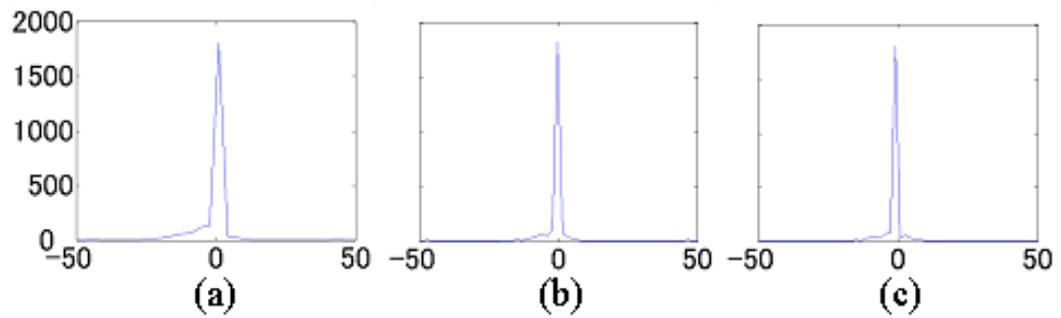


図 3.25: 画像1と画像2から推定された擬似 albedoの差分ヒストグラム: (a)red チャンネル, (b)green チャンネル, (c)blue チャンネル

第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

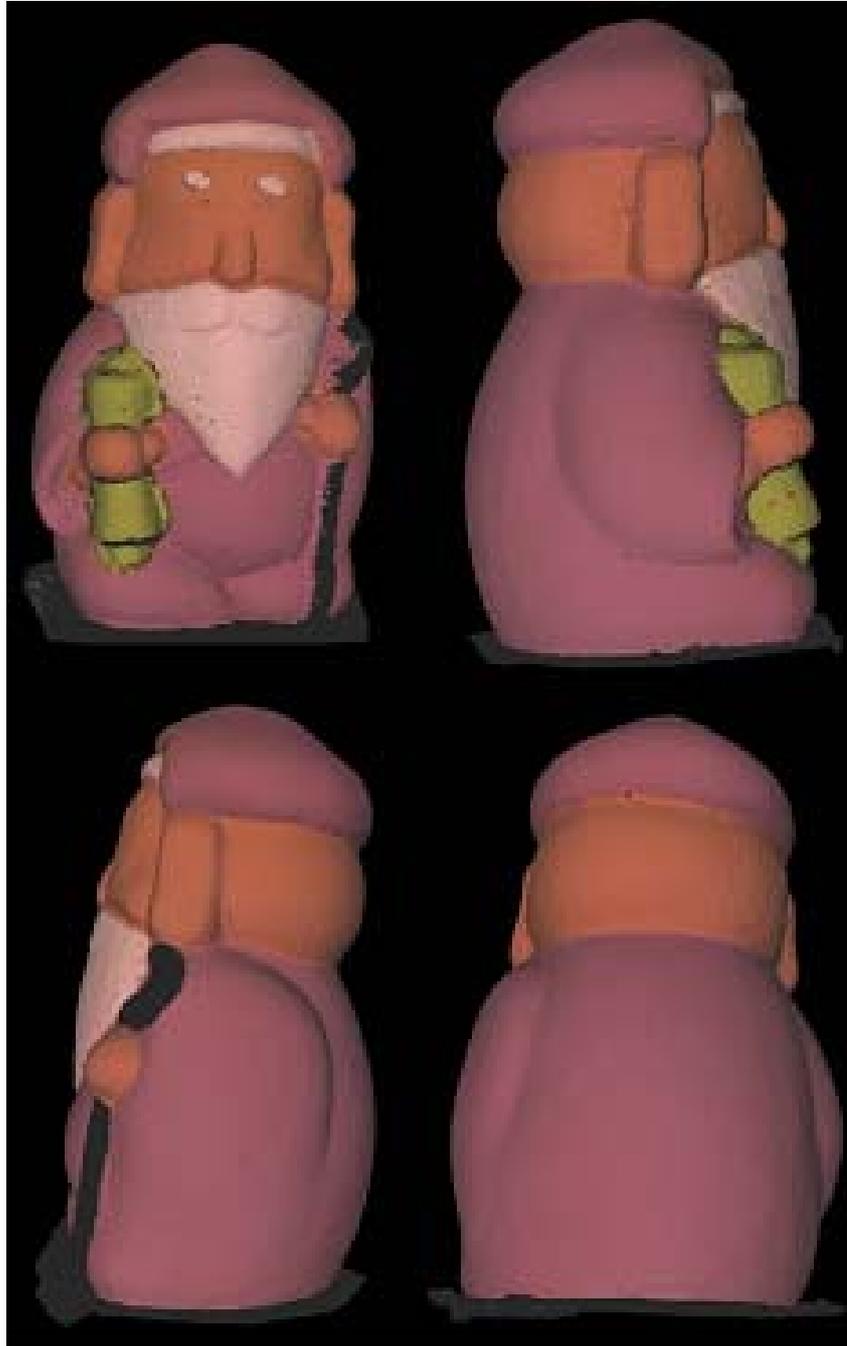


図 3.26: 統合擬似 albedo

## 3.7 まとめ

本章では、複数枚のカラー画像、3次元幾何モデル及びその間のカメラパラメータが与えられた時に、カラー画像間の色調の補正を行う手法を提案した。デジタルカメラで計測したカラー画像を用いて、3次元幾何モデルのテクスチャリングを行う際には、物体全体のテクスチャを一度の撮影で取得することは、ほぼ不可能であるため、視点位置を変更して複数回の撮影を行うことになる。しかしながら、各カラー画像撮影時に、最適な光源環境が異なる等の理由により、光源環境を変化させて撮影を行う必要が考えられる。画像の見えは、光源環境により大きく変化するため、それぞれの画像を3次元幾何モデルの幾何学的に整合性の取れた位置に貼り付けたとしても、画像間のつなぎ目が生じてしまうことになる。

本提案手法では、撮影された画像のクロマティシティに着目し、物体の albedo に「クロマティシティの同じ点は同じ albedo を持つ」という仮定の下で、各入力画像から擬似 albedo 画像の推定を行った。光源は1つの無限遠点光源であるが、画像計測ごとに移動し、対象物体の反射特性としては、ランバーシアンモデルを仮定している。擬似 albedo 画像推定には、クロマティシティ-Tマップと呼ぶ分布図を用いた。クロマティシティ-Tマップでは、画像クロマティシティと反射強度の関係を表したものであり、画像内の各色がどの程度の明るさを持っているかを表現したものである。推定された擬似 albedo 画像は、光源環境に依存しないので、各推定画像を3次元幾何モデルに貼り付けることにより、画像間のつなぎ目のない、仮想現実感モデルが生成される。各画素に対して独立に albedo を推定する場合、局所的な法線方向の誤差が存在する場合、推定される擬似 albedo 画像の推定誤差としてそのまま反映されてしまう。推定画像に局所的に不自然なものになってしまう。よって本提案手法では、クロマティシティの同じ値を取る領域ごとに、albedo を推定し、局所的な法線方向の誤差に対してもロバストな手法となっている。また、本提案手法で使用した物体に対する仮定についても考察を行うと共に、いくつかの物体を用いてその仮定の妥当性を確認した。また、実際に撮影されたカラー画像と3次元幾何モデルを用いて、仮想現実感モデルを生成し、その有効性を確認した。

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

本提案手法は、光源環境の異なる複数枚のカラー画像及び3次元幾何モデルが与えられると容易に適用可能であるという利点があるが、点光源であるという制約や、セルフシャドウが存在する場合には、適用が困難であるという問題点がある。これらの問題を解決する手法に関しては、次章以降で述べる。

## 参考文献

- [1] D.L.Migram, “Computer methods for creating photomosaics,” IEEE Trans. on Computers, vol.C-24, pp.1113-1119, 1975.
- [2] D.L.Migram, “Adaptive techniques for photomosaicking,” IEEE Trans. on Computers, vol.C-26, pp.1175-1180, 1977.
- [3] C. Rocchini, P. Cignomi, C. Montani, and R. Scopigno, “Multiple textures stitching and blending on 3d objects,” in Proc. of Eurographics Rendering Workshop, pp.173-180, 1999.
- [4] K. Pulli, H. Abi-Rached, T. Duchamp, L. Shapiro, and W. Stuetzle, “Acuisition and visualization of colored 3d objects,” in Proc. of Int. Conf. on Pattern Recognition, pp.11-15, 1998.
- [5] P.J. Neugebauer, and K. Klein, “Texturing 3D models of real world objects from multiple unregistered photographic views,” in Proc. EUROGRAPHICS’99, 1999.
- [6] H. Lensch, W. Heidrich, and H.P. Seidel, “Automated texture registration and stitching for real world models,” in Proc. Pacific Graphics’00, pp.317-326, 2000.
- [7] 池内克史, 倉爪亮, 西野恒, 佐川立昌, 大石岳史, 高瀬裕, “The great buddha project –大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化–”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.7, no.1, pp.103-113, 2002.

### 第3章 クロマティシティに基づく色調補正手法

- [8] E. Beauguesne, and S. Roy, “Automatic relighting of overlapping textures of a 3D model,” in Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.166-173, 2003.
- [9] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, “Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol.5, pp.1-12, 1999.
- [10] P. Debevec, “Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography,” in Proc. ACM SIGGRAPH, pp.189-198, 1998.
- [11] P.E. Debevec, and J. Malik, “Recovering high dynamic range radiance maps from photographs,” in Proc. SIGGRAPH97, pp.130-135, 1997.
- [12] Y. Sato, M.D. Wheeler, and K. Ikeuchi, “Object shape and reflectance modeling from observation,” in Proc. SIGGRAPH97, pp.379-387, Aug. 1997.

## 第4章 光源球に基づく色調補正手法

### 4.1 はじめに

3章の手法では，簡単に複数枚の画像の色調補正を行うことができる点ですぐれているが，入力画像としては，一つの点光源下の画像でなければならぬという制約があった．そこで本章では，3章の手法を発展させ，任意の光源環境下での画像に適用可能な色調補正手法を提案する．本手法でも，3章の手法と同様に，光源環境の異なる2枚の画像から，物体表面上の反射率 (albedo) が固有の値であることから，両者の画像を矛盾なく説明する光源環境を推定することにより，擬似 albedo を求めている．光源環境を推定する手法には大きく，直接法と間接法に分けることが出来る．直接法は，対象物体の位置での光源環境をカメラで直接計測し，その画像から光源環境を推定する手法である．Debevec[1] は，銀面球に写る光源環境をカメラで計測することにより光源環境を推定している．また，佐藤ら [2] は，魚眼レンズで撮影した全方位ステレオ画像を用いて光源分布を推定する手法を提案している．一方，間接法は，得られた画像の陰影を解析することにより，その画像計測時の光源環境を推定する手法である．Marschner ら [3] は，3次元形状及びその反射特性が既知の拡散反射物体を用いて，陰影情報を，3次元幾何モデルをレンダリングした基底画像の線形結合により表現し，その係数を最小二乗法により求めている．しかしながら，拡散反射物体の場合，その陰影情報のみを用いた光源環境推定は，不良設定問題であることが知られている [4, 5]．また，佐藤ら [6] は，無限遠光源環境下において，形状が既知の物体の落とすキャストシャドウを用いて，光源

環境を推定する手法を提案している．以上の手法では，主に無限遠光源環境を仮定していたが，原ら [7] は，得られた画像のスペキュラー情報を用いて近接光源の位置を推定する手法を提案している．

光源環境を考慮したテクスチャリングにおける色調補正の手法としては，3章でもふれた共通の光源環境に relighting する手法 [8] や，球面調和級数基底を用いて，Radiance environment map [9] を表現する手法 [10] 等がある．本手法は，球面調和級数基底を用いて顔画像の relighting を行う手法であり，まず，単色の色 ( $\rho$ ) をもつ球を考え，各点 (法線方向  $\vec{n}$ ) での irradiance  $E(n)$  を考え，これを radiance environmental map とする (式 (4.1)) ．

$$I_{sphere}(\vec{n}) = \rho E(\vec{n}) \quad (4.1)$$

次に同じ光源下で物体を回転し，法線方向が， $n_a$  から  $n_b$  に変化したときの画像の強度 ( $I_{object}$ ) は式 (4.2) で表される．

$$I_{object}(\vec{n}_a) = \rho_p E(\vec{n}_a), I_{object}(\vec{n}_b) = \rho_p E(\vec{n}_b) \quad (4.2)$$

ここで， $\rho_p$  は点  $p$  での物体の色である．これらの関係式及び radiance environment map の定義より，式 (4.3) が得られる．

$$\frac{I_{sphere}(\vec{n}_b)}{I_{sphere}(\vec{n}_a)} = \frac{I_{object}(\vec{n}_b)}{I_{object}(\vec{n}_a)} \quad (4.3)$$

式 (4.3) は，オブジェクト回転前後の画像強度の比は，radiance environmental map の対応する 2 点の比と等しいことを意味している．よって，radiance environmental map を推定することが出来れば，オブジェクト回転前の画像から，回転後を得ることが出来る．次に，radiance environment map を球面調和級数で近似することを考える．反射特性がランバーシアンである場合は，irradiance が低次の球面調和級数のみで近似できることが知られており [11]，Radiance environment map は球面協和級数の 9 つの基底のみを用いて展開するすることが可能である (式 (4.5)) ．

$$E(\vec{n}) \approx \sum_{l \leq 2, -l \leq m \leq l} A_l L_{lm} Y_{lm}(\vec{n}) \quad (4.4)$$

ここで，単色 ( $\rho$ ) のランバーシアン物体を考えると，反射した radiance は式 (4.5) で表せる．

$$\rho E(\vec{n}) \approx \sum_{l \leq 2, -l \leq m \leq l} \rho \hat{A}_l L_{lm} Y_{lm}(\vec{n}) \quad (4.5)$$

各  $l, m$  に対して， $\rho A_l L_{lm}$  を一つの変数であるとして扱うと，最小二乗法を用いて 9 つの変数を決定することが可能であり，radiance environment map を推定することが出来る．次に，定数ではないが低次の周波数成分を含まない albedo を持つ物体を考える（ただし定数成分は含む）．この場合の albedo は，式 (4.6) で表すことが出来る．

$$\rho(\vec{n}) = \rho_{00} + \Psi(\vec{n}) \quad (4.6)$$

ここで， $\rho_{00}$  は定数であり， $\Psi(\vec{n})$  はそれ以外の高次の成分である．式 (4.5) を考慮すると式 (4.7) を得る．

$$\rho(\vec{n}) E(\vec{n}) \approx \rho_{00} \sum_{l \leq 2, -l \leq m \leq l} A_l L_{lm} Y_{lm}(\vec{n}) + \Psi(\vec{n}) \sum_{l \leq 2, -l \leq m \leq l} A_l L_{lm} Y_{lm}(\vec{n}) \quad (4.7)$$

ここで， $\Psi(\vec{n})$  が  $l = 1, 2, 3, 4$  の成分を含まないとすると，球面調和級数の性質より式 (4.7) の第 2 項は  $l \geq 3$  の成分のみを含む．上記及び球面調和級数の直交性より， $l \leq 2$  の項を用いて最小二乗法を適用することにより 9 つの係数 ( $\rho_{00} A_l L_{lm}$ ) が得られる．式 (4.5) を考慮すると radiance environment map が得られ，式 (4.3) にしたがって relighting を行うことが可能である．本手法の適用結果を図 4.1 に示す．真中の画像が元の画像であり，下の段が，光源環境を回転させた場合の合成画像であり，上の段が，真の画像である．両者を比較するとよく見えが一致していることが確認できる．また，Duら [12] によって，固定視点，光源環境固定の条件の下で，ランバーシアン物体を移動させて計測された複数枚の画像から，albedo を復元する手法が提案されている．本手法でも，Wenら [10] の手法と同様に，光源環境を球面調和級数基底を用いており，画像間の比を取ることで，albedo を推定している．

これまでの述べたような光源環境を球面調和級数で展開した基底画像を用いる手法では，9 つの係数を決定するだけで良く，凸なランバーシアン物体に対しては非常に有効な手法であると考えられる．しかしながら，光源環境を球面



図 4.1: 合成画像と実画像との比較．上の段が実画像，下の段が合成結果 [10]．

調和級数で展開した基底画像を用いる利点は，凸なランバーシアン物体を撮影した画像には，光源環境の低周波成分のみしか寄与しないことを用いており，画像にセルフシャドウのような影が存在する物体の場合に，光源環境を球面調和級数で展開することは困難である．そこで，本章では，画像にセルフシャドウが存在する場合にも色調補正を適用可能にするために，光源環境を点光源下でレンダリングされた多数の基底画像で展開することとしている．

## 4.2 基底画像を用いた光源環境の表現

第3章の手法は擬似 albedo を容易に推定することができ、点光源下の画像に対しては非常に有効である。しかしながら、この手法はセルフシャドウがあるような画像や一般的な光源環境下の場合に適用する事は困難である。本章では、光源球の概念に基づいて第3章の手法を拡張し、上記の場合について適用可能にする。この手法では、光源は、任意の無限遠面光源であり、テクスチャ撮影ごとに光源環境が変化するものとする。また、物体の反射特性はランバertianと仮定する。入力データは、第3章と同様に複数枚のテクスチャと距離センサで計測された3次元幾何モデルである。本手法では、複数の画像間のR, G, B各バンドに対して、独立に色調補正を行っており、以下では、画像としてR, G, Bの各バンドの画像を考える。

まず始めに、光源球の概念を導入する。物体を中心として、半径が無限大の球面を考え、その球面上の各点はその方向での光源の強度を表すとし、これを光源球と呼ぶ。光源球は、物体が置かれているシーンの光源環境を表す。本手法では、光源球を球面上の点光源の集まりとして近似する(図4.2)。 $A^m(x_1)$ を点光源( $m$ )下で、各入力画像と同じカメラパラメータを用いて3次元幾何モデルをレンダリングした画像とする。ただし、このときの反射特性はモデル上の全ての点で同一のランバertianパラメータを用いる。ここで、 $x_1$ は画像のピクセルの指標である。この画像を以降、基底画像と呼ぶことにする(図4.4:ブロック(a1),(a2))。基底画像の例を図4.3に示す。本基底画像は、光源環境を基に反射モデルに基づくレンダラーである radiance[13]を用いてレンダリングした。本基底画像は、3つの各球上に円錐を乗せた仮想的な物体であるが、図4.3より分かるように、基底画像に、各円錐が球面に落とす影(セルフシャドウ)も情報として含んでいる。本手法では、点光源の基底画像を用いることにより、光源情報を球面調和級数の低次成分で展開した時とは異なり、セルフシャドウも考慮することが可能である。

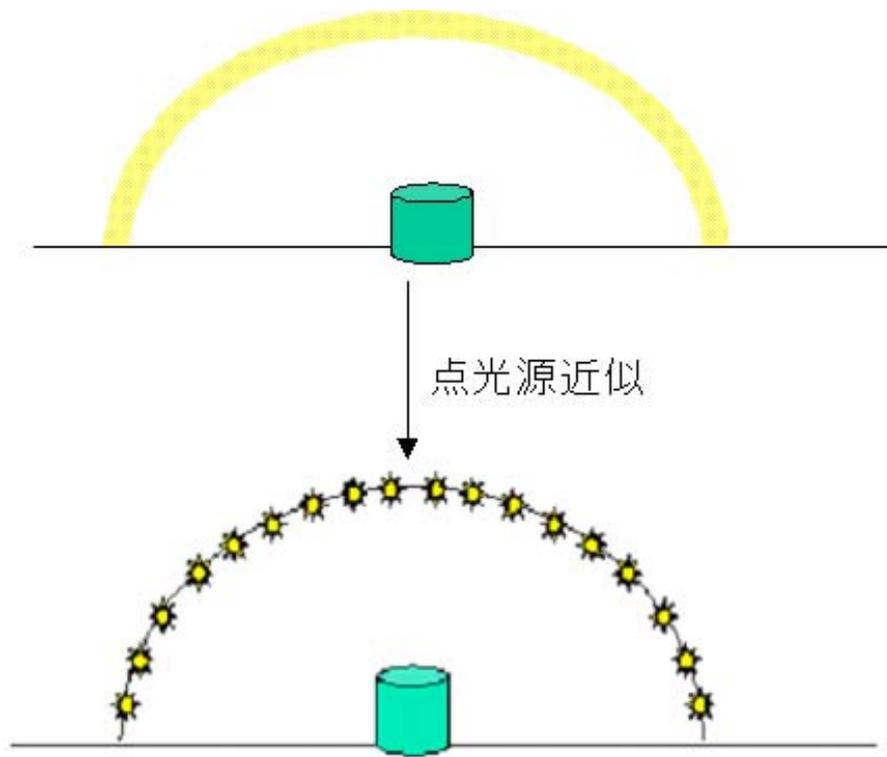


図 4.2: 点光源による光源環境の近似

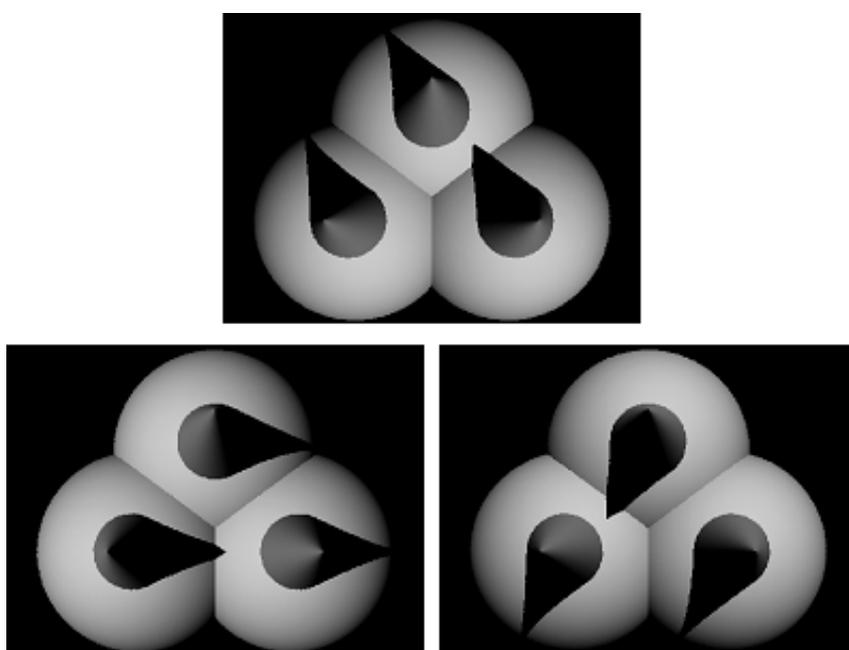


図 4.3: 基底画像の例

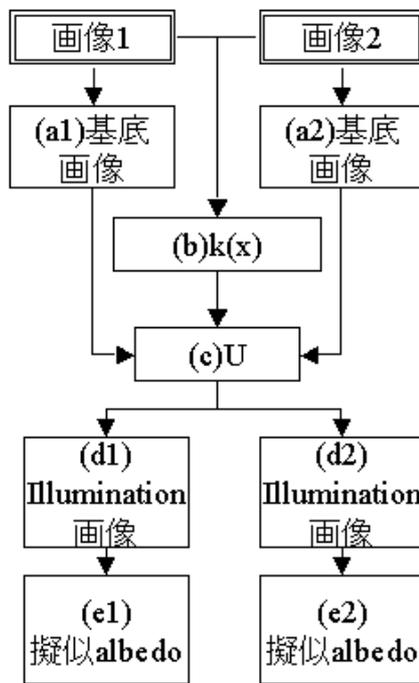


図 4.4: 光源球に基づく色調補正の概要

### 4.3 色調補正手法

$I_1(x_1), I_2(x_2)$  を異なる光源環境下で撮影された2枚の入力画像とする．画像の線形成により，各画像に対して以下の式が成立する．

$$\begin{aligned} I_n(x) &= S(x_n)(a_n^1 A_n^1(x_n) + \dots a_n^m A_n^m(x_n) + \dots a_n^M A_n^M(x_n)) \\ &= S(x_n)L_n(x_n) \end{aligned} \quad (4.8)$$

ここで， $m = \{1, 2, \dots, M\}$ ， $n = \{1, 2\}$ ， $x_n$ ， $S(x)$ ， $a_n^m$  はそれぞれ，基底画像の指標，入力画像の指標，ピクセルの指標， $x_n$  における albedo，求めるべき基底画像の係数である． $L_n(x_n)$  は入力画像の陰影情報を表現しており，以降，illumination 画像と呼ぶことにする．ここで，illumination 画像を推定することが出来れば，式 (4.8) より albedo を推定することが可能である．先に述べた通り，illumination 画像は陰影情報を表現しているため，セルフシャドウ領域の albedo も推定することが可能である．

次に，3次元幾何モデル上のある点( $X$ )を考え，この点を  $I_1, I_2$  撮影時のカメラパラメータで2次元に射影した点が  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$  に射影される，つまり， $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$  は物体上で同じ点を表すとし， $k(X) = I_1(\tilde{x}_1)/I_2(\tilde{x}_2)$  を定義する(図 4.4: ブロック (b))．式 (4.8) を用いると， $k(X)$  は以下の通り表せる．

$$k(X) = \frac{a_1^1 A_1^1(\tilde{x}_1) + \dots + a_1^m A_1^m(\tilde{x}_1) + \dots + a_1^M A_1^M(\tilde{x}_1)}{a_2^1 A_2^1(\tilde{x}_2) + \dots + a_2^m A_2^m(\tilde{x}_2) + \dots + a_2^M A_2^M(\tilde{x}_2)} \quad (4.9)$$

さらに，式 (4.9) が物体上の各点( $X = \{X_1 \dots X_l \dots X_L\}$ ) に対して成立するので，以下の式を得る(図 4.4: ブロック (c))．

$$\mathbf{U}\mathbf{a} = 0 \quad (4.10)$$

ここで，

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} A_1^1(\tilde{x}_{1,1}) & \dots & A_1^M(\tilde{x}_{1,1}) & -k(X_1)A_2^1(\tilde{x}_{1,2}) & \dots & -k(X_1)A_2^M(\tilde{x}_{1,2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_1^1(\tilde{x}_{l,1}) & \dots & A_1^M(\tilde{x}_{l,1}) & -k(X_l)A_2^1(\tilde{x}_{l,2}) & \dots & -k(X_l)A_2^M(\tilde{x}_{l,2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_1^1(\tilde{x}_{L,1}) & \dots & A_1^M(\tilde{x}_{L,1}) & -k(X_L)A_2^1(\tilde{x}_{L,2}) & \dots & -k(X_L)A_2^M(\tilde{x}_{L,2}) \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{a} = \left( a_1^1 \cdots a_1^M a_2^1 \cdots a_2^M \right)^t \quad (4.12)$$

Uは入力画像及び3次元幾何モデルより生成した基底画像から決定することが可能な既知の行列であり，aが決定すべき2枚の画像の光源環境を表す係数である．ここで，aは式(4.8)で定義されており，各点光源下でレンダリングされた3次元幾何モデルの線形結合の係数であるため，真の光源環境分布を表す場合は，必ず非負の値をとる．また，式(4.11)は，一般的には不定であるが，真の光源環境を表す，非負の解が必ず存在するが，スケールのあいまい性は残されることとなる．よって，aに対して，式(4.13)の制約を設けることにする．

$$\sum_{m=1}^M (a_1^m)^2 + (a_2^m)^2 = 1 \quad (4.13)$$

以上，まとめると，式(4.14)の制約条件の下で式(4.10)を最小化する，光源環境を表す係数aを決定する．

$$a_1^m \geq 0, a_2^m \geq 0, \sum_{m=1}^M (a_1^m)^2 + (a_2^m)^2 = 1 \quad (4.14)$$

さらに，式(4.8)を考慮すると，各入力画像に対して，albedoを推定することが可能である(図4.4:ブロック(e1)及び(e2))．先に述べたとおり，4.13の制約条件の下での推定されたaは，スケールのあいまい性が残っているが，各画像の3次元モデル上で同じ点は同じ色になるようなスケール係数を最小二乗法により決定し，どちらか一方の画像を他方にあわせることにより，スケール問題は解決する．各入力画像から推定されたalbedoを3次元幾何モデルに貼り付けることにより，テクスチャ間の色調の連続性の保たれた3次元モデルが得られる．なお，ランバーシアン物体の画像は高周波成分が含まれていないため，画像及び3次元モデルより正確な光源分布を推定することは困難である[3]が，重要なことはテクスチャの色調補正を行うという目的においては，実際の光源分布を推定する必要はなく，入力画像の陰影を説明する光源分布を推定するだけで良いということである．

本章のこれまでの議論は，R,G,B各バンド独立に色調補正を行っているため，各バンド間のスケールのあいまい性が残されるが，一枚の入力画像で各バ

#### 第4章 光源球に基づく色調補正手法

ンドの相対的な関係を任意に決定すれば，他の画像に対しても同じ関係を適用することにより，画像間の色調の不連続性は除去することが出来る．

## 4.4 手法の適用可能性

本手法では、未知の albedo を持つランバーシアン物体の写っている光源環境の異なる画像から、擬似 albedo を推定する手法であるが、albedo が既知のランバート物体から、光源環境を推定する Marschner ら [3] による Inverse lighting の手法が存在する。本提案手法と Inverse lighting の前提条件を比較の表 4.1 に示す。Inverse lighting では、 $v_1, \dots, v_m$  を画像 ( $m$  画素) の強度とし、光源環境

表 4.1: Inverse Lighting との比較

|          | 提案手法 | Inverse Lighting |
|----------|------|------------------|
| 3次元形状    | 既知   | 既知               |
| 反射特性     | 未知   | 既知               |
| 光源環境     | 未知   | 未知               |
| カメラパラメータ | 既知   | 既知               |

は、 $R_{j,i}$  をある基底光源下で反射率既知のモデルをレンダリングした画像 (基底画像) の線形結合 (係数  $\alpha_i$ ) で表している (式 (4.15))。

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ v_j \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & & \\ \cdots & R_{j,i} & \cdots \\ \vdots & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \alpha_i \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

また、簡単に  $\hat{I} = \hat{R}\hat{L}$  と表すことにする。ここで、 $\hat{I}$  及び  $\hat{R}$  は入力画像及びレンダリングされた基底画像から既知の値であるので、式 (4.15) を解くことにより基底画像の線形結合係数を推定することが可能である。

しかしながら、本手法は、BRDF がなめらかな場合は、BRDF がローパスフィルターとして作用してしまうため、ill-conditioned であり、ill-posed であることが知られている [4, 5]。これは、滑らかな BRDF により、式 (4.15) 中の  $\hat{R}$  のランクが小さくなっていることに対応する。これは特に物体表面の BRDF がランバーシアンの時に顕著であり、以降、反射特性がランバーシアンの場

合に限定する．ここで，ill-conditionedの意味するところは，撮影された画像では，ランバーシアン特性により，光源の情報量が削減されているので，ランバーシアン物体を撮影した画像から正確な光源環境を求めることが困難であるということである．これは，任意の点光源下の画像は，全ての点に光が入射しているとすれば，線形独立な3枚の点光源下の画像の線形結合で表される[14]ことに対応している．つまり，撮影された画像から光源環境を推定する時には，あいまい性が残ることになる．一方，ill-posedの意味するところは，式(4.15)において， $\hat{R}$ がランク落ちしているため， $\hat{L}$ を求めることが，数値計算的に不安定であるということであり，入力画像 $\hat{I}$ のわずかなノイズが $\hat{L}$ の推定結果に大きく影響を与えてしまうことになる．

次に，このような inverse lighting の問題が本章で提案している光源球を用いた色調補正手法にどのような影響を与えるかを以下に考察する．まず，大前提として，本提案手法の目的は，光源環境を求めることにあるのではなく，光源環境の異なる2枚の画像を3次元幾何モデル上で，色調の不連続なくつなぎ合わせることであり，本手法では，2枚の画像から，色調の不連続なくつなぎ合わせるために必要な陰影画像を求めている．つまり，対象物体の真の光源情報が求まらなくても，それぞれの画像から必要な陰影情報さえ求まれば良いという点で，inverse lighting の手法とは異なる．

以上のことを踏まえて，まず，ill-posedの問題について以下に述べる．Inverse lighting における ill-posed の問題は，撮影された画像では，ランバーシアン特性により光源情報の高周波成分が除去されてしまい，陰影画像からでは，光源分布の高周波成分が求まらないという点にあった．しかしながら，先に述べたとおり本提案手法の目的は，光源情報を求めるのではなく，2枚の画像の陰影情報を推定することにあるので，陰影情報推定の時に必要な光源分布が，どのようなものであっても，推定された陰影画像さえ要件を満たしてさえすれば良い．つまり，光源分布が，高周波成分を含んでいるか，低周波成分のみかにかかわらず，推定された陰影画像が2枚の画像間で矛盾していなければ良いことになる．このため，本提案手法では，確かに，ill-posedの問題を含んでいるが，2枚の画像から得られた陰影画像を生成する際には，光源環境を推定し，その光源環境の下での陰影画像を生成するという2つのプロセスで相殺されること

になる。それぞれの画像から陰影画像を推定することが出来れば，入力画像を用いて，擬似 albedo が推定可能であり，3次元幾何モデル上に貼り付けることにより，画像間のつなぎ目のない仮想現実感モデルを生成することが出来る。

次に，ill-conditioned の問題について以下に述べる。Inverse lighting における ill-conditioned の問題は，式 (4.15) において，入力画像の誤差が推定される光源環境に大きく影響を与えると言う数値計算上の問題であり， $\hat{R}$  がランク落ちしていることに起因している。実際，球状の物体を 720 個を物体を覆う球面上の各点に配置された点光源下でレンダリングした基底画像より求めた  $\hat{R}$  の特異値分解を行い，その特異値 (図 4.5) 及び特異値累積寄与率 (図 4.6) を求めると，非常に低次の項のみで表現可能であることが確認できる。しかしなが

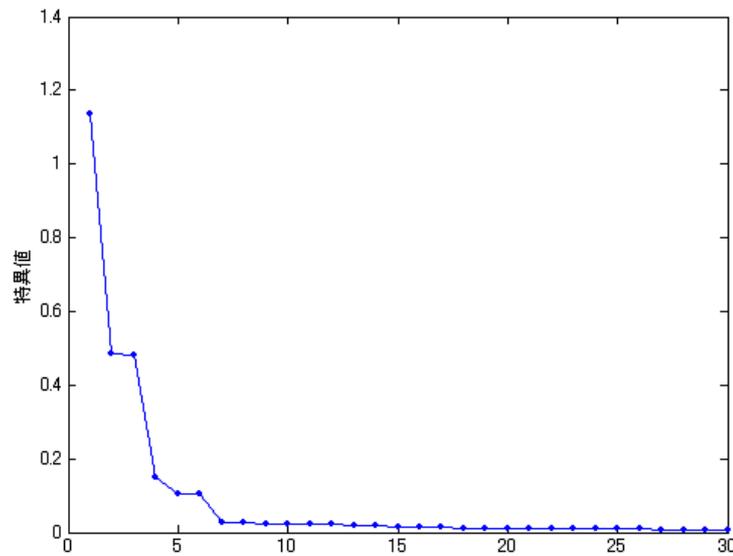


図 4.5: 基底画像の特異値

ら，推定誤差が非常に大きい場合でも，推定された光源環境の下で，画像撮影時と同じ視点の画像を再構成した画像は，入力画像とほぼ同じものが得られる

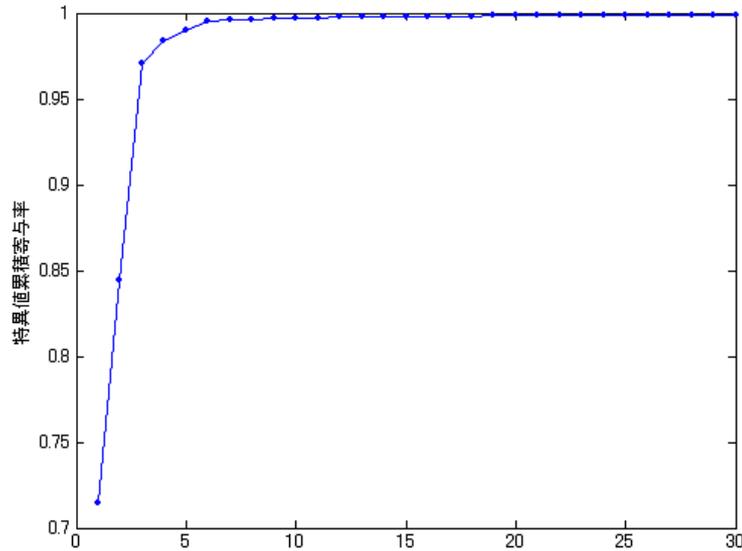


図 4.6: 基底画像の特異値累積寄与率

はずである．これを示すために、以下の線型方程式 ( $Ax = b$ ) を考える．

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1.0001 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 3.0001 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

ここで、この方程式の真の解は  $x = (1, 1)^t$  であるが、 $\hat{x} = (3, 0)^t$  を考えるとその残差は以下のとおりである．

$$r = b - |A\hat{x}| = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.0002 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

よって  $|r| = 0.0002$  となり非常に小さい値となる．つまり、推定される解の真の解と誤差が非常に大きい場合でも残差を考えると当然のことながら小さくなる．またこのことを実際には CG 画像を用いて確認を行った．図 4.7 に球状の形状をレンダリングした画像 (図 4.7(a)) 及びその画像に 256 階調で標準偏差が 2.6 のガウシアンノイズを加えた画像 (図 4.7(c)) を入力画像として、Inverse lighting により光源環境を推定し、推定された光源環境を基に同じ視点の画像

を再構成した結果を示す．図 4.7(b) が，ノイズの無い画像から再構成された結果であり，図 4.7(d) が，ノイズを付加した画像から再構成された結果である．ノイズがある無しにかかわらず推定された係数を用いて再構成された結果はほとんど変わらないことが確認できる．また，両者の差分の絶対値のヒストグラムを示す．また，ノイズの強度を変化させて同様の実験を行ったが，結果はほとんど変わらず，両者の差は非常に小さいことが確認できる (表 4.2) ．

表 4.2: Inverse Lighting の入力画像にノイズを加え，推定された光源環境を用いて再構成された画像における入力画像との誤差

| ノイズの標準偏差 | 平均絶対差分 |
|----------|--------|
| 0(ノイズ無し) | 0.5    |
| 0.8      | 0.5    |
| 1.8      | 0.5    |
| 2.6      | 0.5    |
| 5.7      | 0.5    |
| 8.0      | 0.5    |

一方で，本提案手法では，先に述べた ill-posed と同様の議論を行うことができる．本提案手法における式  $Ua = 0$  が，inverse lighting における式  $\hat{I} = \hat{R}\hat{L}$  に対応する．ここで， $\hat{R}$  のランクが物体の 3 次元形状に依存するのに対して， $U$  のランクは，2 枚の画像の光源環境の差異により決定される．また，いずれの場合もランク落ちしている推定される線形結合係数には大きな誤差が蓄積していることが考えられる．しかしながら，先ほどの議論と同様に，推定された係数により再構成される陰影画像から得られる擬似 albedo 画像間の差分は，小さくなっているはずである．これに関しても先ほどと同様に CG 画像を用いて実験を行う．図 4.8 にノイズを付加しない入力画像を，図 4.9 に標準偏差 2.6 のガウシアンノイズを付加した場合の入力画像を用いて色調補正を行った結果を示す．どちらも，左側が画像 1 に右側が画像 2 に対応しており，上から，入力画像，推定された陰影画像，推定された擬似 albedo 画像となっている．ノイズを付加しない場合，正確に色調補正が出来ているのは，もちろんのこと，ノイズを付加した場合においても，陰影画像は正しく推定できている．入力画

## 第4章 光源球に基づく色調補正手法

像にノイズを付加してあるため，推定された擬似 albedo 画像にも若干ノイズが見られるが，全体的に見れば，両者の画像から推定された擬似 albedo はほぼ等しく，実際，両者の差分ヒストグラムを取ると，図 4.9 となりよく一致していることが確認できる．また，入力画像に加えるノイズの標準偏差と推定される擬似 albedo 画像間の絶対差分の平均値を図 4.11 に示す．ノイズを付加することにより，推定結果は影響を受けるが，わずかなノイズで劇的に結果が影響を受けるといような ill-conditioned の問題に関しても，テクスチャリングのための色調補正を行うという目的に関しては，ill-posed の問題と同様に相殺されている．

#### 第4章 光源球に基づく色調補正手法

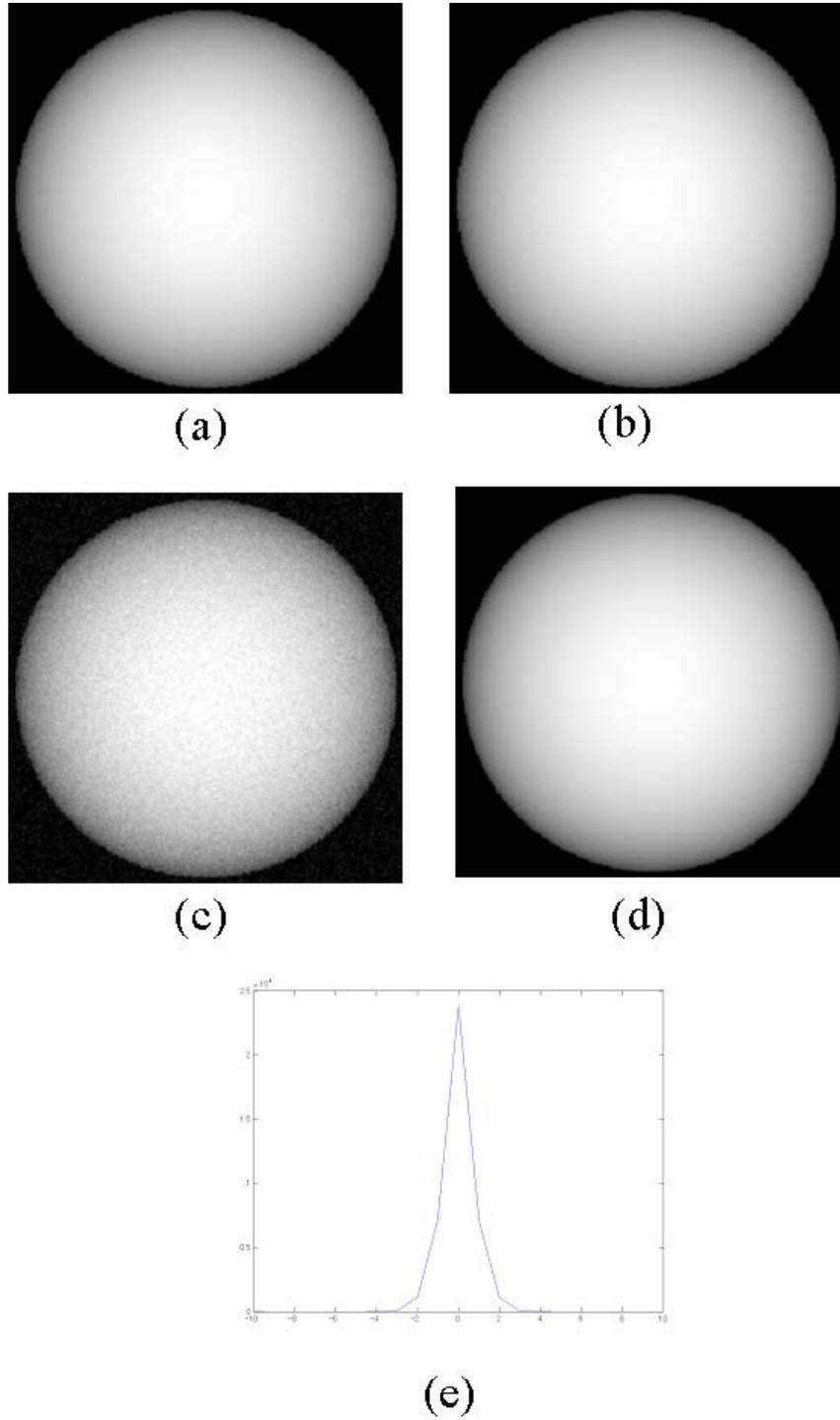


図 4.7: Inverse lighting におけるノイズの影響 : (a) 入力画像, (b) a の推定結果<sup>90</sup>を用いて再構成された画像, (c) a に標準偏差 2.6 のガウシアンノイズを付加した画像, (d) c の推定結果を用いて再構成された画像, (e) d と b の差分ヒストグラム

#### 第4章 光源球に基づく色調補正手法

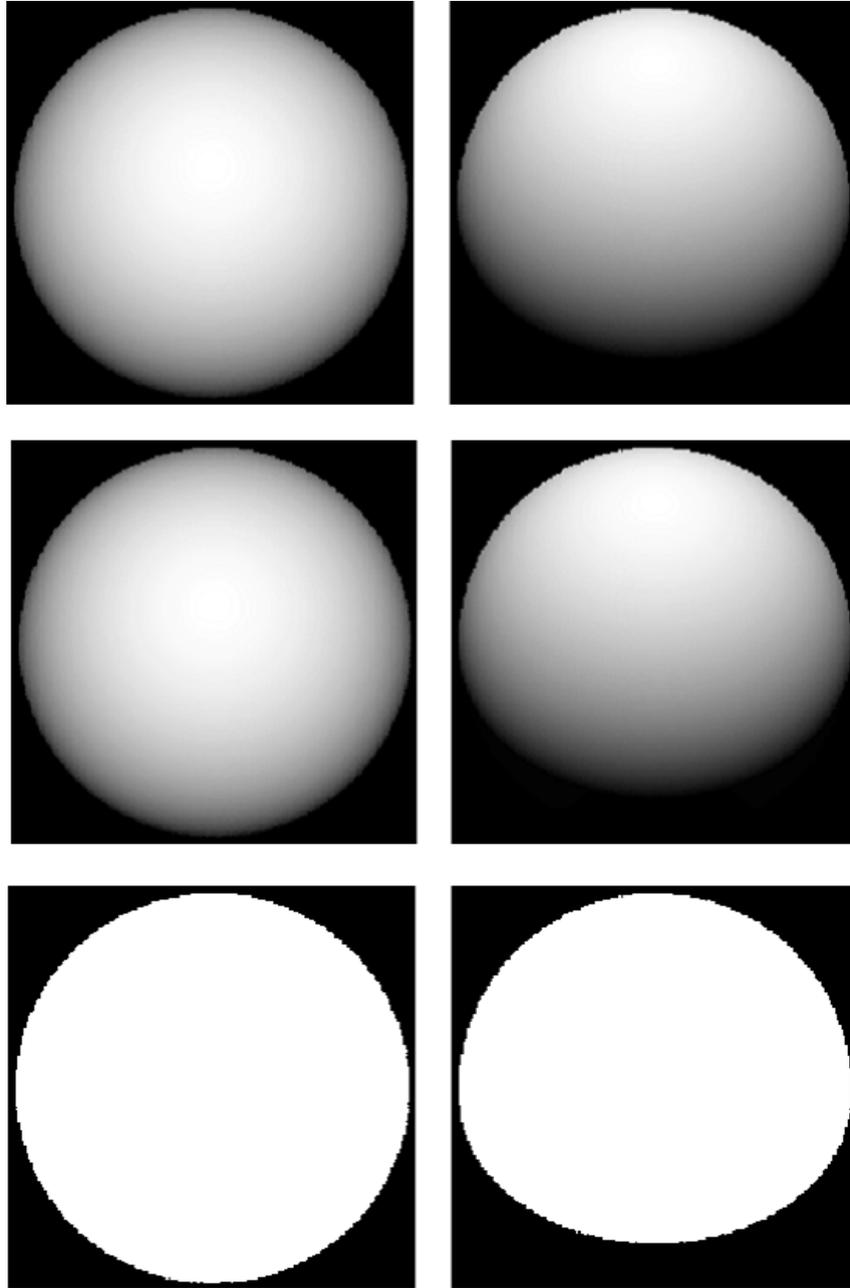


図 4.8: 光源球を用いた色調補正手法 (図 4.9 と比較) : 左が画像 1 , 右が画像 2 に対応 . 上から , 入力画像 , 推定された陰影画像 , 推定された擬似 albedo

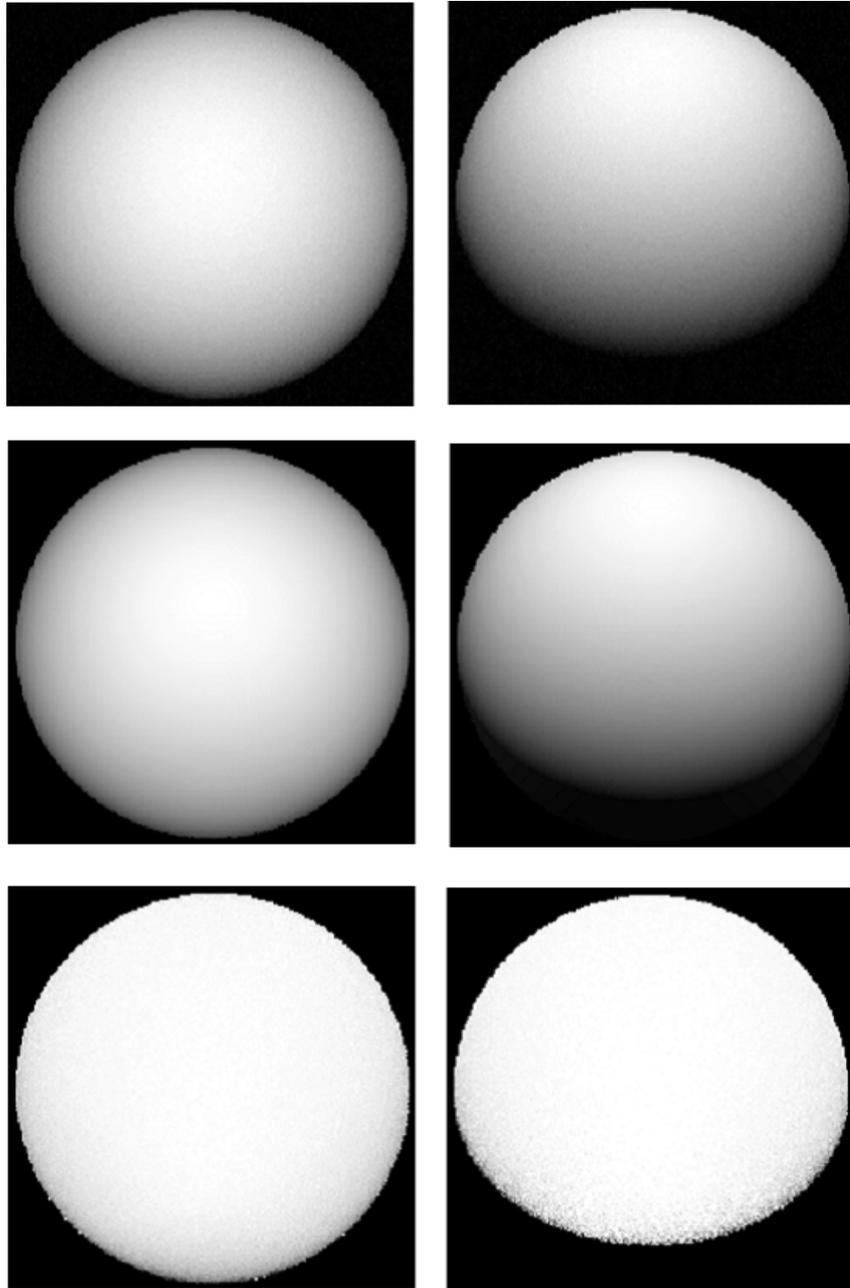


図 4.9: 光源球を用いた色調補正手法におけるノイズの影響：左が画像 1，右が画像 2 に対応．図 4.9 の入力画像に標準偏差 2.6 のガウシアンノイズを付加．上から，入力画像，推定された陰影画像，推定された擬似 albedo

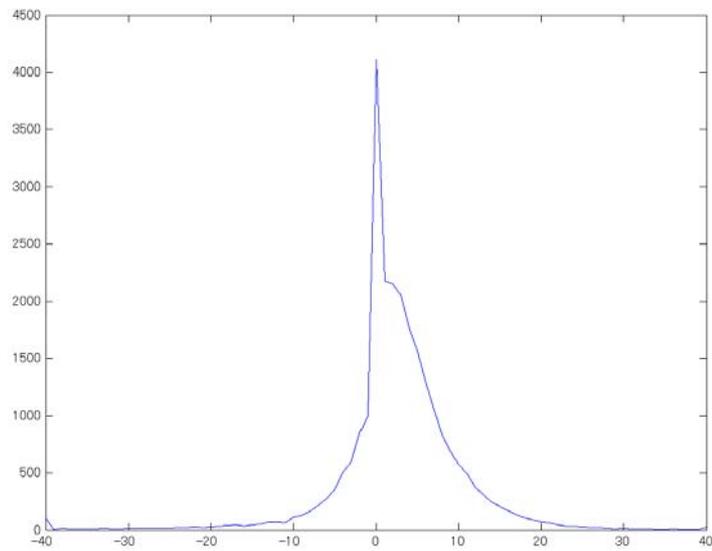


図 4.10: 光源球を用いた色調補正手法 (入力画像に標準偏差 2.6 のガウシアンノイズを付加) における補正済み画像の差分ヒストグラム

## 第4章 光源球に基づく色調補正手法

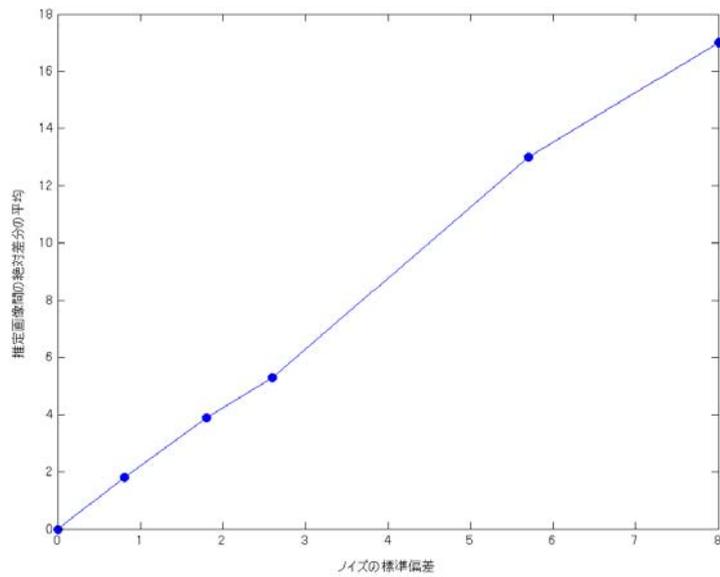


図 4.11: x 軸が入力画像に付加したノイズの標準偏差, y 軸が補正済み画像の絶対差分の平均値

## 4.5 実験

まず始めに，光源球に基づく色調補正の手法を CG 画像に適用した結果を示す．この実験では，二枚の入力画像の視点は同じで，光源環境のみを変化させた．図 4.12(a) 及び (d) が入力画像であり，赤，青，緑の3つの各球の上に同色の円錐が立っている物体をレンダリングしたものである．それぞれの入力画像から illumination 画像を推定し（図 4.12(b) 及び (e)），光源が当たっている部分に関して，擬似 albedo を推定した（図 4.12(c) 及び (f)）．各入力画像より推定された擬似 albedo は，ほぼ一致している．また，本手法がセルフシャドウの部分についても有効であることが確認できる．

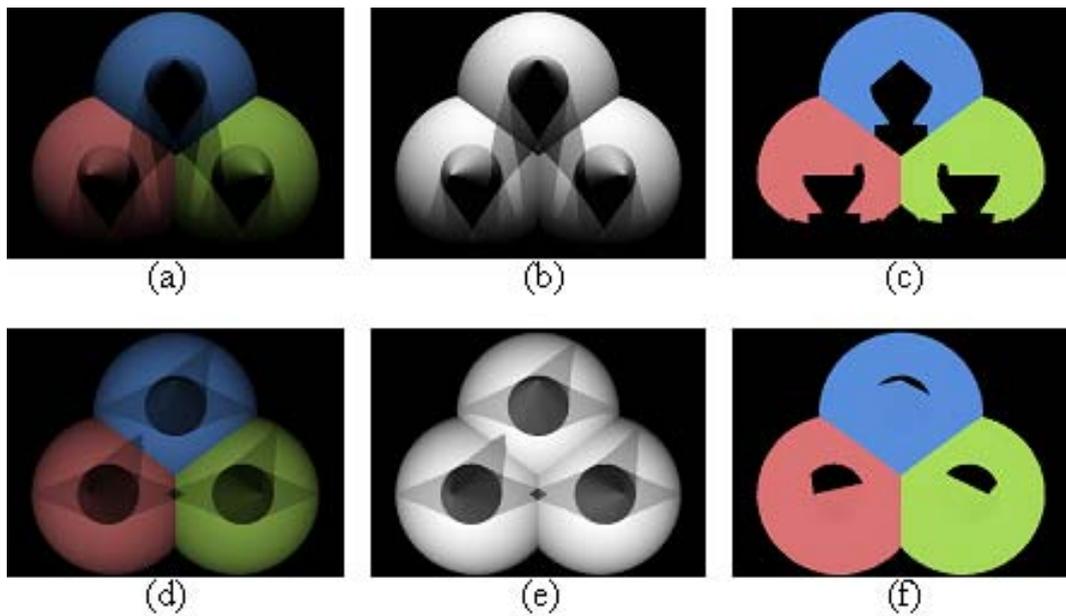


図 4.12: CG 画像への適用結果．入力画像:(a) 画像 1，(d) 画像 2．推定された illumination 画像:(b) 及び (e)．推定された擬似 albedo 画像:(c) 及び (f)．上の行が画像 1 に，下の行が画像 2 に対応する．

次に，本手法を実画像に対して適用した結果を示す．入力画像及び 3 次元幾何モデルは，第 2 章と同様にして計測した．本実験では，異なる視点及び異なる

## 第4章 光源球に基づく色調補正手法

る光源環境で得られた2枚の画像を用いている。第2章と同様にカメラパラメータを推定し、基底画像を作成した。また、カメラパラメータが既知であるので、2枚の入力画像の対応するピクセルも既知である。

まず、色調補正前の画像を3次元幾何モデルに貼り付けた結果を図4.13に示す。図4.13の中央部にテクスチャ間のつなぎ目が縦方向に存在している。次に、各入力画像(画像1及び画像2)から推定された擬似 albedo を3次元幾何モデルに貼り付けた結果を図4.14に示す。3次元幾何モデル上で、複数のテクスチャに対応している点に関しては、視線方向とその点の法線方向のなす角度が一番小さいテクスチャをその点のテクスチャとして採用した。図4.13と比較すると、テクスチャ間のつなぎ目はほとんど見られないことが確認できる(図4.14(b))。画像1及び画像2から推定された擬似 albedo の差分の絶対値を図4.15に示す。黒い部分、白い部分はそれぞれ、各バンドを256階調で表現した場合の差の絶対値が10未満、10以上であることを示している。また、色調補正前後の差分のヒストグラムを図4.16に示す。色調補正を行うことにより、画像間の色の差が小さくなったことが確認できる。



図 4.13: 色調補正前の画像を貼り付けた結果

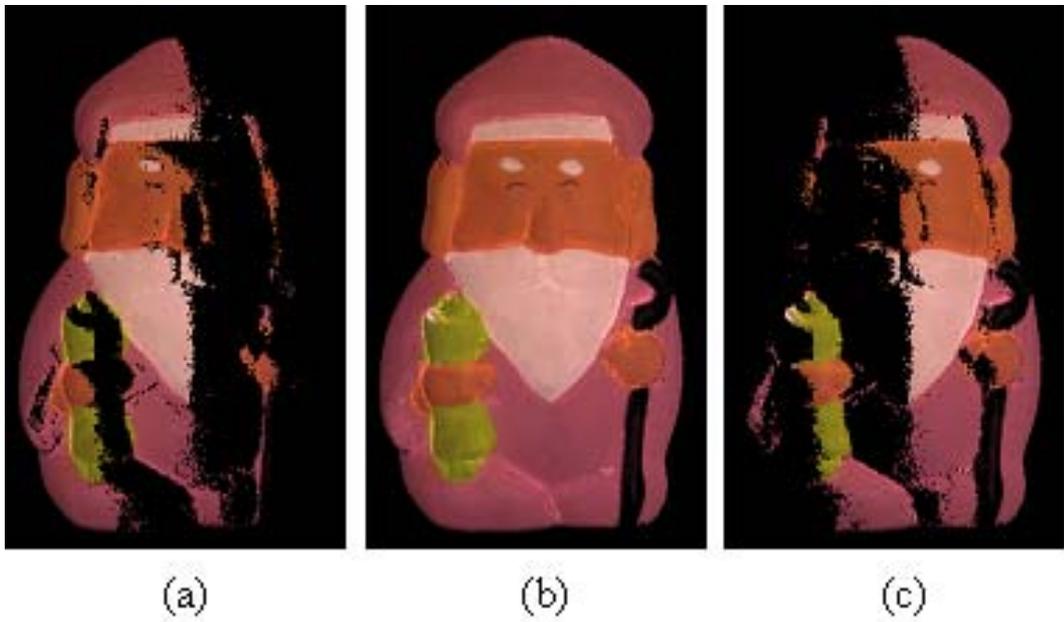


図 4.14: 推定された擬似 albedo: (a) 画像 1 , (b) 画像 1 及び画像 2 , (c) 画像 2

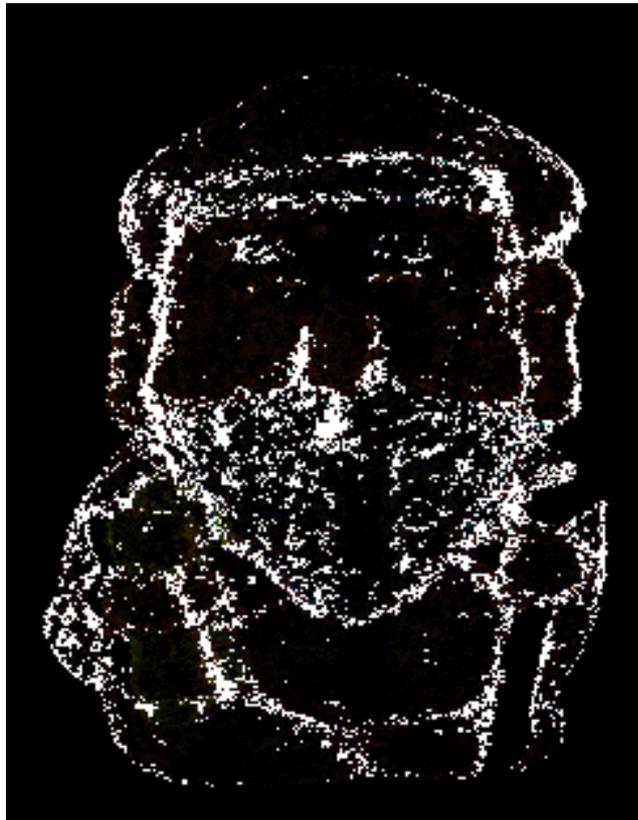


図 4.15: 画像 1 及び画像 2 から推定された擬似 albedo の差分の絶対値

#### 第4章 光源球に基づく色調補正手法

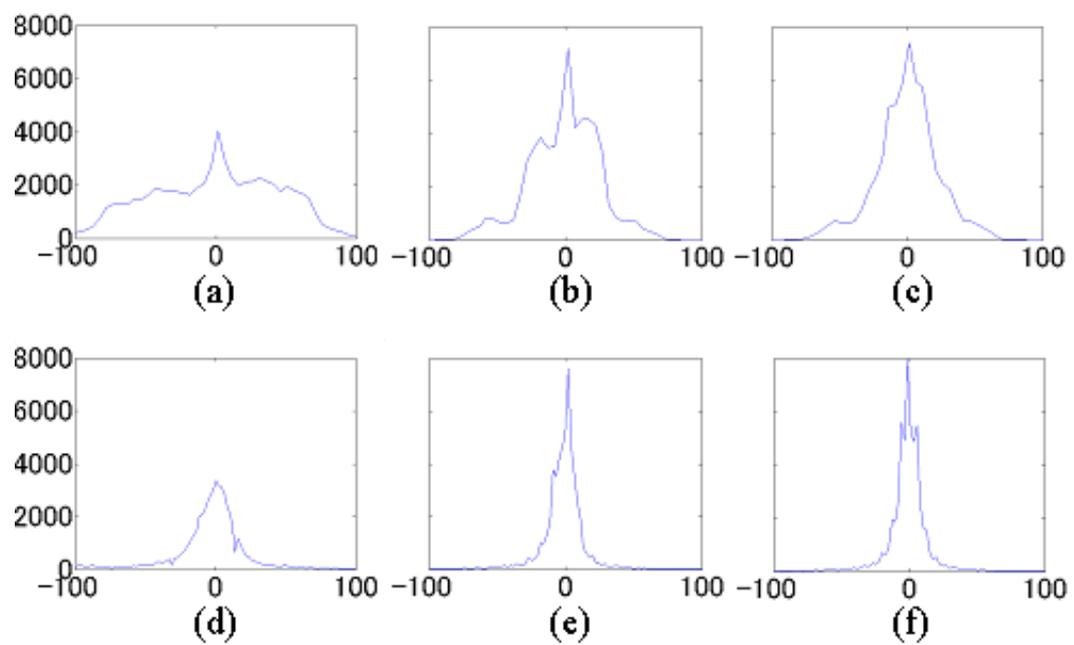


図 4.16: 画像1と画像2の差分ヒストグラム:(a) 色調補正前 red バンド, (b) 同 green バンド, (c) 同 blue バンド, (d) 色調補正後 red バンド, (e) 同 green バンド, (f) 同 blue バンド

## 4.6 まとめ

3章の手法では、簡単に複数枚の画像の色調補正を行うことができるですが、入力画像は一つの点光源下の画像でなければならないという制約やセルフシャドウが存在する画像に対しては適用困難であるという問題点が合った。そこで本章では、前章の手法を発展させ、任意の光源環境下での画像に適用可能な色調補正手法を提案した。本手法でも、3章の手法と同様に、光源環境の異なる2枚の画像から、物体表面上の反射率(albedo)が固有の値であることから、両者の画像を矛盾なく説明する光源環境を推定することにより、擬似 albedo を求める手法を提案した。本提案手法では、光源環境を、多数の点光源で近似し、各点光源下で3次元幾何モデルをレンダリングした画像の線形結合を用いて、画像の陰影情報を表現した。点光源下の画像を用いているので、密に点光源を配置することにより、セルフシャドウのある画像に対しても適用可能である。また、本提案手法における光源環境推定に用いられる方程式は、Inverse Lighting における方程式と類似しており、Inverse Lighting における ill-posed, ill-conditioned の問題が本提案手法にどのような影響を与えるかの検討を行った。Ill-posed, ill-conditioned の問題とも、光源推定及び推定された光源から陰影情報の再構成という一連の処理において、相殺されてしまい、擬似 albedo を推定するためには、影響を与えないことを確認した。また、CG 画像、実画像に対して本手法を適用し、その有効性を確認した。

## 参考文献

- [1] P. Debevec, "Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography," in Proc. ACM SIGGRAPH, pp.189-198, 1998.
- [2] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene," vol.5, no.1, pp.1-12, 1999.
- [3] S.R. Marschner, and D.P. Greenberg, "Inverse lighting for photography," in Proc. IS&T/SID Fifth Color Imaging Conference, pp.262-265, Nov. 1997.
- [4] R. Ramamoorthi, and P. Hanrahan, "A signal-processing framework for inverse rendering," in Proc. ACM SIGGRAPH, pp.117-128, 2001.
- [5] R. Basri, and D.W. Jacobs, "Lambertian reflectance and linear subspaces," IEEE Trans. PAMI, vol.25, no.2, pp.218-233, 2003.
- [6] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Illumination distribution from brightness in shadows: Adaptive estimation of illumination distribution with unknown reflectance properties in shadow regions," in Proc. ICCV, pp.875-882, 1999.
- [7] K. Hara, K. Nishino, and K. Ikeuchi, "Determining reflectance and light position from a single image without distant illumination assumption," in Proc. ICCV2003, pp.560-567, 2003.

- [8] E. Beaulieu, and S. Roy, “Automatic relighting of overlapping textures of a 3D model,” in Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.166-173, 2003.
- [9] B. Cabral, M. Olano, and P. Nemeč, “Reflection space image based rendering,” in Proc. SIGGRAPH, pp.165-170.
- [10] Z. Wen, Z. Liu, and T. Huang, “Face relighting with radiance environment maps,” in Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), vol.2, pp.158-165, 2003.
- [11] R. Ramamoorthi, and P. Hanrahan, “An efficient representation for irradiance environment maps,” in Proc. SIGGRAPH 2001, vol.24, no.10, 2002.
- [12] F. Du , T. Okabe , Y. Sato, and A. Sugimoto , “Reflecdtance estimation under complex illumination ” 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告 , vol.2003-CVIM-140-7, pp.49-56 , 2003.
- [13] <http://radsite.lbl.gov/radiance>.
- [14] A. Sashua, “On photometric issues in 3d visual recognition from a single 2d image,” International Journal of Computer Vision (IJCV), vol.21, no.1/2, pp.99-122, 1997.

## 第5章 結論

本論文では、3次元幾何モデルのテクスチャリングを用いて、実物体を観測することにより仮想現実感モデルを生成する一連の手法について述べた。3次元幾何モデルのテクスチャリングとは、デジタルカメラで計測されたカラー画像を距離センサで計測された3次元幾何モデルに貼り付ける手法であり、大きく幾何学的問題と光学的問題に分けられる。また、仮想現実感モデリングの処理の大まかな流れは、以下のとおりである。

- カラー画像/3次元幾何モデル計測
- カメラパラメータ推定
- カラー画像間の色調補正
- カラー画像貼り付け

カメラパラメータ推定が幾何学的問題であり、カラー画像撮影時のカメラと距離画像計測時の距離センサの相対的な位置関係(カメラパラメータ)を決定することである。カメラパラメータが推定されるとカラー画像を3次元幾何モデル上に幾何学的な整合性が取れた状態で貼り付けることが可能である。しかしながら画像撮影時の光源環境が異なる場合は、各カラー画像を3次元幾何モデル上の正確な位置に貼り付けたとしても画像間のつなぎ目が生じてしまうため、画像間の色調補正を行う必要があり、本論文中で、光学的問題として検討を行っている。このようなテクスチャリングにおける幾何学的問題、光学的問題に対して、以下のとおり、各章で検討を行った。

まず、データ計測から幾何学的問題までを扱うようなシステムとして、第2章でテクスチャリングシステムを開発した。本システムでは、カメラパラメータ推定の確実性を高めるために、キャリブレーション物体を用いたカメラパラメータ推定を行っている。また、キャリブレーションを最小限の回数にするために、距離センサの上にデジタルカメラを固定し、一連の計測では、同じカメラパラメータを使用している。また、実際に本システムを使用し、東大寺戒壇院の広目天像の仮想現実感モデルを生成した。また、生成された広目天像をさまざまな視点位置及び光源環境下での見え方を示した。

次に、カラー画像間の色調補正を行う手法として、クロマティシティに基づく手法と光源球に基づく手法を提案した。いずれの手法も光源環境の異なる2枚の画像から、光源環境に依存しない擬似 albedo 画像を推定し、それを3次元幾何モデル上に貼り付けることにより画像間のつなぎ目のない仮想現実感モデルを生成することが可能である。

第3章のクロマティシティに基づく手法では、撮影された画像のクロマティシティに着目し、物体の albedo に「クロマティシティの同じ点は同じ albedo を持つ」という仮定の下で、各入力画像から擬似 albedo 画像の推定を行った。各画素に対して独立に albedo を推定する場合、局所的な法線方向の誤差が存在すると、推定される擬似 albedo 画像の推定誤差としてそのまま反映されてしまう。推定画像は不自然なものになってしまう。よって本提案手法では、クロマティシティの同じ値を取る領域ごとに、albedo を推定し、局所的な法線方向の誤差に対してもロバストな手法となっている。また、本提案手法で使用した物体に対する仮定についても考察を行うと共に、いくつかの物体を用いてその仮定の妥当性を確認した。また、実際に撮影されたカラー画像と3次元幾何モデルを用いて、仮想現実感モデルを生成し、その有効性を確認した。

クロマティシティに基づく手法は、簡単に複数枚の画像の色調補正を行うことができる点ですぐれているが、入力画像は一つの点光源下の画像でなければならぬという制約やセルフシャドウが存在する画像に対しては適用困難であるという問題点が合った。クロマティシティに基づく手法を発展させ、第4章で任意の光源環境下での画像に適用可能な光源球に基づく手法を開発した。

本手法では，光源環境の異なる2枚の画像から，物体表面上の反射率 (albedo) が固有の値であることから，両者の画像を矛盾なく説明する光源環境を推定することにより，擬似 albedo を求める手法を提案した．本提案手法では，光源環境を，多数の点光源で近似し，各点光源下で3次元幾何モデルをレンダリングした画像の線形結合を用いて，画像の陰影情報を表現した．点光源下の基底画像を用いているので，密に点光源を配置することにより，セルフシャドウのある画像に対しても適用可能である．また，本提案手法における光源環境推定に用いられる方程式は，Inverse Lighting における方程式と類似しており，Inverse Lighting における ill-posed, ill-conditioned の問題が本提案手法にどのような影響を与えるかの検討を行った．Ill-posed, ill-conditioned の問題とも，光源推定及び推定された光源から陰影情報の再構成という一連の処理において，相殺され，擬似 albedo を推定するためには，影響を与えないことを確認した．また，CG 画像，実画像に対して本手法を適用し，その有効性を確認した．

## 5.1 寄与

本論文の寄与は以下のとおりである．

- カラー画像及び距離画像計測/カメラパラメータ推定を行い，テクスチャリングの手法を用いて簡便に仮想現実感モデルを生成するシステムを開発した
- 上記システムを用いて，国宝である東大寺の広目天像の仮想現実感モデルを生成した
- 局所的に法線方向が正確に求まっていない場合に特に有効なテクスチャリングにおける色調補正手法 (クロマティシティに基づく手法) を開発した

- 複雑光源環境下の画像に適用可能なテクスチャリングにおける色調補正手法（光源球に基づく手法）を開発した
- Inverse Lighting における ill-posed, ill-conditioned の問題点と光源球に基づく色調補正手法への影響を明確化した

## 5.2 今後の課題と展望

本章では、今後の課題について述べる。本論文で提案した3次元幾何モデルのテクスチャリング手法は、物体表面上でのランバーシアン成分のみを対象とされていたが、現実世界には、スペキュラー成分を持つ物体も存在する。また、対象の3次元形状によっては、相互反射成分が強い場合も考えられる。このように、ランバーシアン以外の反射成分を考慮することにより、より精度の高いモデルが生成可能であると考えられる。また、本論文で提案した手法を、さまざまな大規模の文化財等に適用し、仮想現実感モデルの生成を行うことも今後の課題として挙げることが出来る。大規模な物体を対象とすることで、これまでの実験結果では見られない問題点がより明確になり、本手法のさらなる改善が期待できる。今後の展望としては、上述の課題を克服し、仮想現実感モデリングの精度を高めるとともに、さまざまな対象の仮想現実感モデルを生成したい。

# 発表文献

## 学会誌論文

- 運天 弘樹, 池内 克史, ”テクスチャマッピングにおける擬似 albedo に基づく色調補正手法,” 電子情報通信学会論文誌, D-II vol. J87-D-II, No. 12 pp.2156, 2004.

## 国際会議

- Hiroki Unten, Katsushi Ikeuchi , ”Color Alignment in Texture Mapping of Images under Point Light Source and General Lighting Condition,” in Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2004), vol.1, pp.I-234, 2004.
- Hiroki Unten, Katsushi Ikeuchi, ”Virtual Reality Model of Koumokuten Generated from Measurement,” in Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), pp.209, 2004.

## 国内会議

- 運天弘樹, 三橋徹, 松戸堅治, 池内克史, ”画像間の色調連続性を保持した3次元幾何モデルのテクスチャリング手法,” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), vol. I, pp.2372, 2004.
- 運天弘樹, 池内克史, “テクスチャマッピングにおけるクロマティシティの不変性に基づく3次元幾何モデル上での色調補正,” 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告, vol.2003-CVIM-140-4, pp.25-32, 2003.