

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

運天 弘樹[†] 池内 克史^{††}

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。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。幾何モデリングに関しては、距離センサで対象物体の3次元形状を計測し3次元幾何モデルを生成する手法についてさまざまな研究が行われてきた。しかしながら、より現実感高いモデリングを行うためには、光学モデリング、環境モデリングが非常に重要である本論文では、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新しい手法を提案する。

Texuring 3D Geometric Model for Virtualization of Real-World Object

HIROKI UNNTEN[†] and KATSUSHI IKEUCHI^{††}

Contents generation from measurement is an effective approach to automatic modeling of real world objects. In this paper, we present a system to create virtual reality model automatically from measurement of real object. In the proposed system, 3D geometric model of target object is generated from range image measured by range sensor and color images of it are acquired by digital camera. We get textured model by mapping the images onto the 3D geometric model using the camera parameters estimated from the calibration. However, the calibration is not sufficient to get the realistic model. We need to the continuity between input images and we also propose a technique to align colors between them.

1. 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)~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

[†] 東京大学大学院情報理工学系研究科

Information and Communication Engineering, Graduate School of Information and Technology, The University of Tokyo

^{††} 東京大学大学院情報学環

Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

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)~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では、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、 α 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り、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 map¹⁵⁾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問うては、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、現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、光学的側面に問うては、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、クロマチ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。

以降、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、両者の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チ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。クロマチ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。

2. テクスチャリングシステム

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)~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⁾。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¹⁶⁾。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^{7)~9)}。一方で、自動的にカメラパラメータを推定する手法に関して研究が行われている。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¹⁷⁾や、T-junction と呼ばれる特徴を利用するもの¹⁸⁾ 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¹²⁾や、等高線を使用するもの¹⁹⁾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⁶⁾ 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^{10),11)}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²⁰⁾ などが挙げられる。

2.1 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。前章で述べたとおり、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。

2.2 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、距離センサーから死角となる部分や、距離センサー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¹⁾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VIVID900²¹⁾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D1x²²⁾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。通常、対象物体の計測を行うためには、センサー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ー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ー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。

2.3 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ーで計測した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ーとデジタルカメラの相対的な位置、方向を知ることが必要である。距離センサー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。

$$\tilde{m} = A[R \quad t] \tilde{M} \quad (1)$$

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1に示すとおり、距離センサー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に示すキャ



図1 システムの構成。

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

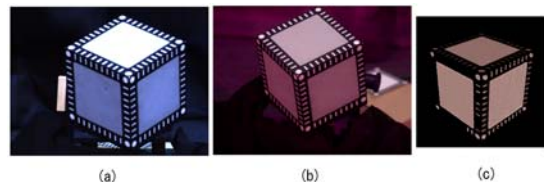


図2 キャリブレーション物体:(a)D1xで撮影したカラー画像、(b)VIVIDにより計測された距離画像、(c)VIVIDにより計測されたカラー画像

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(a),(b),(c)に示す。本システムで使用している距離センサーでは、距離画像及びカラー画像を取得することが出来る、この距離画像とカラー画像はセンサー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(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(b),(c)がそれぞれ、距離センサー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、距離センサーから得られるカラー画像と距離画像は、センサー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。

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(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(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クを抽出する。向かい合う辺の楕円状のマークを直線で結び、その全ての交点を仮想格子点とする(図.3(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.3(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.3(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.3(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(1)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

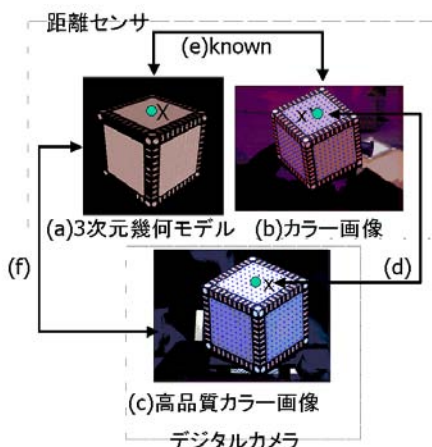


図3 キャリブレーションフロー

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かれたことになる。

2.4 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、2.3章に述べた手法により、カメラパラメータを決定し、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4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。



図4 1 スキャンで得られるデータ

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、物体の近くに近づけなかったり、物体上方からの様子を見るの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感モデルを用いると、さまざまな方向から物体を見るのが可能である(図5)。

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6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したシミュレーション結果を図7に示す。光源の位置を変化させるだけで、



図 5 さまざまな視点からの見え

顔の表情が大きく変化することが確認できる。



図 6 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 7 光源位置変化による広目天像の表情の変化

2.5 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。

3. クロマティシティに基づく色調補正手法

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^{23)~26)}。

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、テクスチャのつながり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。

3.1 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、光源は無限遠点光源であるが、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ertianであるとし、さらに、画像色度が同じ点で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ertian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出来る。

$$I_x(c) = L(c)S_x(c)\cos\theta_x \quad (2)$$

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。

3.2 擬似 albedo 推定

図8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8: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8:ブロック(b))。

まず、以下の画像クロマティシティを計算する。(図8:ブロック(c))。

$$I_{x,c} = \frac{I_x(c)}{\sum_c I_x(c)} \quad (3)$$

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。

$$I_x(c) = L(c)S_{const}(c)\cos\theta_x = g\mathbf{n}(x) \cdot \mathbf{L} \quad (4)$$

ここで、 g は定数である。領域 A での $I_x(c)$ 、 $\mathbf{n}(x)$ を式(4)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8: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²⁾、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。

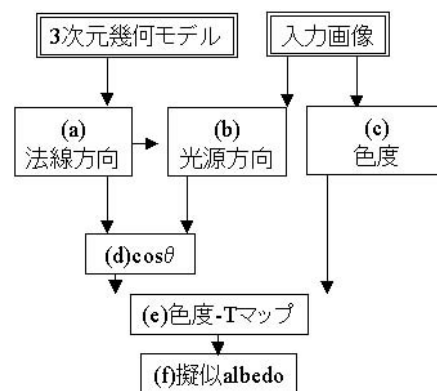


図8 擬似 albedo 推定の概要
Fig. 8 Overview of pseudo-albedo estimation.

$I_x(c)$ 、 $\cos\theta_x$ が既知であれば、擬似 albedo は式(2)より推定可能である。しかしながら、式(2)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 (2) より各点に対して擬似 albedo を求めるのではなく、画像クロマチシティが物体の幾何形状に依存しないことを利用して、クロマチ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 (2) 及び式 (3) より擬似 albedo は以下の通り表すことが出来る。

$$L(c)S(c) = I_{x,c} \sum_c \frac{I_x(c)}{\cos\theta_x} = I_{x,c}T_x \quad (5)$$

ここで、 T_x は以下の通りである。

$$T_x = \sum_c \frac{I_x(c)}{\cos\theta_x} \quad (6)$$

先に述べた通り、クロマチシティが同じ点は、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 (2) 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、画像クロマチシティのみで決定される値であり、以下、これを T と表し、クロマチシティ-T マップと呼ぶ。

3.3 クロマチシティ-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 9 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 9: 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 9: 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 9: 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 9: 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 (5) 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。

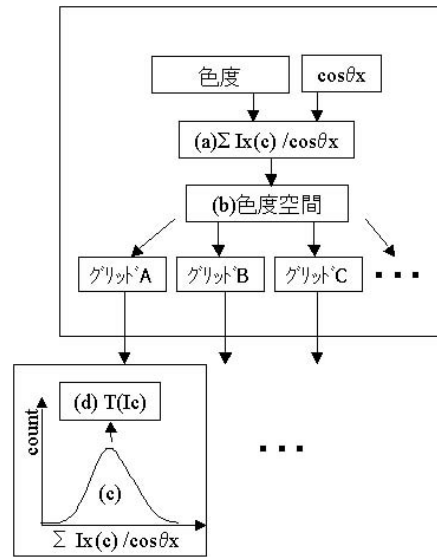


図 9 クロマチシティ-T マップ推定の概要
Fig.9 Overview of chromaticity-T map estimation.

3.4 実験

入力画像の一部と 3 次元幾何モデルを図 10 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、キャリブ



図 10 入力画像及び 3 次元幾何モデル
Fig.10 Some of input images and 3D geometric model.

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 11)。図 11(c)

では、入力画像の上へ半透明の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²⁷⁾。上記の処理で得られた各画

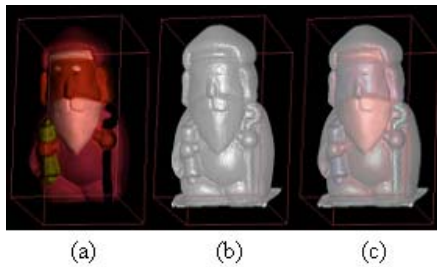


図 11 (a) 入力画像, (b) 3次元幾何モデル, (c) 入力画像と3次元幾何モデルの重ね合わせ
Fig. 11 (a) Input Image, (b) 3D geometric model, (c) Superposition of Input Image and 3D geometric model

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。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12に示す。図12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13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14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15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。

3.5 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

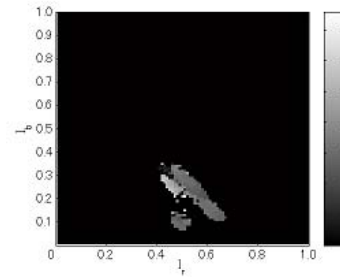


図 12 推定されたクロマティシティ-Tマップ
Fig. 12 Estimated Chromaticity-T map.

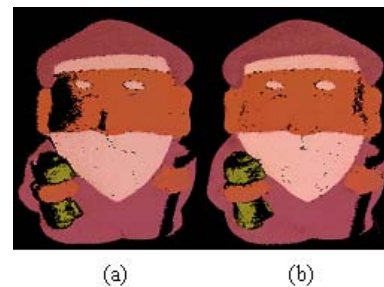


図 13 推定された擬似 albedo
Fig. 13 Estimate pseudo-albedo.

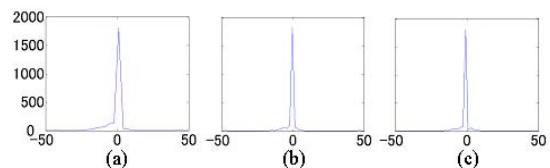


図 14 画像1と画像2から推定された擬似 albedo の差分ヒストグラム: (a)redチャンネル, (b)greenチャンネル, (c)blueチャンネル
Fig. 14 Histograms of the difference between the estimated pseudo-albedo from image1 and image2: (a)red channel, (b)green channel, (c)blue channel.

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、

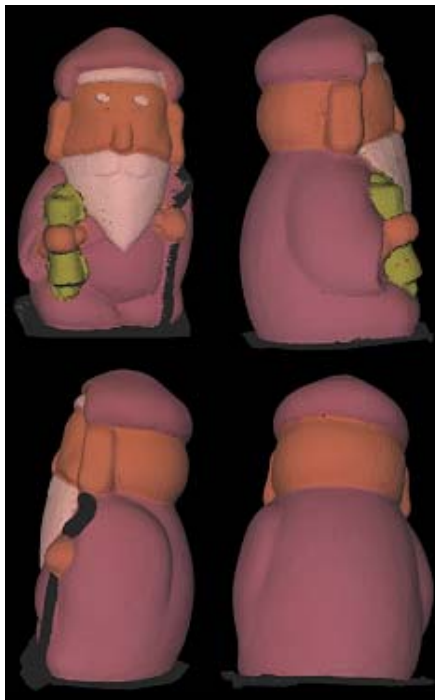


図 15 統合擬似 albedo
Fig. 15 Merged pseudo-albedo.

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、画像間のつながり目のない、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。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。

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。

4. 光源球に基づく色調補正手法

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ない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。Debevec²⁸⁾ 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²⁹⁾ 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³⁰⁾ 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^{31),32)}。また、佐藤ら³³⁾ 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³⁴⁾ 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。

また、Du ら³⁵⁾ 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¹⁴⁾ 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

定するだけでなく、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。

4.1 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ーシアンと仮定する。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16)。 $A^m(x_1)$ 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ーシアン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18:ブロック(a1),(a2))。基底画像の例を図17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 radiance³⁶⁾ 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17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

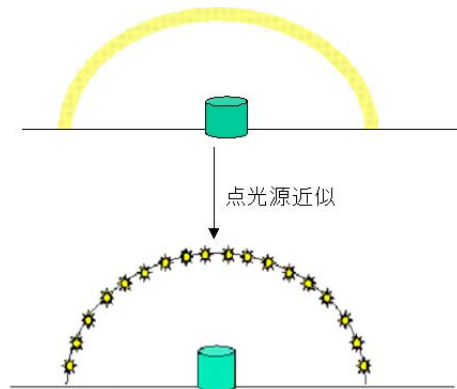


図16 点光源による光源環境の近似
Fig.16 Overview of color alignment based on illumination sphere.

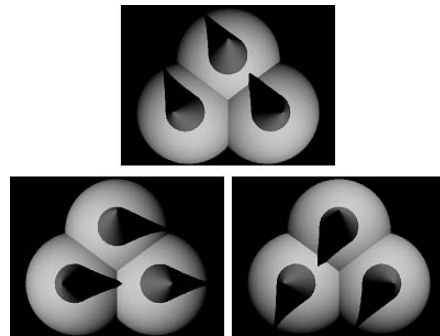


図17 基底画像の例
Fig.17 Overview of color alignment based on illumination sphere.

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。

4.2 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。

$$I_n(x) = S(x_n)(a_n^1 A_n^1(x_n) + \dots + a_n^m A_n^m(x_n) + \dots + a_n^M A_n^M(x_n)) = S(x_n)L_n(x_n) \quad (7)$$

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(7)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。

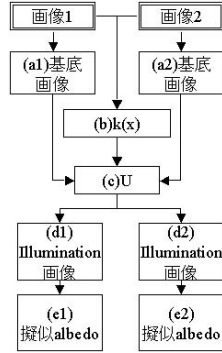


図 18 光源球に基づく色調補正の概要

Fig. 18 Overview of color alignment based on illumination sphere.

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18:ブロック(b))。式(7)を用いると、 $k(X)$ は以下の通り表せる。

$$k(X) = \frac{a_1^1 A_1^1(\tilde{x}_1) + \dots + a_1^m A_1^m(\tilde{x}_1) + \dots + a_1^M A_1^M(\tilde{x}_1)}{a_2^1 A_2^1(\tilde{x}_2) + \dots + a_2^m A_2^m(\tilde{x}_2) + \dots + a_2^M A_2^M(\tilde{x}_2)} \quad (8)$$

さらに、式(8)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18:ブロック(c))。

$$\mathbf{U}\mathbf{a} = 0 \quad (9)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} A_1^1(\tilde{x}_{1,1}) \dots A_1^M(\tilde{x}_{1,1}) & -k(X_1)A_2^1(\tilde{x}_{1,2}) & \dots & -k(X_1)A_2^M(\tilde{x}_{1,2}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_1^1(\tilde{x}_{L,1}) \dots A_1^M(\tilde{x}_{L,1}) & -k(X_L)A_2^1(\tilde{x}_{L,2}) & \dots & -k(X_L)A_2^M(\tilde{x}_{L,2}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_1^1(\tilde{x}_{L,1}) \dots A_1^M(\tilde{x}_{L,1}) & -k(X_L)A_2^1(\tilde{x}_{L,2}) & \dots & -k(X_L)A_2^M(\tilde{x}_{L,2}) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{a} = (a_1^1 \dots a_1^M a_2^1 \dots a_2^M)^t \quad (11)$$

\mathbf{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、 \mathbf{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、 \mathbf{a} は式(7)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(10)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、 \mathbf{a} に対して、式(12)の制約を設けることにする。

$$\sum_{m=1}^M (a_1^m)^2 + (a_2^m)^2 = 1 \quad (12)$$

以上、まとめると、式(13)の制約条件の下で式(9)を最小化する、光源環境を表す係数 \mathbf{a} を決定する。

$$a_1^m \geq 0, a_2^m \geq 0, \sum_{m=1}^M (a_1^m)^2 + (a_2^m)^2 = 1 \quad (13)$$

さらに、式(7)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18:ブロック(e1)及び(e2))。先に述べたとおり、12の制約条件の下での推定された \mathbf{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³⁰⁾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(10)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。

4.3 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19(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19(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19(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。

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

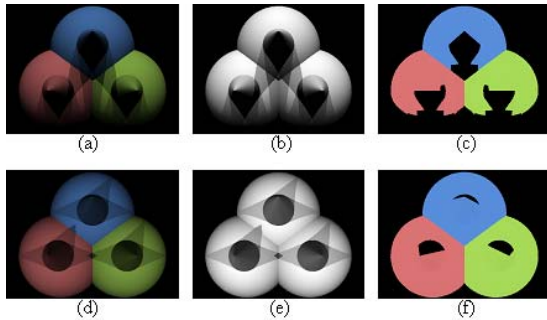


図 19 CG 画像への適用結果．入力画像:(a) 画像 1, (d) 画像 2．推定された illumination 画像:(b) 及び (e)．推定された擬似 albedo 画像:(c) 及び (f)．上の行が画像 1 に, 下の行が画像 2 に対応する．

Fig. 19 Synthetic test. Input images are image1 (a) and image2(d). The estimated illumination images are (b) and (e). The estimated pseudo-albedo images are (c) and (f). Note that the top row is for image1 and the bottom row is for image2.

て計測した．本実験では，異なる視点及び異な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 20 に示す．図 20 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 21 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 20 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 21(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 22 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 23 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．

4.4 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



図 20 色調補正前の画像を貼り付けた結果

Fig. 20 Texture mapping before color alignment.

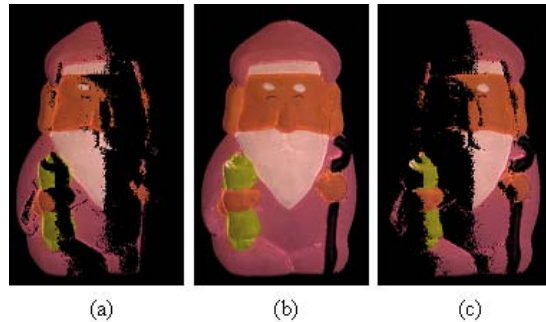


図 21 推定された擬似 albedo: (a) 画像 1, (b) 画像 1 及び画像 2, (c) 画像 2

Fig. 21 Estimated pseudo-albedo: (a)image1, (b)both, (c)image2.

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，

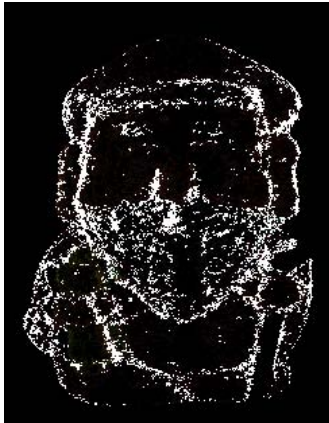


図 22 画像 1 及び画像 2 から推定された擬似 albedo の差分の絶対値

Fig. 22 Absolute difference between the estimated pseudo-albedo from image1 and the one from image2.

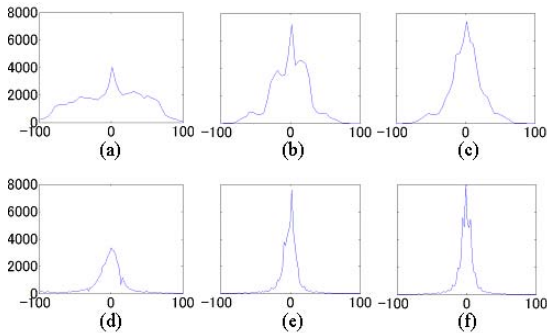


図 23 画像 1 と画像 2 の差分ヒストグラム:(a) 色調補正前 red バンド, (b) 同 green バンド, (c) 同 blue バンド, (d) 色調補正後 red バンド, (e) 同 green バンド, (f) 同 blue バンド

Fig. 23 Histograms of the difference between image1 and image2: (a) red channel, (b)green channel, (c)blue channel before alignment; (d)red channel, (e)green channel, (f)blue channel after alignment.

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。

5. 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。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。

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していたが、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事が出来る。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。

謝 辞

本研究は、科学技術振興機構・戦略的基礎研究推進事業・高度メディア社会の生活情報技術・文化遺産の高度メディアコンテンツ化のための自動化手法プロジェクトの支援を受けて行われました。

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) Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: 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) Praum, E., Finkelstein, A. and Hoppe, H.: Lapped textures, in *Proc. SIGGRAPH*, pp. 465-470 (2000).
- 4) Sander, P. V., Snyder, J., Gortler, S. J. and Hoppe, H.: Texture mapping progressive meshes, in *Proc. SIGGRAPH*, pp. 355-360 (2001).
- 5) Levy, B.: Constrained texture mapping for polygonal meshes, in *Proc. SIGGRAPH*, pp. 417-424 (2001).
- 6) Neugebauer, P. J. and Klein, K.: Texturing 3D models of real world objects from multiple unregistered photographic views, in *Proc. EUROGRAPHICS'99* (1999).
- 7) Hanrahan, P. and Haeberli, P. E.: Direct WYSIWYG painting and texture on 3D shape, in *Proc. SIGGRAPH90*, pp. 215-223 (1990).
- 8) Pedersen, H. K.: Decorating implicit surfaces, in *Proc. SIGGRAPH95*, pp. 291-300 (1995).
- 9) Litwinowicz, P. and Miller, G.: Efficient technique for interactive texture placement, in *Proc. SIGGRAPH94*, pp. 119-122 (1994).
- 10) Kurazume, R., Wheeler, M. D. and Ikeuchi, K.: Mapping textures on 3D geometric model using reflectance image, in *Proc. Data Fusion Workshop in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (2001).
- 11) Kurazume, R., Nishino, K., Zhang, Z. and Ikeuchi, K.: 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) Lensch, H., Heidrich, W. and Seidel, H.-P.: Automated texture registration and stitching for real world models, in *Proc. Pacific Graphics'00*, pp. 317-326 (2000).
- 13) Beaulac, E. and Roy, S.: Automatic re-lighting of overlapping textures of a 3D model, in *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 166-173 (2003).

- 14) Wen, Z., Liu, Z. and Huang, T.: 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) Cabral, B., Olano, M. and Nemeec, P.: Reflection Space Image Based Rendering, in *Proc. SIGGRAPH*, pp. 165–170.
- 16) Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Ginzton, M., Anderson, S., Davis, J., Ginsberg, J., Shade, J. and Fulk, D.: The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues, *Siggraph 2000*, pp. 131–144 (2000).
- 17) Guenter, G., Grimm, C., D.Wood, Malvar, H. and Pighin, F.: Making faces, in *Proc. SIGGRAPH*, pp. 55–66 (1998).
- 18) Kriegman, D. J., Vijayakumar, B. and ponce, J.: Constraints for recognizing and locating curved 3D objects from monocular image features, in *Proc. ECCV*, Vol. 588 of LNCS, pp. 829–833 (1992).
- 19) Brunie, L., Lavallee, S. and Szelski, R.: Using force field derived from 3D distance maps for inferring the attitude of a 3D rigid object, in *Proc. ECCV* (1992).
- 20) Stamos, I. and K.Allen, P.: 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).
- 21) : <http://konicaminolta.jp/>.
- 22) : <http://www.nikon-image.com/jpn/index.htm>.
- 23) D.L.Migram: Computer methods for creating photomosaics, *IEEE Trans. on Computers*, Vol. C-24, pp. 1113–1119 (1975).
- 24) D.L.Migram: Adaptive techniques for photomosaicking, *IEEE Trans. on Computers*, Vol. C-26, pp. 1175–1180 (1977).
- 25) Rocchini, C., Cignomi, P., Montani, C. and Scopigno, R.: Multiple textures stitching and blending on 3d objects, in *Proc. of Eurographics Rendering Workshop*, pp. 173–180 (1999).
- 26) Pulli, K., Abi-Rached, H., Duchamp, T., Shapiro, L. and Stuetzle, W.: Acquisition and visualization of colored 3D objects, in *Proc. of Int. Conf. on Pattern Recognition*, pp. 11–15 (1998).
- 27) Sato, Y., Wheeler, M. D. and Ikeuchi, K.: Object Shape and Reflectance Modeling From Observation, in *Proc. SIGGRAPH97*, pp. 379–387 (1997).
- 28) Debevec, P.: Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Imabe-based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography, in *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp. 189–198 (1998).
- 29) Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene, Vol. 5, No. 1, pp. 1–12 (1999).
- 30) Marschner, S.R. and Greenberg, D.P.: Inverse lighting for photography, in *Proc. IS&T/SID Fifth Color Imaging Conference*, pp. 262–265 (1997).
- 31) R.Ramamoorthi and P.Hanrahan: A Signal-Processing Framework for Inverse Rendering, in *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp. 117–128 (2001).
- 32) R.Basri and D.W.Jacobs: Lambertian Reflectance and Linear Subspaces, *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 25, No. 2, pp. 218–233 (2003).
- 33) Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: 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).
- 34) Hara, K., Nishino, K. and Ikeuchi, K.: Determining Reflectance and Light Position from a Single Image without Distant Illumination Assumption, in *Proc. ICCV2003*, pp. 560–567 (2003).
- 35) Du, F., Okabe, T., Sato, Y. and Sugimoto, A.: Reflectance 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).
- 36) : <http://radsite.lbl.gov/radiance>.