

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 —— 点光源下の画像及び一般光源環境での画像への拡張 ——

運天 弘樹^{†a)} 池内 克史[†]

Novel Method for Color Alignment Based on Pseudo-Albedo in Texture Mapping:
Images under Point Light Source and Extension to Images under
General Lighting Condition

Hiroki UNTEN^{†a)} and Katsushi IKEUCHI[†]

あらまし 現実世界を観測することにより、デジタルコンテンツを生成する手法は非常に重要な技術となりつつあり、仮想現実システム、文化財のデジタル保存等、様々な分野での応用が期待されている。デジタルコンテンツ生成に有効な手法の一つとして、テクスチャマッピングが挙げられる。テクスチャマッピングとは、3次元幾何モデル上にテクスチャを貼り付け、現実感高い3次元モデルを生成する手法である。この手法には幾何学的問題、光学的問題の二つの問題がある。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ことである。テクスチャマッピングの研究の多くは、幾何学的問題のみを対象とし、光学的問題に関しては、これまであまり研究が行われてこなかった。本論文では、光学的問題に関し、テクスチャ間の色調の補正を行う新しい手法を提案する。本手法により、固定された物体の周りをカメラ、光源を動かしつつ計測されたテクスチャに対して、物体の真の色である albedo を考慮して色調を補正することにより、現実感の高い3次元モデルを得ることができる。

キーワード テクスチャマッピング、色調補正、albedo、光源環境推定

1. ま え が き

仮想現実システムは、仮想モールド、電子博物館、アミューズメント等の様々な分野での応用が期待されており、近年様々な取組みがなされている。特に、仮想現実モデルの効率的生成手法に関しては精力的な研究が行われている。しかしながら、現在の仮想現実モデルの多くは、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。このような背景により、現実世界を観測することにより仮想現実モデリングを行う手法が開発されてきた [1]。このようなモデル生成の重要な要素の一つとしてテクスチャマッピングが挙げられる。テ

クスチャマッピング [2] ~ [4] とは、3次元幾何モデル上にカラー画像を貼り付ける手法であり、現実感の高いモデルを生成することが可能である。

テクスチャマッピングには、以下の二つの問題がある。

- 幾何学的問題
- 光学的問題

幾何学的問題とは、テクスチャを撮影したカメラと3次元幾何モデルを計測した距離センサの相対的な位置関係を決定することである。テクスチャマッピングに関する研究の多くはこの問題に関するものである。幾何学的問題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 [5] ~ [7] などが提案されている。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 [8], [9] 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

[†] 東京大学生産技術研究所, 東京都
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo,
Tokyo, 153-8505 Japan

a) E-mail: unten@cvi.iis.u-tokyo.ac.jp

サを用いて 3 次元形状の計測を行ったときに得られる、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づけ、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 [10] 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、画像の強度をもとに複数の画像の位置合せを行う手法も提案されている。

しかしながら、テクスチャと 3 次元幾何モデルの幾何学的な位置関係のみを決定するだけでは、現実感の高いモデルを得るためには不十分であり、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必要がある。この種の問題を光学的問題と名づける。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。

関連する研究として、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、重み付平均をとるもの [10] や、 α チャネルによるブレンディング [11] を行うものなどがある。しかしながら、これらの平均に基づく手法は異なる光源環境下での画像の色調補正を行うことが困難である。色調補正を行う他の手法としては、テクスチャ計測時の光源環境を推定する手法が挙げられる。Marschner ら [12] は物体の反射率と 3 次元形状が既知の場合に入力画像より光源環境を推定し、リライトを行う手法を提案している。Beauchesne ら [13] は、複数枚の入力テクスチャをある共通の光源環境にリライトすることにより、色調補正を行う手法を提案している。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。

本研究では、テクスチャマッピングの光学的問題である、テクスチャ間の色調補正を行う新しい手法を提案する。本手法では、図 1 に示すように、固定された物体の周りを、カメラ、光源を動かしながら計測した各テクスチャの色調補正を行う。物体の反射率を考慮しているため、光源の移動についても対応可能である。色調補正後のテクスチャを 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できる。

本論文では、まず、点光源下で得られるテクスチャ

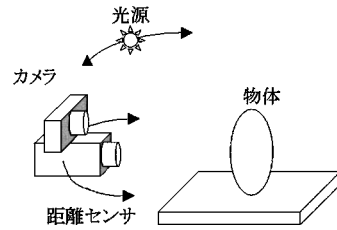


図 1 実験装置配置
Fig. 1 Experimental setup.

間の色調補正の手法について述べる。この手法では、3 次元幾何モデル上での色度の不変性を用いて色調補正を行い、幾何エッジ等の法線方向を正しく推定することができない点に対しても違和感なく、色調を補正することが可能である。次に、光源を一般の光源環境に拡張し、光源球の概念に基づいた色調補正の手法を提案する。この手法では、3 次元幾何モデルを光源球上の多数の点光源下でレンダリングした基底画像を用いて、色調補正を行う。なお、点光源下での基底画像ではなく、光源環境を球面調和関数で展開した基底画像を用いて albedo を推定する手法が、Du ら [14] により本手法とは独立にほぼ同時期に別のグループで動画像処理のコンテキストで開発されていることが最近判明した。しかし、本手法は、点光源を基準としているため、物体上の影の影響が少なく、より頑健な手法となっている。

以降、2. では、点光源下での画像に対する色調補正の手法について述べる。3. では 2. の手法を一般光源環境に拡張した手法について述べる。提案手法の実験結果を 4. で報告し、最後に 5. で結論を述べる。

2. 色度の不変性に基づく色調補正

本章では、点光源下の画像に対する色調補正の手法について述べる。この手法では、光源は無遠点光源であるが、テクスチャ取得ごと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、更に、画像色度が同じ点は同じ反射率をも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。

$$I_x(c) = L(c)S_x(c) \cos \theta_x \quad (1)$$

ここで、 $c = \{r, g, b\}$ であり、 $x, I_x(c), L(c), S_x(c)$,

θ_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。

図 2 に擬似 albedo 推定の概要を示す。まずはじめに、3 次元モデルより計算された法線方向 (図 2: 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 2: ブロック (b))。

まず、以下の画像色度を計算する。(図 2: ブロック (c))。

$$I_{x,c} = \frac{I_x(c)}{\sum_c I_x(c)} \quad (2)$$

ここで、画像色度がある同じ値をとる点からなる画素の集合を A とする。画像色度が同じ値をとる点とは、色度空間を細かいグリッド上に分割し、画像色度をこの空間にプロットしたとき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、物体上で色度の同じ点は、同じ反射率をもつと仮定しているので、 $S_x(c)$ は A 内では一定 ($S_{const}(c)$) でとなり、 A 内の点に対して以下の式が成立する。

$$I_x(c) = L(c)S_{const}(c) \cos \theta_x = g\mathbf{n}(x) \cdot \mathbf{L} \quad (3)$$

ここで、 g は定数である。領域 A での $I_x(c)$ 、 $\mathbf{n}(x)$ を式 (3) 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 2: 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 [15]、光源位置を物理的に計測する方法も存在するが、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 (1) より推定可能である。しかしながら、式 (1) 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 (1) より各点に対して擬似 albedo を求めるのではなく、画像色度が物体の幾何形状に依存しないことを利用して、色度が同じである画素の集

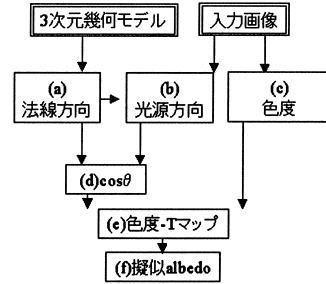


図 2 擬似 albedo 推定の概要

Fig. 2 Overview of pseudo-albedo estimation.

合ごとに擬似 albedo を推定する。

以下に、擬似 albedo 推定する手法を述べる。式 (1) 及び式 (2) より擬似 albedo は以下のとおり表すことができる。

$$L(c)S(c) = I_{x,c} \sum_c \frac{I_x(c)}{\cos \theta_x} = I_{x,c} T_x \quad (4)$$

ここで、 T_x は以下のとおりである。

$$T_x = \sum_c \frac{I_x(c)}{\cos \theta_x} \quad (5)$$

先に述べたとおり、色度が同じ点は、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。更に、式 (1) 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、画像色度のみで決定される値であり、以下、これを T と表し、色度-T マップと呼ぶ。

図 3 に色度-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: ブロック (a))、その値を色度空間の点 $I_c = I_{x,c}$ に投票する (図 3: ブロック (b))。すべてのピクセルの投票後、光源推定時と同様に色度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: 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、色度-T マップを作成する (図 3: ブロック (d))。

異なる視点から得られたすべての入力画像から色度-T マップを作成すると、式 (4) 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

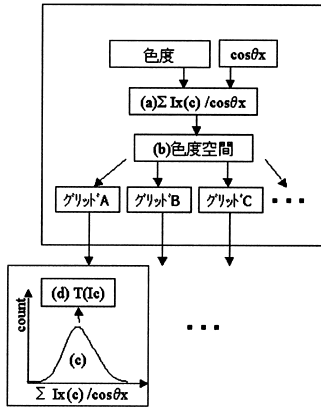


図 3 色度-T マップ推定の概要
Fig. 3 Overview of chromaticity-T map estimation.

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（物体上で画像色度が同じ点は、同じ反射率をもつ）は、すべ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。

3. 光源球に基づく色調補正

2. 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2. 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、2. 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。

まずはじめに、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

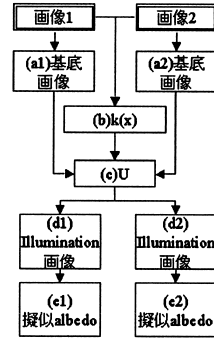


図 4 光源球に基づく色調補正の概要
Fig. 4 Overview of color alignment based on illumination sphere.

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。 $A^m(x_1)$ 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すべての点で一定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4：ブロック (a1),(a2)）。

$I_1(x_1), I_2(x_2)$ 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。

$$\begin{aligned}
 I_n(x) &= S(x_n)(a_n^1 A_n^1(x_n) + \dots + a_n^m A_n^m(x_n) + \dots + a_n^M A_n^M(x_n)) \\
 &= S(x_n)L_n(x_n) \quad (6)
 \end{aligned}$$

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できれば、式 (6) より albedo を推定することが可能である。先に述べたとおり、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：ブロック (b)）。式 (6) を用いると、 $k(X)$ は以下のとおり表せる。

$$k(X) = \frac{a_1^1 A_1^1(\bar{x}_1) + \dots + a_1^m A_1^m(\bar{x}_1) + \dots + a_1^M A_1^M(\bar{x}_1)}{a_2^1 A_2^1(\bar{x}_2) + \dots + a_2^m A_2^m(\bar{x}_2) + \dots + a_2^M A_2^M(\bar{x}_2)} \quad (7)$$

更に、式 (7) 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: ブロック (c)).

$$Ua = 0 \quad (8)$$

ここで、

$$U = \begin{pmatrix} A_1^1(\bar{x}_{1,1}) \dots A_1^M(\bar{x}_{1,1}) -k(X_1)A_2^1(\bar{x}_{1,2}) \dots \\ \vdots \\ A_1^1(\bar{x}_{L,1}) \dots A_1^M(\bar{x}_{L,1}) -k(X_L)A_2^1(\bar{x}_{L,2}) \dots \\ \vdots \\ A_1^1(\bar{x}_{L,1}) \dots A_1^M(\bar{x}_{L,1}) -k(X_L)A_2^1(\bar{x}_{L,2}) \dots \\ \vdots \\ -k(X_1)A_2^M(\bar{x}_{1,2}) \\ \vdots \\ -k(X_L)A_2^M(\bar{x}_{L,2}) \\ \vdots \\ -k(X_L)A_2^M(\bar{x}_{L,2}) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$a = (a_1^1 \dots a_1^M a_2^1 \dots a_2^M)^t \quad (10)$$

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得ることができるので、スケールのあいまい性を除いて、 a_n^m を決定することができる。更に、式 (6) 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: ブロック (e1) 及び (e2)).

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、ランパ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 [12] 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よ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、1 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できる。

4. 実験

4.1 色度に基づく色調補正

入力画像の一部と 3 次元幾何モデルを図 5 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。実験装置の配置を図 1 に示す。

あらかじめ、キャ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とれた状態で重ね合わせることができる (図 6)。図 6 (c) では、入力画像の上で半透明の 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 [16]。



図 5 入力画像及び 3 次元幾何モデル
Fig. 5 Some of input images and 3D geometric model.

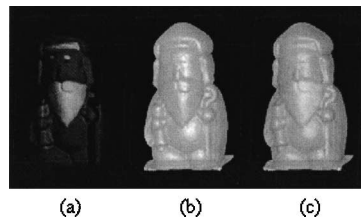


図 6 (a) 入力画像, (b) 3 次元幾何モデル, (c) 入力画像と 3 次元幾何モデルの重ね合わせ

Fig. 6 (a) Input Image, (b) 3D geometric model, (c) Superposition of input image and 3D geometric model.

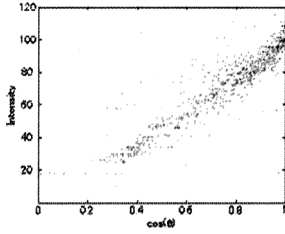


図 7 $\cos\theta$ と画像の値との関係

Fig. 7 The relationship between $\cos\theta$ and intensity.

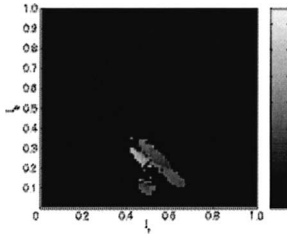


図 8 推定された色度-T マップ

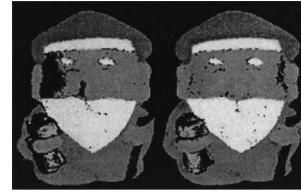
Fig. 8 Estimated chromaticity-T map.

法線方向を用いることにより、すべての入力画像に対して、光源方向を推定した。図 7 に画像色度がある同じ値をもつ点の集合での、 $\cos\theta$ と画像の値の関係を示す。図 7 において、式 (3) 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、すべての入力画像に対して、色度-T マップを推定した。推定された色度-T マップを図 8 に示す。図 8 は、色度空間の各点 (I_r, I_b) での T の値を示す。この色度-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 9 に 2 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 10 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 11 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。すべての擬似 albedo を貼り付けた結果では、テクスチャ間のつながり目は見られない。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。

4.2 光源球に基づく色調補正

まずはじめに、光源球に基づく色調補正の手法を



(a) (b)

図 9 推定された擬似 albedo

Fig. 9 Estimate pseudo-albedo.

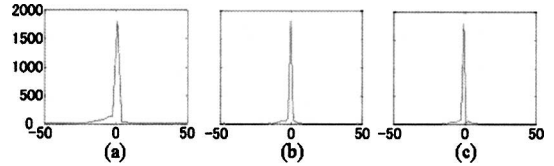


図 10 画像 1 と画像 2 から推定された擬似 albedo の差分ヒストグラム: (a)red チャネル, (b)green チャネル, (c)blue チャネル

Fig. 10 Histograms of the difference between the estimated pseudo-albedo from image1 and image2: (a)red channel, (b)green channel, (c)blue channel.

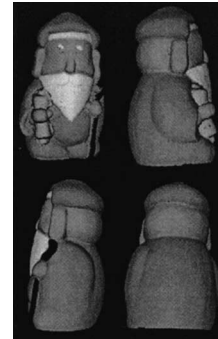


図 11 統合擬似 albedo

Fig. 11 Merged pseudo-albedo.

CG 画像に適用した結果を示す。この実験では、2 枚の入力画像の視点と同じで、光源環境のみを変化させた。図 12 (a) 及び (d) が入力画像であり、赤、青、緑の三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 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 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。

次に、本手法を実画像に対して適用した結果を示す。

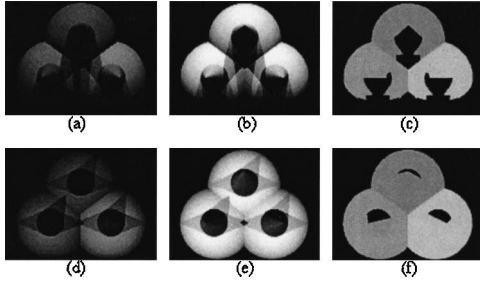


図 12 CG 画像への適用結果．入力画像：(a) 画像 1, (d) 画像 2．推定された illumination 画像：(b) 及び (e)．推定された擬似 albedo 画像：(c) 及び (f)．上の行が画像 1 に、下の行が画像 2 に対応する．

Fig. 12 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.

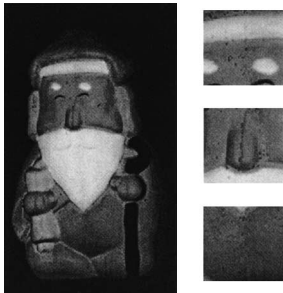


図 13 色調補正前の画像を貼り付けた結果

Fig. 13 Texture mapping before color alignment.

入力画像及び 3 次元幾何モデルは、4.1 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光源環境で得られた 2 枚の画像を用いている．4.1 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 13 に示す．図 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 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 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 14 (b)）．画像 1 及び画像 2 から推定され

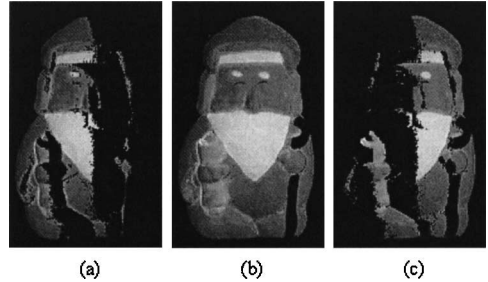


図 14 推定された擬似 albedo: (a) 画像 1, (b) 画像 1 及び画像 2, (c) 画像 2

Fig. 14 Estimated pseudo-albedo: (a)image1, (b)both, (c)image2.

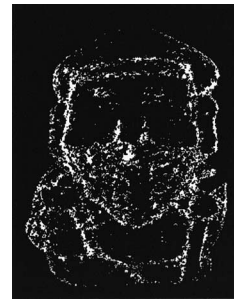


図 15 画像 1 及び画像 2 から推定された擬似 albedo の差の絶対値

Fig. 15 Absolute difference between the estimated pseudo-albedo from image1 and the one from image2.

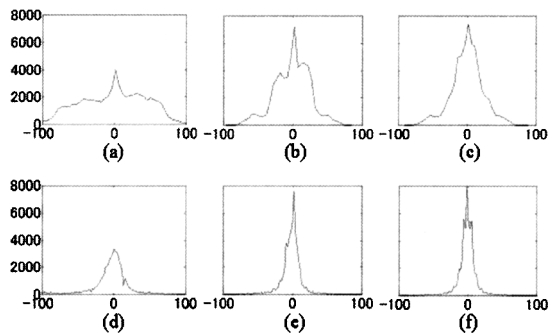


図 16 画像 1 と画像 2 の差分ヒストグラム：(a) 色調補正前 red バンド, (b) 同 green バンド, (c) 同 blue バンド, (d) 色調補正後 red バンド, (e) 同 green バンド, (f) 同 blue バンド

Fig. 16 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.

た擬似 albedo の差分の絶対値を図 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 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。

4.3 2 手法の比較

物体が 2. に述べた仮定を満たす点光源下の画像の場合は、クロマティシティに基づく手法の方が、光源球に基づく手法より有効である。しかしながら、一般光源環境下の画像や、画像にセルフシャドウがある場合、2. に述べた仮定が成立しない物体の場合は、光源球に基づく手法の方が有効であると考えられる。

5. む す び

本論文では、テクスチャマッピングにおける色調補正の新しい手法を提案した。本手法を用いると、固定された物体の周りをカメラ、光源を動かしながら計測したテクスチャから擬似 albedo を推定することが可能である。推定された擬似 albedo を 3 次元幾何モデルに貼り付けることにより、現実感の高い 3 次元モデルを得ることができる。まず、はじめに点光源下での画像に対して、3 次元モデル上での色度不変性を用いて色調補正を行う手法を述べた。この手法では、幾何エッジ等、法線方向の信頼度が低い点に関しても自然な色調を得ることができる。次に、手法を一般的な光源環境に対応可能となるように拡張した。この手法では、セルフシャドウ等の影響も考慮されているのでより複雑な光源環境にも対応可能である。また、提案手法を合成画像若しくは実画像に適用することにより、提案手法の有効性を確認した。

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。ここに帰して謝意を表す。また、貴重な意見を頂いた宮崎大輔氏にも感謝致します。

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] E. Praum, A. Finkelstein, and H. Hoppe, “Lapped textures,” SIGGRAPH2000, pp.465–470, 2000.
- [3] P.V. Sander, J. Snyder, S.J. Gortler, and H. Hoppe, “Texture mapping progressive meshes,” SIGGRAPH 2001, pp.355–360, 2001.
- [4] B. Levy, “Constrained texture mapping for polygonal meshes,” SIGGRAPH2001, pp.417–424, 2001.
- [5] P. Hanrahan and P.E. Haerberli, “Direct wysiwyg painting and texture on 3D shape,” SIGGRAPH’90, pp.215–223, 1990.
- [6] H.K. Pedersen, “Decorating implicit surfaces,” SIGGRAPH’95, pp.291–300, 1995.
- [7] P. Litwinowicz and G. Miller, “Efficient technique for interactive texture placement,” SIGGRAPH’94, pp.119–122, 1994.
- [8] 倉爪 亮, 西野 恒, M.D. Wheeler, 池内克史, “リフレクタンスエッジと濃淡エッジを用いたテクスチャのアライメント,” 信学論 (D-II), vol.J85-D-II, no.6, pp.1038–1046, June 2002.
- [9] R. Kurazume, K. Nishino, Z. Zhang, and K. Ikeuchi, “Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute,” Fifth Asian Conference on Computer Vision (ACCV), vol.1, pp.99–106, 2002.
- [10] P.J. Neugebauer and K. Klein, “Texturing 3D models of real world objects from multiple unregistered photographic views,” EUROGRAPHICS’99, Computer Graphics Form, vol.18, no.3, pp.245–256, 1999.
- [11] H. Lensch, W. Heidrich, and H.P. Seidel, “Automated texture registration and stitching for real world models,” Pacific Graphics’00, pp.317–326, 2000.
- [12] S.R. Marschner and D.P. Greenberg, “Inverse lighting for photography,” IS&T/SID Fifth Color Imaging Conference, pp.262–265, Nov. 1997.
- [13] E. Beaulac and S. Roy, “Automatic relighting of overlapping textures of a 3D model,” IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.166–173, 2003.
- [14] F. Du, T. Okabe, Y. Sato, and A. Sugimoto, “Reflectance estimation under complex illumination,” 情報学コンピュータビジョンとイメージメディア研報, 2003-CVIM-140-7, pp.49–56, Sept. 2003.
- [15] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, “Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene,” IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics, vol.5, no.1, pp.1–12, 1999.
- [16] Y. Sato, M.D. Wheeler, and K. Ikeuchi, “Object shape and reflectance modeling from observation,” SIGGRAPH’97, pp.379–387, Aug. 1997.

(平成 15 年 10 月 23 日受付, 16 年 4 月 16 日再受付)



運天 弘樹

1997 東大・工・物理卒．1999 同大大学院工学系研究科超伝導工学修士課程了．1999年4月～2001年9月(株)NTTデータに勤務．2001年10月より東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻博士課程に入学，現在に至る．Physics-based

vision の研究に従事．



池内 克史 (正員)

1973 京大・工・機械卒．1978 東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程了．工博．MIT 人工知能研究所，電総研，CMU 計算機科学部，東京大学生産技術研究所を経て，2000 年度より東京大学大学院情報学環教授．人間の視覚機能，明るさ

解析，物体認識，人間による組立作業の自動認識等の研究に従事．論文賞 (ICCV-90, CVPR-91, AIJ-92, ロボット学会誌-97, IEEE R & A 誌-98, 日本 VR 学会論文誌-00) 等受賞．IROS-95, ITSC-99 実行委員長, CVPR-96, ICCV-03 プログラム委員長等．人工知能学会, 日本ロボット学会, 日本バーチャルリアリティ学会, OSA, IEEE 各会員 IEEE fellow．2000 年度 IEEE SP ソサイエティー Distinguished Lecturer．