

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

運天 弘樹[†] 池内 克史^{††}

実世界を観測する事によりデジタルコンテンツを生成する技術は、仮想現実システム、文化財のデジタル保存等において大変重要な技術となりつつある。テクスチャマッピングは、デジタルカメラ等で撮影されたカラー画像を距離センサで撮影された3次元幾何モデルに貼り付ける手法であり、そのようなデジタルコンテンツ生成に有効な技術の一つである。テクスチャマッピングには幾何学的側面、光学的側面の二つの側面がある。幾何学的側面とは、3次元モデルを計測した距離センサとテクスチャを計測したカメラの相対的な位置関係を決定する問題であり、様々な研究が行われている。一方、テクスチャマッピングの光学的側面に関しては、これまでほとんど研究が行われてこなかった。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、各テクスチャを3次元幾何モデルに貼り付ける問題である。本論分では、テクスチャのクロマティシティに着目し、光学的に整合性が取れた状態で、複数のテクスチャを貼り付ける手法を提案する。

Color Alignment Based on Chromaticity Constancy on 3D Models in Texture Mapping

Hiroki Unten and Katsushi Ikeuchi

Recently, creating digital contents through measurements of the real world has become the important technique in the field of Virtual Reality, digital preservation of cultural heritages and so forth. One of the effective methods to create such digital contents is by using texture mapping, which maps color images on a 3D geometric model. This method has two aspects of problem: geometrical and photometrical aspect. The geometrical aspect deals with the problem of estimating the camera position and rotation relative to the 3D position of target objects. Most studies of texture mapping have focused on this aspect. On the other hand, to our knowledge, little efforts concerning the photometric aspect have been taken. And, in this paper we propose a novel method of texture mapping that more concerns on photometrical aspect. The basic idea of the method is that for a diffuse object, chromaticity of an image is independent from the geometrical data of the objects.

1. はじめに

仮想現実システムは、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。

[†] 東京大学情報理工学系研究科電子情報学専攻
Information and Communication Engineering, Graduate
School of Information Science 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

特に、仮想現実モデルの効率的生成手法に関しては、精力的に研究が行われている。現在、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。そこで、現実世界を計測することにより、仮想現実モデリングを行う手法の開発が行われてきた。仮想現実モデリングは、大きく以下の3つ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、スキヤニング、位置合わせ、統合の3段階からなる手法[1,2,3]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[4]が開発されている。

テクスチャマッピング[5,6,7]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[8,9,10]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[11,12]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[13]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。

一方、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、重み付平均を取るもの[13]や、チャンネルによるブレンディング[14]を行うものなどがあ

る。しかしながら、いずれの場合も、複数枚のテクスチャの平均を取っているにすぎず、物理的に意味のある物体の色(albedo)との対応付けが難しいと考えられる。また、光源が動く場合への対応が困難であることも予想される。一方で、Beauchesneら[15]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。

本研究では、光学モデリングに必要となるテクスチャマッピングにおいてテクスチャ間の光学的整合性をとる手法を提案する。本提案手法は、すべての点では法線方向を正確に計測できていない場合でも、他の場所にある同じ色の点の法線方向を利用して色調補正を行う。このため、幾何エッジ等の法線方向を正しく推定することが出来ない点においても違和感無く、色調を合わせる事が可能である。また色調補正を行う時に、物体色と一対一に対応する擬似 albedo を用いている。

以降、2章では、提案手法の概要について述べる。3章では、カメラキャリブレーションと法線方向推定について述べる。4章では光源方向の推定、5章では擬似 albedo 推定について述べる。6章では、実験結果を報告し、最後に7章で結論を述べる。

2. 手法の概要

本論文では、光源状況の異なる複数枚のテクスチャを、色調の連続性を保ちつつ、3次元幾何モデルに張り合わせる手法を提案する。光源は、テクスチャ取得ごとに位置が変化するが、一つの無限遠点光源とみなせるものとし、物体の特性としては、ランバーシアンであるとする。また、距離センサとカメラの相対位置関係に関しては、一連のデータ取得に対して、固定されているものとし、一回のカメラキャリブレーションにより決定できるものとする。

本手法は、図1に示すように、まず、カメラキャリブレーションにより、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位置関係を決定する(図1a)。次に、3次元幾何モデルより推定された物体表面の法線方向(図1d)と画像の値より光源方向を推定し(図1c)、光

源方向と物体表面の法線方向のなす角度(q)を決定する(図 1e)。一方で、画像からクロマティシティを算出し(図 1b)、先に求めた q から、5章に述べるクロマティシティUマップと呼ばれる分布図を作成する(図 1f)。これより、擬似 albedo を推定する(図 1g)。

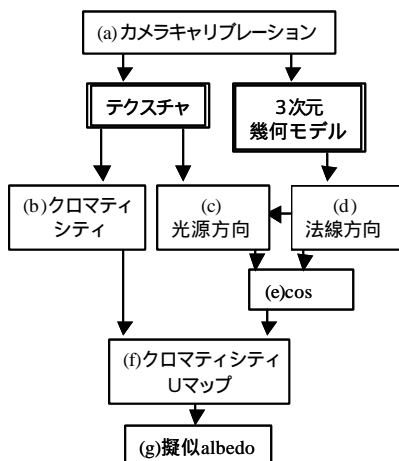


図1 擬似アルビド生成

3. カメラキャリブレーションと法線方向推定

テクスチャマッピングを行うためには、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位置関係を求める必要がある。

本論文では、距離センサにカメラを固定し、あらかじめ、キャリブレーションボックスをカメラ、距離センサ、それぞれで計測を行い、テクスチャ上での各ピクセルと3次元幾何モデルの各3次元点との対応付けを行い、カメラパラメータを推定している。

ピンホールカメラモデルを用いると、画像上でのデジタル画像座標(\mathbf{m})の同次座標、3次元幾何モデルでの3次元座標(\mathbf{M})の同次座標をそれぞれ、 $\tilde{\mathbf{m}}$ 、 $\tilde{\mathbf{M}}$ とし、以下の関係が成立する。

$$\tilde{\mathbf{m}} = P\tilde{\mathbf{M}} = A[R \quad t]\tilde{\mathbf{M}} \quad (3.1)$$

ここで、 P 、 A 、 R 、 t はそれぞれ、カメラの射影行列、内部パラメータ行列、回転行列、並進ベクトルである。 P は、焦点距離(1)、カメラ中心(2)、スキュー(2)からなる内部パラメータと、回転(3)、並進(3)からなる外部パラメータの計11個のパラメータで決定することが出来る。これらのパラメータを推定することにより、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

離センサの相対位置関係を推定する。本論文では、画像と3次元幾何モデルの対応点を複数用いて、最小二乗法により、カメラパラメータを決定している。

観測される画像の値から、物体表面の色を推定するためには、光源色、光源方向、物体表面の各点における法線方向を推定する必要がある。距離センサで計測された3次元幾何モデルを用いることにより、物体表面の法線方向を推定する。3次元幾何モデルの各頂点に対して、近傍頂点の3次元座標値の主成分分析を行い、主成分が最も小さい方向をその点の法線とした。

4. 光源方向の推定

ランバーシアン物体の場合、点光源下において観測される画像の値は、(4.1)のように表される。

$$I_m(c) = L(c)S_m(c)\cos q_m \quad (4.1)$$

ここで、 $c = \{r, g, b\}$ であり、 \mathbf{m} 、 $I_m(c)$ 、 $L(c)$ 、 $S_m(c)$ 、 q_m はそれぞれ、デジタル画像座標、 \mathbf{m} における画像の値、光源色、 \mathbf{m} における物体表面の色(albedo)、 \mathbf{m} における物体表面の法線方向と光源方向のなす角度である。また、 $L(c)S_m(c)$ を擬似 albedo と呼ぶこととする。

3次元幾何モデルでの各点の法線方向を推定すると、観測される画像の値が、(4.1)で表せることを利用して、光源方向を求めることが可能である。

以下に、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位置関係が既知の状況で、3次元幾何モデルの法線方向および画像の値から、点光源の方向を推定する手法を述べる。

観測される画像の値は、物体表面の法線方向と光源方向のなす角度(q_m)だけでなく、物体表面の色($S_m(c)$)にも依存するので、光源方向を推定するためには、物体表面上で同じ色の領域を抽出する必要がある。ここで、画像のクロマティシティは(4.2)のように表される。

$$I_{m,c} = \frac{I_m(c)}{\sum_c I_m(c)} \quad (4.2)$$

さらに、(4.1)を考慮すると、(4.3)となり、観測される画像のクロマティシティ($I_{m,c}$)は、光源方向と物体表面の法線方向のなす角度に依存せず、物体表面の色と光源色にのみ依存することが分かる。

$$I_{m,c} = \frac{L(c)S_m(c)}{\sum_c L(c)S_m(c)} \quad (4.3)$$

よって、一つの点光源下の画像の場合、画像のクロマティシティが同じ領域は、物体の色が同じ領域であるので、観測された画像の各画素に対して、(4.2)により、クロマティシティを算出し、値が同じになる領域 A を抽出する。

次に、3次元幾何モデル上の点 \mathbf{M} における法線方向を $\mathbf{n}(\mathbf{M})$ 、光源方向を \mathbf{L} とすると、 $\cos \mathbf{q}_m = \mathbf{n}(\mathbf{M}) \cdot \mathbf{L}$ となる。ここで、 \mathbf{m}, \mathbf{M} は、それぞれの同次座標 $\tilde{\mathbf{m}}, \tilde{\mathbf{M}}$ について、(3.1)の関係を満たすものとする。先程の領域 A 内では、 $S_m(c)$ は全ての点で一定なので、 $S_m(c) = S_{const}(c)$ とする。よって領域 A 内では、(4.1)は(4.4)となる。

$$I_m(c) = L(c)S_{const}(c)\cos \mathbf{q}_m = k\mathbf{n}(\mathbf{M}) \cdot \mathbf{L} \quad (4.4)$$

ここで、 k は、場所に依存しない定数である。領域 A 内の各点に対して、(4.4)が成立することから、先に求めた3次元幾何モデルの法線方向を用いて、最小二乗法により \mathbf{L} を推定することが可能である。また、 \mathbf{L} を推定することにより、各点(\mathbf{m})に対して、 $\cos \mathbf{q}_m$ が得られる。

5. 擬似albedo推定

前章までで、 $I_m(c), \cos \mathbf{q}_m$ が既知もしくは、推定されたので、(4.1)より、擬似 albedo が以下の通り推定される。

$$L(c)S_m(c) = \frac{I_m(c)}{\cos \mathbf{q}_m} \quad (5.1)$$

しかしながら、先に述べたとおり、3次元幾何モデルが非常に精度良く取得されていない場合、各点における $\cos \mathbf{q}_m$ の誤差が大きくなる場合が考えられる。この現象は、3次元エッジ等の幾何モデルの不連続部分で、特に顕著に起こることが想像される。このため、各画素に対して、(5.1)より直接擬似 albedo を推定した場合、 $\cos \mathbf{q}_m$ の推定が上手くいっていない点に関しては、擬似 albedo 推定誤差が非常に大きくなってしまふ。よって、本論文では、(5.1)より、各画素に対して、擬似 albedo を推定するのではなく、点光源の場合は画像のクロマティシティが物体表面の形状に依存しないことを用いて、色調補正を行う。

ここで、正規化した光源色 ($L_c = L(c)/L$)、および物体色 ($S_{m,c} = S_m(c)/S_m$) を考える。ただし、 $L = \sum_c L(c)$ 、 $S_m = \sum_c S_m(c)$ とし、 L, S_m をそれぞれ光源色の和、物体の albedo 和と呼ぶことにする。これらを用いて擬似 albedo を表すと、(4.3)より(5.2)が成立する。

$$\begin{aligned} L(c)S_m(c) &= I_{m,c} \sum_c L(c)S_m(c) \\ &= I_{m,c} L S_m \sum_c L_c S_{m,c} \\ &= I_{m,c} U_m \end{aligned} \quad (5.2)$$

上式における U_m を以下の通り定義する。

$$U_m \equiv L S_m \sum_c L_c S_{m,c} \quad (5.3)$$

ここで、以下の仮定を置く。

$$S_m = S(S_{m,r}, S_{m,g}, S_{m,b}) \quad (5.4)$$

この仮定は、正規化した物体色 ($S_{m,c}$) が同じである全ての点では、物体の albedo 和が同じであるという仮定である。また、光源色および光源方向は一枚の画像内では一定であるので、 $S_{m,c}$ は $I_{m,c}$ の関数として表せる。以上の結果より、上記仮定の下では(5.3)で定義された U_m は $I_{m,c}$ の関数として表せ、これを $U(I_r, I_b, I_g)$ とする。以下、 U をクロマティシティUマップと呼ぶ事にする。ここで、クロマティシティUマップ U は、テクスチャのデジタル画像座標 \mathbf{m} に直接依存することはなく、その点のクロマティシティ $I_{m,c}$ にのみ依存する。

クロマティシティ空間を量子化し、各点での U を求めることによりクロマティシティUマップを作成する。なおこの時、 $U_m = \sum_c I_{m,c} / \cos \mathbf{q}_m$ と表せることを用いている。作成方法を図2に示す。各画素に対して、クロマティシティ (I_c) および光源方向と物体表面上の法線方向のなす角度 \mathbf{q} から、 $\sum_c I_c / \cos \mathbf{q}$ を算出し(図2a)、その値をクロマティシティ空間の点 I_c に投票する(図2b)。すべての画素の投票後、クロマティシティ空間の各点 I_c に対して、 $\sum_c I_c / \cos \mathbf{q}$ のヒストグラム(図2c)の中間値を I_c における U の値(図2d)とする。

クロマティシティUマップが求められたら、画像内の各点に対して、その点のクロマティシティより U を算出し、(5.2)の U_m に代入する事により、擬似 albedo ($L(c)S_m(c)$) が算出可能である。

なお、(5.4)の、正規化した物体色 ($S_{m,c}$) が同じ

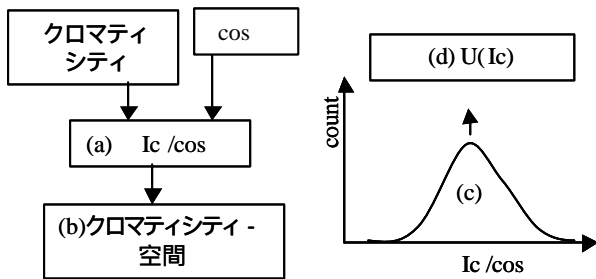


図2 クロマティシティマップ作成

である全ての点では、物体の albedo 和が同じであるという仮定は、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では成立する。

視点の異なる複数のテクスチャそれぞれに対して、擬似 albedo が推定されると、テクスチャ間の色調の連続性を保ちつつ、テクスチャマッピングを行うことが可能である。ただし、推定された擬似 albedo は、スケール倍のあいまい性があるため、テクスチャ間でのスケールの補正が必要である。なお、3次元幾何モデル上に複数のテクスチャが対応する点に対しては、各テクスチャから得られた擬似 albedo の中間値をその頂点の色としている。また、白色板等により光源色を撮影する等の方法により光源色が既知の場合は、擬似 albedo から、スケールのあいまい性を除いて albedo を推定することが可能である。

6. 実験

本章では、提案する手法を実画像に適用した結果を示す。

テクスチャ、3次元幾何モデルは、それぞれ、sonyDXC-9000, MINOLTA VIVID900 により取得した。なお、VIVID900 においては、テクスチャも同時に撮影可能であるが、高精度のテクスチャを取得するため、別のカメラを用いてテクスチャ計測を行っている。

また、データを取得する時には、3次元距離センサにカメラを固定し、光源および3次元距離センサを物体の周囲を一周するように移動させながら計測を行った。このため、カメラキャリブレーションは1回行えば十分である。キャリブレーションに用いた物体を図3に示す。

入力されるテクスチャの一部および3次元幾何モデルを図4に示す。カメラキャリブレーションを行うことにより、3次元幾何モデル上にテクス



図3 キャリブレーションボックス



図4 テクスチャ(左)、3次元幾何モデル(右)



図5 テクスチャ(左)、3次元幾何モデル(中)、重ね合わせ(右)

チャを幾何学的整合性が取れた状態で貼り付けることが出来る(図5)。

次に、3次元幾何モデルから、物体上の各点の法線方向を推定する。図6に、法線方向および視線方向から決定される輪郭線(物体上の法線方向と視線方向のなす角度が90度の領域)を示す。輪郭線が正しく推定されていることから、法線方向が正しく指定されていることが確認できる。

次に、光源方向推定結果を示す。クロマティシティが同じ点をテクスチャから抽出し、その点を用いて推定された光源方向と推定に使用した物体表面上の各点の法線方向とのなす角度を q として、 $\cos q$ とグレースケールでの画像の値との

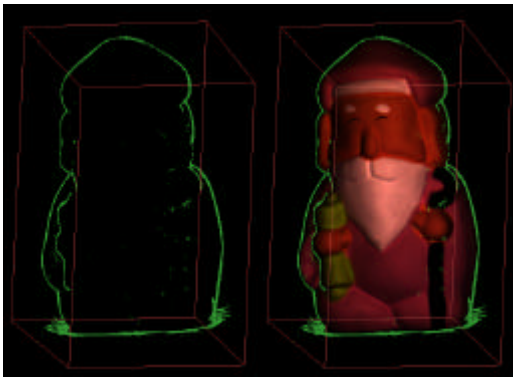


図6 輪郭線(左)、輪郭線およびテクスチャ(右)

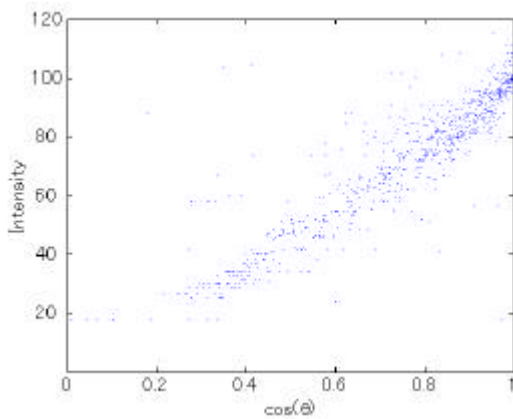


図7 光源方向推定結果

関係を図 7 に示す。(4.4)により、物体表面の色が同じ点に関しては、 $\cos \theta$ と画像の値は比例関係にあり、実際に図 7 においても比例関係が確認でき、光源推定が正しい事が確認できる。

テクスチャの各画素に対して、クロマティシティを算出し、量子化されたクロマティシティ空間の各点に対して、クロマティシティマップ $U(I_r, I_g, I_b)$ を推定した結果を図 8 に示す。色調補正を行うすべてのテクスチャに対して、このクロマティシティマップを生成し、それにしたがって、入力画像を変換する事により、擬似 albedo を推定した。図 9(上)では、視点位置、光源位置の異なる 2 枚の入力テクスチャより、擬似 albedo を推定し、3次元幾何モデルに推定した擬似 albedo を貼り付けたものを示す。図 9(下)では、推定した擬似 albedo の差分を示す。擬似 albedo が推定されている領域に関しては、2 枚のテクスチャ間で値がほぼ一致している事が確認できる。なお、図 9(下)には、一方のテクスチャのみでしか擬似 albedo が推定されていない部分も含まれている。

最後に、すべてのテクスチャを用いて、物体全

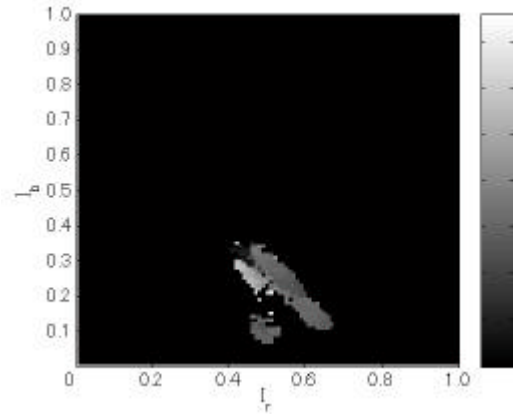


図8 クロマティシティマップ



図9 擬似albedo推定結果

体に対して、擬似 albedo を推定し、3次元幾何モデルに貼り付けた結果を図 10 に示す。3次元幾何モデル上の各点に対して、複数のテクスチャが対応する場合は、各テクスチャより推定された擬似 albedo の中間値をその点の擬似 albedo とする事により、擬似 albedo を統合した。統合擬似 albedo においては、色の不連続は見られず光学的にも整合性が取れたテクスチャマッピングが出来ている事が確認できる。

また、幾何エッジなどの法線方向が正しく推定できていない部分に関して、違和感無く、色調補正がなされている事が確認できる。



図10 統合擬似albedo

7. 結び

本報告では、カメラで撮影された複数枚のテクスチャを、距離センサで計測された3次元幾何モデルに光学的整合性を持たせて貼り付ける手法を提案した。また、光源状況の異なる複数の実画像に対して、本手法を適用し、その有効性を確認した。従来の手法では、複数枚のテクスチャの平均を取ることが主流で、得られたテクスチャはalbedoとの対応が考慮されていなかったが、本手法では、反射モデルを考慮し、擬似albedoを3次元幾何モデルに張りつける事ができるという点で優れている。また、幾何エッジ等の法線方向の推定誤差が大きい部分に関しても、本手法の有効性が確認できた。

謝辞

本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業（CREST）高度メディア社会の生活情報技術の支援を受けて行われました。ここに記して謝意を表す。また、貴重な意見を頂いた宮崎大輔氏にも感謝いたします。

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] R. Sagawa, K. Nishino, and K. Ikeuchi, "Robust and adaptive integration of multiple range images with photometric attributes," IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.2, pp.172-179, December 2001.
- [3] K. Nishino and K. Ikeuchi, "Robust simultaneous registration of multiple range images", Fifth Asian Conference on Computer Vision (ACCV), pp.454-461, 2002.
- [4] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene," IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, Vol.5, pp.1-12, 1999.
- [5] E. Praum, A. Finkelstein, and H. Hoppe, "Lapped textures," SIGGRAPH2000, pp.465-470, 2000.
- [6] P. V. Sander, J. Snyder, S. J. Gortler, and H. Hoppe, "Texture mapping progressive meshes," SIGGRAPH2001, pp.355-360, 2001.
- [7] B. Levy, "Constrained texture mapping for polygonal meshes," SIGGRAPH2001, pp.417-424, 2001.
- [8] P. Hanrahan and P. E. Haeberli, "Direct WYSIWYG painting and texture on 3D shape," SIGGRAPH90, pp.215-223, 1990.
- [9] H. K. Pedersen, "Decorating implicit surfaces," SIGGRAPH95, pp.291-300, 1995.
- [10] P. Litwinowicz and G. Miller, "Efficient technique for interactive texture placement," SIGGRAPH94, pp.119-122, 1994.
- [11] R. Kurazume, M. D. Wheeler, and K. Ikeuchi, "Mapping textures on 3D geometric model using reflectance image," Data Fusion Workshop in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2001.

- [12] 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, pp99-106, 2002.
- [13] P. J. Neugebauer and K. Klein, "Texturing 3D models of real world objects from multiple un-registered photographic views," EURO-GRAPHICS'99, 1999.
- [14] H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel, " Automated texture registration and stitching for real world models," Pacific Graphics'00, pp. 317-326, 2000.
- [15] E. Beauguesne and S. Roy, "Automatic re-lighting of overlapping textures of a 3D model," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.166-173, 2003.