

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ンメント

倉爪 亮[†] 西野 恒[†] Mark D. Wheeler^{††} 池内 克史[†]

Mapping Textures on 3D Geometric Model Using Reflectance Image

Ryo KURAZUME[†], Ko NISHINO[†], Mark D. WHEELER^{††}, and Katsushi IKEUCHI[†]

あらまし レーザスキャナ等により測定された実物体の3次元幾何モデルをより現実感高く表現するには、実物体表面のテクスチャをカラーセンサにより撮影し、3次元幾何モデルに貼り付けて表示するテクスチャマッピングが有効である。しかし通常、テクスチャマッピングを実現するには、レーザ、カラーセンサ間の正確なキャリブレーションを必要とし、またキャリブレーション後は両センサを常に固定しておく必要がある。一方、レンジデータやCADモデルから幾何エッジを抽出し、それとカラー画像上の濃淡エッジの位置を一致させることで、両センサの相対位置を推定する方法も提案されている。この方法は、小さなalbedo分散を有する表面に対しては有効であるが、複雑なテクスチャを有する対象物では局所解に陥る可能性が高い。そこで本論文では、通常、レンジデータを取得する際に同時に測定されるレーザのリフレクタンス画像に着目し、これから得られるリフレクタンスエッジとカラー画像上の濃淡エッジから両センサの相対位置関係を測定することで、正確なテクスチャマッピングを行う方法を提案する。

キーワード レーザスキャナ、テクスチャマッピング、リフレクタンス、センサアラインメント

1. ま え が き

仮想現実モデルの効率的作成法の開発は、仮想現実感(VR)の分野で最も重要な研究課題の一つである。現在、仮想現実モデルの多くはオペレータの手作業により作成されているため、多くの時間と労力、多額の費用が必要となっている。したがってこの作業を自動化できれば、仮想現実システムの低価格化が可能となり、よりいっそうの普及が期待される。そこで我々はこれまでに、実物体の観察に基づき仮想現実モデルを自動作成する“modeling-from-reality(MFR)”の概念を提案している。この手法は以下の三つの要素からなる。

- (1) 仮想物体の幾何モデルの作成法
- (2) 仮想物体の光学モデルの作成法
- (3) 仮想物体の実環境、あるいは仮想環境への統合法

我々はこれまでに、幾何モデルの作成法に関して(1)メッシュ生成(スキャニング)、(2)位置合せ(アラインメント)、(3)統合(マージング)からなる3段階の手法を開発した[1]。また光学モデルの作成法に関して、実物体の観察からレンダリングモデルを自動的に作成する手法として、モデルベース[3]と固有テクスチャ法[4]の二つのレンダリング法を開発した。更に実センサと仮想物体の統合を目指し、実際の光源環境分布を観測、推定し、実環境に仮想物体を違和感なく配置する新たなレンダリング法を開発した[5]。

さて、実物体の光学モデルを作成する手法の一つに、実物体の見えをカラーセンサで撮影し、レンジセンサ等により測定した幾何モデル上へ貼り付ける、テクスチャマッピングの手法[7],[13]~[15]がある。この正確なテクスチャマッピングを行うには、カラーセンサ、レンジセンサ各視点間の相対位置関係を知る必要があるが、これにはOGISやCyberwaresなど距離画像とカラー画像が同じ視点位置から同時に得られるような特別な光学系を有するレンジセンサを使用する方法や、あるいはレンジセンサとカラーセンサを同一の雲台上に固定し、両視点の相対位置関係をキャリブレーション

[†] 東京大学生産技術研究所, 東京都
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

^{††} サイラテック ノロジ株式会社, 米国
Cyra Technologies, Inc. 8000 Capwell Drive, Oakland, CA 94621, U.S.A.

により測定する方法などが考えられる。しかし通常、デジタルカメラなどのカラーセンサはレンジセンサに比べて小型軽量であり、重いレンジセンサを持ち運ぶことなく、カラーセンサを任意の位置に移動させてカラー画像を自由に撮影し、得られたカラー画像と幾何モデルを比較して両視点の相対位置関係を推定できるのが望ましい。

本論文では、このテクスチャマッピングに必要なレンジセンサとカラーセンサの相対位置を測定するために、多くのレンジセンサにおいて距離画像の付加的な情報として得られるリフレクタンス画像に着目し、レンジセンサから得られる3次元エッジ点とカラーセンサから得られる2次元エッジ点間の3次元誤差をロバスト推定法を用いて最小化する[11],[12]ことにより、両センサ間の相対位置関係を推定する新たな手法を提案する。

2. 関連する手法

距離画像とカラー画像の位置合せ法として、Viola [8]は統計的手法を提案している。またAllenら[7]はレンジデータに平面を当てはめ、それらの交線エッジとカラー画像のエッジを比較することで位置合せを行った。一方、Lenschら[9],[10]はシルエット画像を用い、Downhill Simplex法を利用した2D-3Dアラインメント法を提案している。またいくつかの認識アルゴリズムも距離エッジと濃淡エッジの位置合せのために用いることができる[11]~[13]。これらの方法は、小さなalbedo分散を有する表面に対しては比較的うまく機能するが、大仏のような複雑なテクスチャを有する表面では局所解に陥る可能性が高い。

一方、Elstromら[6]は、リフレクタンス画像を用いたカラーセンサとレンジセンサの相対位置の推定法を提案している。彼らは、

(1) リフレクタンス画像とカラー画像からコーナディテクタにより特徴点を抽出

(2) 特徴点周囲の両画像差分と特徴点形状を用いた類似度計算による特徴点間の対応付け(誤対応を視差の大小で判定)

(3) Closed-formの式を解いて大まかな相対姿勢を計算

(4) リフレクタンス画像とカラー画像の対応特徴点の奥行をステレオで計算し、それとレーザの奥行が一致するように、最急降下法で相対位置を再計算することで相対位置関係を決定している。この手法は対象

がテクスチャの少ない平面で構成され、単純な直線エッジが多く抽出される場合には有効であるが、コーナディテクタを用いているために、対象物が曲面で構成されている場合には不向きである。また異なる光学系から得られるリフレクタンス画像とカラー画像の差分から、十分正確な特徴点間の対応関係が得られるか疑問である。更に曲面の輪郭線形状は視線方向によって変化するため、異なる視点から得られるリフレクタンス画像の輪郭線エッジとカラー画像の輪郭線エッジの位置は一般には一致しない。したがって、正確な位置合せのためには、抽出されたリフレクタンスエッジからあらかじめ輪郭線エッジを除去しなければならない。

3. テクスチャの距離データへの位置合せ

異なるセンサの相対位置関係を決定するには、キャリブレーションボードと固定器具を用いて精密にキャリブレーションを行えばよい。しかしこの方法は相対関係が求まった後、レンジセンサとカラーセンサを同じ固定器具に常に固定する必要があり使いづらい。

一般的に、ERIMやPerceptron、あるいは我々の所有するCyraXなどの多くのレンジセンサからは、距離画像とともにそれぞれのピクセルでのレーザ反射エネルギー強度の集合であるリフレクタンス画像が得られる。このリフレクタンス画像は同じ受光系を通して、距離画像と同一の位置に得られる。すなわち反射時間が奥行を表し、反射強度がリフレクタンスを示す。

そこで本論文では、このリフレクタンス画像を距離画像とカラー画像との位置合せに利用する手法を提案する。リフレクタンス画像もカラー画像も表面の反射特性に深く関係する量であり、両者は類似性が強い。更に上述したように、リフレクタンス画像は距離画像と全く同じ位置に得られることから、カラー画像とリフレクタンス画像の位置合せとカラー画像と距離画像の位置合せは同一のものである。これらのことから、距離画像とカラー画像の位置合せを直接行うのではなく、まずリフレクタンス画像とカラー画像の位置合せを行い、得られたパラメータを同じピクセル位置に得られる距離画像に適用することで、より容易にテクスチャマッピングを行うことができると考えられる。距離画像とカラー画像の位置合せを直接行う従来の手法[7],[11]~[13]は、例えば人工建造物など対象物体が単純な平面等で構成され、面の方向が距離画像から得られたエッジ周辺で急激に変化し、したがってカラー画像でもその周辺で反射光強度が大きく変化するよう

な場合には有効である。しかし表面のテクスチャ模様や材質の変化に伴う色の違いなど、カラー画像中に距離画像にはない特徴が多数得られる場合や、軸対称物体など対象物が明確な幾何学的特徴を有さない場合には、カラー画像から得られるエッジ位置に距離画像のエッジが観察されず、これらの方法を用いることができない。一方、本論文で提案するリフレクタンス画像を利用する方法では、色の違いなど表面反射特性の変化に応じてリフレクタンス値も変化するため、カラー画像と同様の特徴がリフレクタンス画像から得られ、これをもとにカラー画像とリフレクタンス画像、すなわちカラー画像と距離画像の位置合せを行うことが可能である。

具体的には、リフレクタンス画像から Canny オペレータ [17] により得られるエッジと、カラー画像を濃淡画像に変換し、同様に Canny オペレータを適用して得られるエッジ間の 3 次元誤差が最小となるように、レンジセンサとカラーセンサの相対位置を漸的に決定した。リフレクタンス画像のエッジは以下のいくつかの理由のより生成される。まず反射物体の色や材質が異なると、レーザ反射率もそれぞれ異なるため、リフレクタンスの不連続が生じ、したがってリフレクタンス画像からエッジが得られる。例えば Cyrax レンジスキャナは緑色の半導体レーザを用いているため、この波長に対する吸収率が異なる色、材質の境界では、リフレクタンスエッジが抽出できる。またカラー画像でも、通常、異なる材質は異なる色を有するので、リフレクタンスエッジと同じ位置に不連続が現れる。特にレーザに近い波長 (Cyrax の場合は G チャンネル) の画像から得られる濃淡エッジは、リフレクタンスエッジに近い特徴が現れると考えられる。また、距離画像内の小さな距離領域に沿ったジャンプエッジもまた、リフレクタンス画像でジャンプエッジとして認識される。これらのジャンプエッジは通常それに沿って小さな影を伴うので、カラー画像でも観察される。オクリュージョン境界領域ではリフレクタンス画像、カラー画像ともに不連続が観察される。これらリフレクタンス画像内の不連続部をカラー画像内のそれと合わせることで、距離画像とカラー画像間の相対位置関係を知ることができる。

位置合せに先立ち、まずリフレクタンス画像から得られたリフレクタンスエッジを 3 次元幾何モデルに貼り付ける。ただしリフレクタンス画像から得られたオクリュージョン境界領域のエッジは、前述のように視

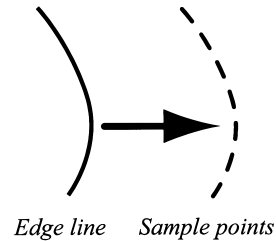


図 1 エッジ点のサンプリング
Fig. 1 Edge sampling.

線の位置、方向によって観察される位置が変化するため、あらかじめリフレクタンスエッジから取り除いておく。しかし、このオクリュージョン境界領域は、現在の視線方向を元に 3 次元幾何モデルから推定できるため、位置合せ時にはこのオクリュージョン境界エッジも自動的に計算し、位置合せに用いることにする。これらの処理により、位置合せ問題は

- 3 次元幾何モデル表面に貼り付けられた 3 次元リフレクタンスエッジ
 - 3 次元幾何モデル表面の 3 次元オクリュージョン境界エッジ
- と、

● 2 次元画像平面上の 2 次元濃淡エッジ
の位置合せとなる。更に図 1 のように、抽出されたそれぞれのエッジをそれに沿った点の集合として表すことにより、位置合せは 3 次元パッチ上の 3 次元座標点と 2 次元画像平面上の濃淡エッジに沿った 2 次元座標点間、すなわち 3D 点-2D 点の対応となる。

3D 点-2D 点の位置合せは以下の三つのステップからなる。

- (1) 現在の視線方向をもとに観測可能な 3 次元リフレクタンスエッジと 3 次元オクリュージョン境界エッジを抽出しする。
- (2) 3 次元エッジ点と 2 次元濃淡エッジ点間の対応を決定する。
- (3) 対応を元にロバスト推定法を用いて相対位置関係を推定する。

3.1 可視判定と対応付け

Canny オペレータ [17] をリフレクタンス画像に適用してリフレクタンスエッジを得る。これらからエッジ点が求められ、3 次元幾何モデル表面に配置される。まずどのエッジ部分が現在の視線方向から可視であるかを次式で判断する。

$$P_i = \begin{cases} \text{visible} \cdots n \cdot v \geq 0 \\ \text{invisible} \cdots \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで n はパッチの法線, v は現在の 3 次元幾何モデルから見た, 現在の視線方向である. また, オクリュージョン境界領域も同様にして

$$P_i = \begin{cases} \text{edge} \cdots 0 < n \cdot v \leq t \\ \text{not edge} \cdots \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

を調べ, これを満たすパッチをオクリュージョン境界領域に沿ったエッジ点として選択する. ただし, t は適当なしきい値である.

またエッジ対応付けをより正確に行うために, エッジ追跡の様々なパラメータを調節して細かなエッジを消去し, 支配的なエッジだけを抽出する.

3.2 対応付け

3 次元エッジ点と 2 次元濃淡エッジ点の対応関係を決定するために, 図 2 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. この点の組 P, u, y は次の相対位置の推定で誤差関数の値を評価するのに使われる.

3.3 M 推定法を用いた相対位置推定

2 次元濃淡エッジ点と 3 次元エッジ点を一致させる両センサの相対位置関係を推定するために, ロバスト推定法の一手法である M 推定法 [19] を用いた. まず, 2 次元濃淡エッジ点と 3 次元エッジ点間の 3 次元誤差を評価するために, 図 2 に示すように, カメラ中心と 2 次元濃淡エッジ点 y を結ぶ直線 l を 3 次元エッジ点方向に延長した直線を考え, 3 次元エッジ点からこ

の線へ下ろした垂線 PH の長さを 3 次元誤差 z_i とした [18]. すなわち,

$$z_i = Z_i \sin \theta \quad (3)$$

である. ここで Z_i はカメラ焦点と 3 次元エッジ点間の距離であり, θ は濃淡エッジ点と 3 次元エッジ点のなす角である. またすべての誤差 E を以下の式で定義する.

$$E(P) = \sum_i \rho(z_i) \quad (4)$$

ここで ρ は推定関数, P はカメラとレンジセンサ間の相対位置である. この $E(P)$ を最小にする相対位置 P は次式で得られる.

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \sum_i \frac{\partial \rho(z_i)}{\partial z_i} \frac{\partial z_i}{\partial P} = 0 \quad (5)$$

ここで誤差項評価のための重み関数 $w(z)$ を次式で定義する.

$$w(z) = \frac{1}{z} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (6)$$

これにより以下の重み付き最小 2 乗法を得る.

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \sum_i w(z_i) z_i \frac{\partial z_i}{\partial P} = 0 \quad (7)$$

本アルゴリズムでは, 推定関数 $\rho(z)$ に次式で表される連続なローレンツ関数を用い, 式 (4) で与えられる誤差 E を共役こう配法を用いて漸近的に最小化する.

$$\rho(z) = \frac{\sigma^2}{2} \log(1 + (z/\sigma)^2) \quad (8)$$

この最小値を与える P が, カメラとレンジセンサの相対位置関係である.

4. 実験結果

4.1 計算機シミュレーション

提案した 3D 点-2D 点の位置合せ手法の有効性を確認するために, 直径 10 mm, 長さ 20 mm の円柱が, カラーセンサとレンジセンサの 1 m 手前に置かれている状況を考え, 計算機シミュレーションを行った.

ただしシミュレーションでは, レーザスキャナから得られるリフレクタンスの情報は仮定せず, オクリュージョン境界領域の計算から得られる 3 次元エッジ点のみを用いた. またカラーセンサの解像度は 300 dpi, 焦点距離は 70 mm とした. 図 3 にシミュレーションに

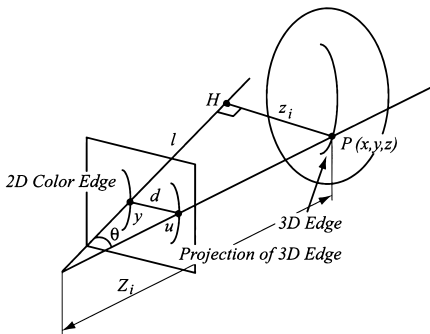


図 2 2 次元エッジ点と 3 次元エッジ点の誤差
Fig. 2 2D distance and 3D distance.

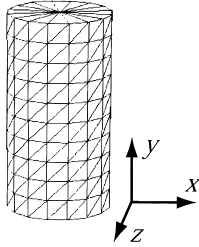


図3 シミュレーションモデル
Fig.3 Simulation model.

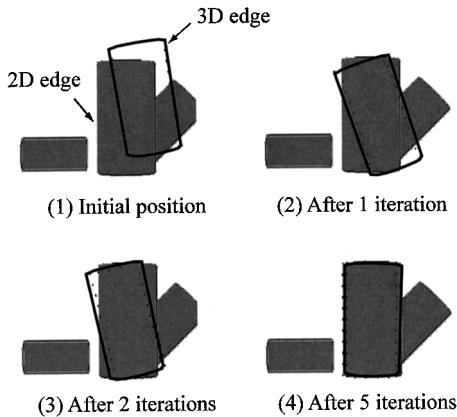


図4 シミュレーション結果
Fig.4 Simulation results.

表1 推定関数と収束性能

Table 1 Convergence for some estimation functions.

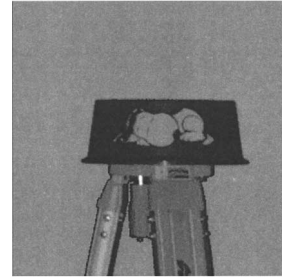
Estimation func.	Number of convergence [times]
L^2	70/100
Tukey	68/100
Huber	78/100
Geman-McClure	70/100
Welsch	59/100
Lorentzian	81/100

表2 アラインメント精度 [mm (pixel)]
Table 2 Position errors [mm (pixel)].

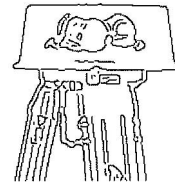
	x	y	z	θ [deg.]
Average	0.14 (0.12)	-0.20 (0.16)	-967.81	4.0
STD.	0.13 (0.11)	1.89 (1.56)	5.94	4.1

使用した円柱モデルを、図4にアラインメントを実行している様子を示す。

まず、本アルゴリズムで使用したM推定法、及びその推定関数であるローレンツ関数に対し、その妥当性を検証するための計算機実験を行った。実験では実際の位置から最大50mm、20度離れた位置、姿勢を初期位置として与え、付録に示す代表的な6種類の推



(a) Reflectance image

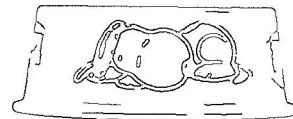


(b) Reflectance edges

図5 絵皿のリフレクタンス画像
Fig.5 Reflectance image of the dish.



(a) Color image



(b) Intensity edges

図6 絵皿のテクスチャ画像
Fig.6 Texture image of the dish.

定関数を設定してそれぞれ100回シミュレーションを繰り返す、各推定関数に対する最適解への収束回数を調べた。このうち L^2 は通常最小2乗法である。結果を表1に示す。この計算機実験の結果、本論文の問題設定ではローレンツ関数が最も最適解への収束性能が高いことがわかった。

また、推定関数としてローレンツ関数を用いたときの、位置、 y 軸の傾きそれぞれの平均と標準偏差を表2に示す。表2で、特に奥行 z 方向の位置が実際の

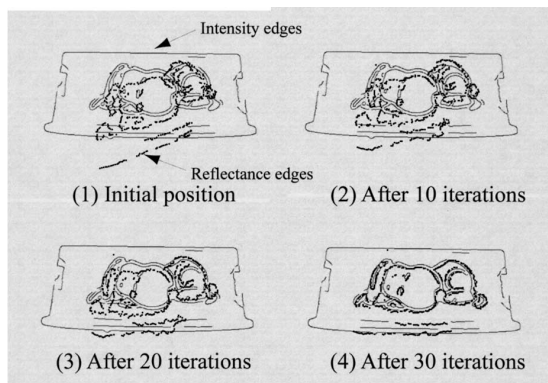


図 7 リフレクタンスエッジと濃淡エッジのアラインメント

Fig. 7 Aligned intensity edges with reflectance edges.



図 8 テクスチャマッピングされた絵皿

Fig. 8 Aligned color texture on the dish.



図 9 鎌倉大仏の幾何モデル

Fig. 9 Geometric model of the Kamakura Great Buddha.

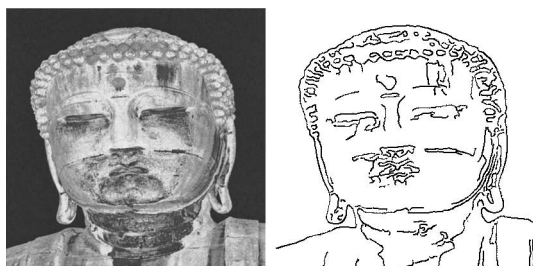


図 10 鎌倉大仏のリフレクタンس画像

Fig. 10 Reflectance image of the Kamakura Great Buddha.



図 11 鎌倉大仏のテクスチャ画像

Fig. 11 Texture image of the Kamakura Great Buddha.

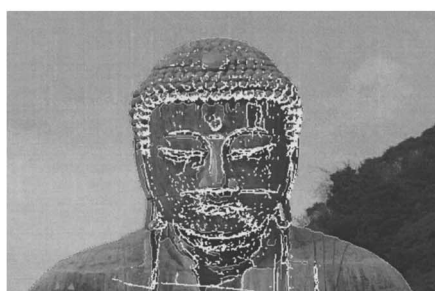
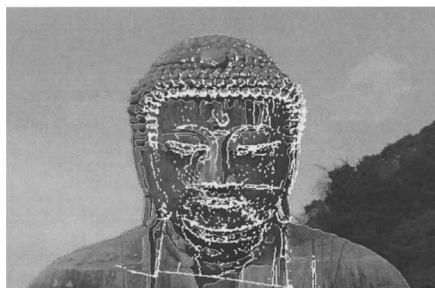
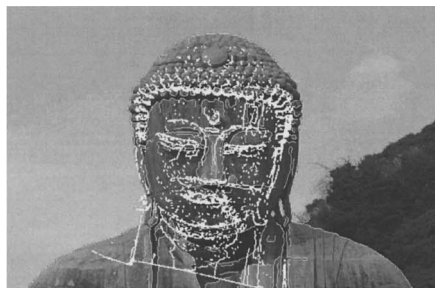


図 12 リフレクタンスエッジと濃淡エッジのアラインメント

Fig. 12 Aligned intensity edges with reflectance edges.

位置から 32mm ほど観測者側に計算されているのは、式 (2) を満たすオクリュージョン境界エッジ点を三角パッチの重心位置として求めているため、エッジ点が実際の境界よりも内側に観測されるためである。したがってこれは三角パッチが十分に設定されていれば

問題とならない．このように，提案した 3D 点-2D 点の位置合せ手法により，カメラとレンジセンサの正確な相対位置関係が求められることがわかった．

4.2 絵皿のテクスチャマッピング

次に実際に CyraX レーザスキャナを用いて表面に絵柄のある皿の 3 次元形状を測定し，提案した手法でテクスチャマッピングを行った．

図 5 にリフレクタンス画像とリフレクタンス画像から抽出されたリフレクタンスエッジを，図 6 にデジタルカメラ (Nikon, D1) で撮影されたカラーテクスチャ画像と，この 24 ビットカラー画像を 8 ビット濃淡画像に変換し，Canny フィルタを適用して抽出した濃淡エッジを示す．ただし図 5 では，明るいほどリフレクタンスが大きいことを示す．また図 7 に M 推定法によりリフレクタンス画像とカラー画像の位置合せを行っている様子を示す．幾何モデルや CAD データから幾何エッジを抽出し，濃淡エッジと比較する方法では，このような軸対称な物体に対して，絵柄の位置までも合わせるような正確なテクスチャマッピングは

不可能である．一方，提案した位置合せ法は，表面の絵柄から得られるリフレクタンス情報も用いているため，それを手掛りにして図 8 に示すように現在のカラー画像を幾何モデル上に正確に貼り付けることができています．

4.3 大仏のテクスチャマッピング

我々はこれまでに日本国内の文化遺産をレーザス



図 13 テクスチャマッピングされた鎌倉大仏
Fig.13 Aligned color texture on the 3D geometric model.

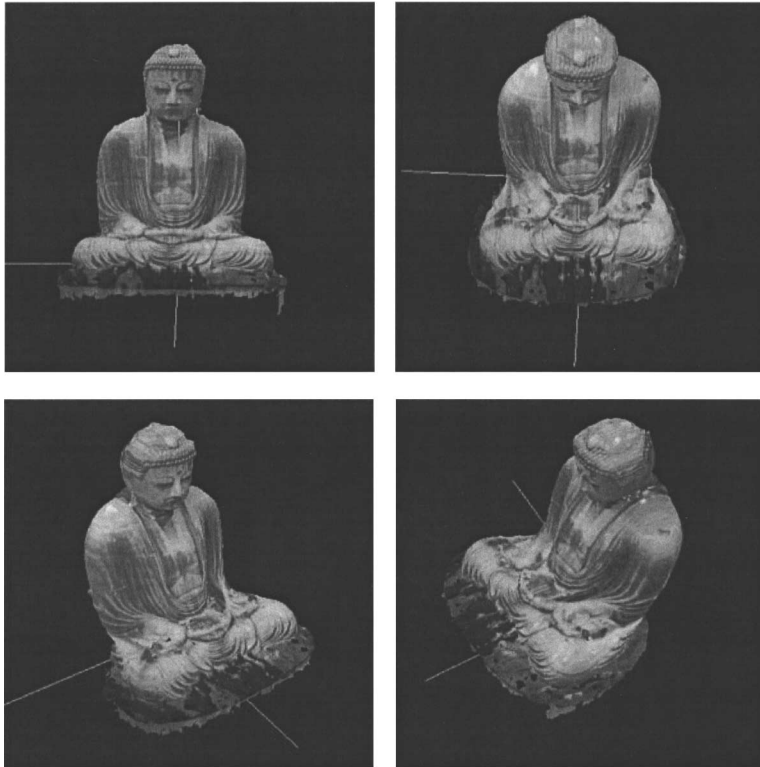


図 14 テクスチャマッピングされた鎌倉大仏
Fig. 14 The Kamakura Great Buddha with the color texture image.

キャナで 3 次元デジタルコンテンツ化するプロジェクトを推進してきており [16]。その一環としてこれまでに鎌倉大仏をレーザスキャナで観測し、大仏像の幾何モデルを作成した。図 9 に得られた大仏幾何モデルを示す。そこで、この構築した幾何モデルに対し、本論文で提案した手法を用いてデジタルカメラから得られたカラーテクスチャ画像を貼り付けた。図 10 にリフレクタンس画像とリフレクタンス画像から抽出されたリフレクタンスエッジを、図 11 にカラーテクスチャ画像と抽出された濃淡エッジを、また図 12 に M 推定によりリフレクタンス画像とカラー画像の位置合せを行っている様子を示す。図 10 と図 11 を比較すると、例えば額の錆や青銅接合部の形状など、リフレクタンス画像とカラー画像が高い類似性を有することがわかる。更に図 13 に現在のカラー画像を幾何モデル上に貼り付けた結果を示す。また同様の手法を用いて鎌倉大仏の全身幾何モデルにテクスチャイメージを貼り付けた結果を図 14 に示す。

5. む す び

本論文では、実物体の光学モデルを作成する手法の一つとして、レンジセンサから得られるリフレクタンス画像からリフレクタンスエッジを抽出し、同様にカラー画像から得られた濃淡エッジと比較することで、レンジセンサとカラーセンサの相対位置関係を求め、幾何モデル上にテクスチャイメージを貼り付ける手法を提案した。

本手法は、まずリフレクタンス画像から Canny フィルタによりリフレクタンスエッジを抽出し、次にこのリフレクタンスエッジを視線方向と 3 次元幾何モデルから計算されるオクリュージョン境界エッジとともに 3 次元幾何モデル上に貼り付ける。次に画像平面上でこれら 3 次元エッジ点と 2 次元濃淡エッジ点との対応付けがなされ、それぞれの対応で 3 次元エッジ点から 2 次元濃淡エッジ点を延長した直線への最短距離として 3 次元誤差が計算される。次にこの誤差の総和を最小化するように、ロバスト推定法の一手法である M 推定法を用いて、レンジセンサとカラーセンサの相対位置関係が求められる。提案した手法を用いて、レーザスキャナにより測定した鎌倉大仏の幾何モデル上にデジタルカメラで撮影したテクスチャを貼り付け、提案した手法の有効性を確認した。

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。

文 献

- [1] 池内克史, “画像による実物体のモデルの作成,” 日本ロボット学会誌, vol.16, no.6, pp.29–32, 1998.
- [2] 池内克史, 佐藤洋一, 西野 恒, 佐藤いまり, “複合現実感における光学的整合性の実現,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌「複合現実感」特集号, vol.4, no.4, pp.623–630, Dec. 1999.
- [3] Y. Sato, M.D. Wheeler, and K. Ikeuchi, “Object shape and reflectance modeling from observation,” Proc. ACM SIGGRAPH 97, In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series 1997, pp.379–387, ACM SIGGRAPH, Aug. 1997.
- [4] K. Nishino, Y. Sato, and K. Ikeuchi, “Eigen-texture method: Appearance compression based on 3D model,” Proc. Computer Vision and Pattern Recognition '99, vol.1, pp.618–624, June 1999.
- [5] 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, no.1, pp.1–12, Jan. 1999.
- [6] M.D. Elstrom and Philip W. Smith, “Stereo-based registration of multi-sensor imagery for enhanced visualization of remote environments,” Proc. 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.1948–1953, 1999.
- [7] I. Stamos and P.K. Allen, “Integration of range and image sensing for photorealistic 3D modeling,” Proc. 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1435–1440, 2000.
- [8] P. Viola and W.M. Wells III, “Alignment by maximization of mutual information,” International J. Computer Vision, vol.24, no.2, pp.137–154, 1997.
- [9] H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel, “Automated texture registration and stitching for real world models,” Pacific Graphics '00, pp.317–326, Oct. 2000.
- [10] H. Lensch, W. Heidrich, and H.P. Seidel, “Hardware-accelerated silhouette matching,” SIGGRAPH Sketches, 2000.
- [11] M.D. Wheeler, “Automatic modeling and localization for object recognition,” Technical Report (Ph.D. Thesis), CMU-CS-96-188, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Oct. 1996.
- [12] M.D. Wheeler and K. Ikeuchi, “Sensor modeling, probabilistic hypothesis generation, and robust localization for object recognition,” IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.17, no.3, March 1995.
- [13] 松下, 金子, “三次元物体表面テクスチャを得る効率的マッピング法,” 信学論 (D-II), vol. J83-D-II, no.2, pp.525–534, Feb. 2000.
- [14] P. Debevec, D.J. Taylor, and J. Malik, “Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry and image-base approach,” Proc. SIGGRAPH'96, pp.11–20, 1996.

- [15] P. Debevec, Y. Yu, and G. Borshukov, "Efficient view-dependent image-based rendering with projective texture-mapping," 9th Eurographics workshop on rendering, pp.105-116, 1998.
- [16] D. Miyazaki, T. Ooishi, T. Nishikawa, R. Sagawa, K. Nishino, T. Tomomatsu, Y. Takase, and K. Ikeuchi, "The Great Buddha project: Modelling cultural heritage through observation," VSMM2000 (6th International Conference on Virtual Systems and Multimedia), pp.138-145, 2000.
- [17] J.F. Canny, "A computational approach to edge detection," IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.8, no.6, 1986.
- [18] P.J. Besl and N.D. McKay, "A method for registration of 3-D shapes," IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.14, no.2, pp.239-256, 1992,
- [19] 徐 剛, 辻 三朗, 3次元ビジョン, 共立出版, 1998.

付 録

M 推定法の推定関数

4. で計算機シミュレーションに用いた M 推定法の推定関数を示す. ただし, 実験ではすべての推定関数で $\sigma = 10[\text{mm}]$ とした.

L2

$$\rho(z) = \frac{z^2}{2} \tag{A.1}$$

Tukey

$$\rho(z) = \begin{cases} (1 - (1 - z_s^2/s^2)^3)/s & z_s < s \\ 1/s & \text{otherwise} \end{cases} \tag{A.2}$$

ただし,

$$z_s^2 = z^2/\sigma^2 \tag{A.3}$$

であり, 実験では $s = 3$ とした.

Huber

$$\rho(z) = \begin{cases} 0.5z_s^2 & z_s < s \\ s \cdot z_s - 0.5s^2 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{A.4}$$

ただし,

$$z_s^2 = z^2/\sigma^2 \tag{A.5}$$

であり, 実験では $s = 1.5$ とした.

Geman-McClure

$$\rho(z) = \frac{z^2/2}{1 + z^2} \tag{A.6}$$

Welsch

$$\rho(z) = \frac{\sigma^2}{2} [1 - \exp(z/\sigma)^2] \tag{A.7}$$

Lorentzian

$$\rho(z) = \frac{\sigma^2}{2} \log(1 + (z/\sigma)^2) \tag{A.8}$$

(平成 13 年 4 月 26 日受付, 8 月 27 日再受付)



倉 爪 亮

1991 東工大機械物理工学専攻修士課程了. 同年(株)富士通研究所入社, 1995 同学機械宇宙学科助手, 2000 スタッフード大客員研究員, 同年東京大学生産技術研究所博士研究員, 現在に至る. 群ロボット, 歩行機械, レーザ計測の研究に従事. 1993 年度日本ロボット学会誌論文賞受賞. 日本ロボット学会, 日本機械学会各会員. 博士(工学).



西 野 恒

1999 東大大学院工学系研究科電子情報工学専攻修士課程了. 同年同大学院理学系研究科情報科学専攻博士課程入学, 現在に至る. コンピュータビジョン, コンピュータグラフィックスに関する研究に従事. VSMM2000 論文賞, 平 11 年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌論文賞を受賞. 情報処理学会, 日本バーチャルリアリティ学会各学生会員.



Mark Damon Wheeler

1989 Tulane 大学計算機工学科 BSE 卒. 1996 年 CMU コンピュータサイエンス学科 Ph.D. in Computer Science 了. Apple Computer, Inc. を経て Cyra Technology, Inc.



池内 克史 (正員)

1973 京大・機械卒, 1978 東大大学院情報工学博士課程了. 工博. MIT 人工知能研究所, 電総研, CMU 計算機科学部を経て, 1996 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, 仮想現実感モデルの自動生成などの研究に従事. 論文賞(ICCV-90) CVPR-91, AIJ-92, 日本ロボット学会誌-97, IEEE R&A 誌-98, 受賞. 情報処理学会, 人工知能学会, OSA, IEEE(Fellow) 各会員.