-論 文-

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. はじめに

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.従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, より一層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3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

† 東京大学 生産技術研究所 , 東京都

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)位置合わせ(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 ても,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2つのレンダリング法を開発した.さ ら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],[14],[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 雲台に固定し,両視点の相対位置関係をキャリブレー

電子情報通信学会論文誌 X Vol. Jxx-X No.xx pp.1-10 xxxx 年 xx 月

1

Institute of Industorial Scence, The University of Tokyo, 4-6-1, komaba, meguro-ku, Tokyo,153-8505, Japan

^{††} Cyra Technologies, Inc., U.S.A. Cyra Technologies, Inc. 8000 Capwell Drive, Oakland, CA. 94621, U.S.A.

ション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わせ法として,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わせ 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わせの ために用いることができる [11],[12],[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 点の奥行きをステレオで計算し,それとレーザの奥行 きが一致するように,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.さら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.従って,正確 な位置合わせのためには,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わせ

異なるセンサの相対位置関係を決定するには,キャ リプレーションボードと固定器具を用いて精密にキャ リプ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 が奥行きを表し,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わ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.さらに上述したように,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わせとカラー画像と 距離画像の位置合わ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わせを直接 行うのではなく,まずリフレクタンス画像とカラー画 像の位置合わせを行い,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わせを直 接行う従来の手法[7],[11],[12],[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, 従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わ 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近的 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,従ってリフレクタン 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.

位置合わせに先立ち,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,位置合わ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,位置合わせに用いることに する.これらの処理により,位置合わせ問題は

• 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 の位置合わせとなる.さらに図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,位置合わせは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.



Edge line Sample points 図 1 エッジ点のサンプリング Fig. 1 Edge sampling

3D 点-2D 点の位置合わせは以下の 3 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.

$$P_i = \begin{cases} visible \cdots n \cdot v \ge 0\\ invisible \cdots otherwise \end{cases}$$
(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

$$P_i = \begin{cases} edge \cdots 0 < n \cdot v \le t \\ not \ edge \ \cdots \ otherwise \end{cases}$$
(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 適当な閾値である.

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1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 zi とし た[18].すなわち,

 $z_i = Z_i \sin \theta \tag{3}$

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.また全ての誤差 E を以下の式で定義 する.

$$E(P) = \sum_{i} \rho(z_i) \tag{4}$$

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.

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \sum_{i} \frac{\partial \rho(z_i)}{\partial z_i} \frac{\partial z_i}{\partial P} = 0$$
(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.

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

これにより以下の重みつき最小二乗法を得る.

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \sum_{i} w(z_i) z_i \frac{\partial z_i}{\partial P} = 0 \tag{7}$$

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を共役勾配法を用いて漸近的に最小化する.

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



Fig. 2 2D distance and 3D distance

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 点の位置合わせ手法の有効性を 確認するために,直径 10mm,長さ 20mmの円柱が, カラーセンサとレンジセンサの 1m 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300dpi,焦

4



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

点距離は 70mm とした.図3 にシミュレーションに 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,およ 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1に示す代表的な6種類 の推定関数を設定してそれぞれ100回シミュレーショ ンを繰り返し,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 L² は通常の最小二乗法である. 結果を Table 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.

表 1 推定力関数と収束性能 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		

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 Table 2 に示す. Table 2 で,特に奥行き z 方向の位置

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

	х	У	Z	$\theta[\text{deg.}]$
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

が実際の位置から 32mm 程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. 従ってこれは三角パッチが十分密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 の位置合わせ手法により,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わ 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,提案した位置合わせ法は,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,それを手がかりにして図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 ができている.

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 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

電子情報通信学会論文誌 'xx/xx Vol. Jxx-X No. xx



(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

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わせ 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.さらに図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.





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ス画像 Fig. 10 Reflectance image of the Kamakura Great Buddha

5. 終わりに

本論文では,実物体の光学モデルを作成する手法の

6



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 $$\rm edges$$

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



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

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共に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,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,佐藤,西野,佐藤,複合現実感における光学的整 合性の実現,日本パ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, December 1999.
- [3] Y. Sato, M. D. Wheeler, and K. Ikeuchi, "Object shape and reflectance modeling from observation", Proceedings of ACM SIGGRAPH 97, In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series 1997, ACM SIGGRAPH, pp.379-387, August 1997.
- [4] K.Nishino, Y.Sato and K.Ikeuchi, "Eigen-Texture Method: Appearance Compression based on 3D Model", in Proc. of Computer Vision and Pattern

電子情報通信学会論文誌 'xx/xx Vol. Jxx-X No. xx

Recognition ~99,~vol.1,~pp.618-624,~Jun.,~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, January 1999.
- [6] Mark D. Elstrom and Philip W. Smith, Stereo-Based Registration of Multi-Sensor Imagery for Enhanced Visualization of Remote Environments, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.1948-1953, 1999.
- [7] Ioannis Stamos and Peter K. Allen, Integration of Range and Image Sensing for Photorealistic 3D Modeling, Proceedings of the 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 Journal of 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. In Pacific Graphics '00, pages 317-326, October 2000
- [10] Hendrik Lensch, Wolfgang Heidrich, and Hans- Peter Seidel. Hardware-accelerated silhouette matching. In 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, October, 1996.
- [12] M. D. Wheeler and Katsushi Ikeuchi, "Sensor Modeling, Probabilistic Hypothesis Generation, and Robust Localization for Object Recognition", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (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,電子情報通信学会論文誌,D-II, Vol,J83-D-II, No.2, pp.525-534,2000.
- [14] P. Debevec, D.J. Taylor, and J. Malik, Modeling and rendering architecture from photographs; A hybrid geometry and image-base approach, Proc. of SIG-GRAPH'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] Daisuke Miyazaki, Takeshi Ooishi, Taku Nishikawa, Ryusuke Sagawa, Ko Nishino, Takashi Tomomatsu, Yutaka Takase, Katsushi 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 Analysis and Machine Intelligence, Vol.8, No.6, 1986.

- [18] P. J. Besl and N. D. McKay, A method for registration of 3-D shapes, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 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.



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

付 録

M 推定法の推定関数

第4章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,実験では全ての推定関 数で $\sigma = 10[mm]$ とした.

L2 $\rho(z) = \frac{z^2}{2} \tag{A.1}$

Tukey

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

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

$$\rho(z) = \frac{z^2/2}{1+z^2}$$
(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 x 年 xx 月 xx 日受付)

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,日本機械学会会員.博士 (工学)



1973 年 6 月 10 日生 . 1999 年東京大 学大学院工学系研究科電子情報工学専攻 修士課程修了. 同年東京大学大学院理学 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,平成 11 年度日本パーチャルリアリ 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.



池内克史 (正員)

1949年5月29日生.1973年京都大学 機械工学科卒業,1978年東京大学大学院 情報工学博士課程修了.工学博士.MIT人 工知能研究所,電総研,CMU計算機科学 部を経て,1996年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.



倉爪 亮

1967年2月4日生.1991年東京工業 大学機械物理工学専攻修士課程修了.同年 (株)富士通研究所入社,1995年同学機械 宇宙学科助手,2000年スタンフォード大