

幾何学的整合性を用いたテクスチャのアライメント

梶島 佑樹[†] 原 健二^{††} 倉爪 亮[†] 岩下 友美[†] 長谷川 勉[†]

[†]九州大学大学院システム情報科学府 〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1

^{††}九州大学大学院芸術工学研究院 〒815-8540 福岡県福岡市南区塩原 4-9-1

E-mail: †{kabashima,kurazume,yumi,hasegawa}@irvs.is.kyushu-u.ac.jp, ††hara@design.kyushu-u.ac.jp

あらまし レンジセンサ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、レンジ、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。これに対し、屋内環境やビルなど多数の平面から構築される環境においては、複数の平面が交差してできる直線的な幾何エッジを利用し、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、レンジデータとカラー画像から両センサの相対位置を推定する方法が考えられる。しかし、ノイズを多く含む実際のレンジデータから幾何エッジ、特に微分特徴量であるルーフエッジを安定に検出することは難しく厄介である。そこで本論文では、レンジデータから幾何エッジを直接的に抽出し利用するのではなく、カラー画像から抽出された直線エッジ群を3次元幾何モデルに投影し、その投影パッチ群に対して直線性、平行性、直交性などの幾何学的整合性を数値化し、それを最大化することで大まかな位置合わせを行う手法を提案する。また、屋内環境を模擬した計算機実験により、提案手法の有効性を確認すると同時に、提案手法により得られたセンサ間の相対位置関係を初期位置として幾何エッジを利用した位置合わせを行うことで、初期位置にロバーストで正確なテクスチャマッピングが可能であることを示す。

キーワード テクスチャマッピング, レンジデータ, カラー画像, 幾何学的整合性, 位置合わせ

Mapping textures on 3D geometric model using geometrical constraints

Yuuki KABASHIMA[†], Kenji HARA^{††}, Ryo KURADUME[†], Yumi IWASHITA[†], and
Tutomu HASEGAWA[†]

[†] Faculty of Engineering, Kyushu University Hakozaiki 6-10-1, Higashi-ku, Fukuoka-shi, 812-8581 Japan

^{††} Faculty of Design, Kyushu University Shiobaru 4-9-1, Minami-ku, Fukuoka-shi, 815-8540 Japan

E-mail: †{kabashima,kurazume,yumi,hasegawa}@irvs.is.kyushu-u.ac.jp, ††hara@design.kyushu-u.ac.jp

Abstract Mapping a real image on a 3D geometric model is a popular technique for photometric modeling in Virtual Reality. Generally, a texture image is taken by a color sensor and a range image is measured by a range sensor, and these two images are not aligned in a same coordinate system. Thus, in order to map a color image on a geometric model, it is indispensable to determine relative relations between these two viewpoints. In this paper, we propose a new registration algorithm for an accurate texture mapping utilizing geometrical constraints, that is, linearity, parallelism, and perpendicularity.

Key words Texture mapping, Range data, Color image, Geometrical features, Alignment

1. はじめに

バーチャルリアリティ、シネマトグラフィーや都市計画のような現実感高いモデルを必要とするアプリケーションを効率よく作成するために、種々のセンサを用いて実物体の幾何、光学特性を正確に測定、モデル化し、コンピュータ内で統合、再現する方法がある。この効率的作成法のひとつとして、レンジセ

ンサ等により測定された実物体の3次元幾何モデル上に、カラーセンサにより撮影された実物体表面のテクスチャ画像を貼り付けて表示するテクスチャマッピングの手法があげられる。

通常、正確なテクスチャマッピングを行うには、レンジセンサとカラーセンサの各視点間の相対的な位置関係を正確に求める必要がある。これには、例えばキャリブレーションボード等を用いて両者の相対位置関係を精密にキャリブレーションする

手法が考えられる。しかし、この方法は位置関係が求まった後、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。

これに対し、テクスチャマッピングの対象となるレンジデータとカラー画像を用いてセンサ間の位置関係を推定する手法が提案されてきている [12], [17], [18]。一般に、このように異なる視点で取得されたデータ間の位置合わせは、大まかに位置合わせを行った後、そこで得られた推定値を初期値として精密に位置合わせするという二段階に分けられる。

ビルや屋内環境など多数の平面から構築される 3 次元物体や環境においては、複数の平面が交差してできる直線的な幾何エッジを利用し、こ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、センサ間の位置関係を推定する方法が考えられる [12]。このレンジデータからの幾何エッジ検出に関しては、法線方向の不連続を検出したり各点の近傍で局所的に多項式を当てはめたりする手法が知られている [15], [20]。しかしながら、ノイズを多く含む実際のレンジデータから幾何エッジ、特に微分特徴量であるルーフエッジを安定に検出することは難しく厄介である。

本報告では、3 次元物体や環境における幾何学的整合性を利用することによりレンジデータとカラー画像を大まかに位置合わせする手法を提案する。一般に、ビルや屋内環境などには、平面や稜線に関する幾何学的な特性がいくつか存在する。本研究では、レンジデータとカラー画像を粗く位置合わせする問題を幾何学的整合性 [3], [11] のみに基づく最適化問題として定式化し、これを解くことにより、レンジデータから幾何エッジを陽に抽出することなく、センサ間の位置関係を推定する手法を提案する。

従来の手法では、主に計算量の観点から、3 次元モデルの幾何エッジをカラー画像の撮像面に投影し、カラー画像の濃淡エッジとの間で計算を行うことが多かった。しかし、この場合、次元が縮退しているため、直線間の平行性や直交性といった 3 次元シーンの幾何学的特性が失われる。そこで、本報告において提案する手法では、通常とは逆に、2 次元画像の濃淡エッジを 3 次元幾何モデル上に投影するというアプローチをとる。本手法は、カラー画像から抽出された直線エッジ群を 3 次元幾何モデルに投影し、その投影パッチ群に対して直線性、平行性および直交性などの幾何学的整合性を数値化し、それを最適化することでセンサ間の大まかな位置関係を求める。

また、本報告では、提案手法により得られるセンサ間の相対位置関係を初期値として精密位置合わせを行うことにより、センサの初期位置の誤差にロバストで正確なテクスチャマッピングが可能となることを示す。

本報告の構成は以下のとおりである。まず、2 章では関連手法を述べる。次に、3 章で提案手法について説明し、4 章において実験結果を報告する。そして、最後に結論を述べる。

2. 関連手法

距離画像とカラー画像の位置合わせ法として、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（反射強度画像）を用いる手法が提案されている。Kurazume ら [6] は、リフレクタンス画像中のエッジ点とカラー画像中のエッジ点間の誤差を、ロバスト M 推定法を用いて最小化することにより位置合わせする手法を提案している。Elstrom ら [4] 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。この手法では、まずリフレクタンス画像とカラー画像からそれぞれ特徴点を抽出し、類似度計算によりそれらの対応関係を決定する。次にステレオ視の原理によりそれら対応点の奥行きを求め、それと距離画像から得られる奥行きが一致するように両センサの相対位置姿勢を推定する。さらに梅田ら [19] は、リフレクタンス画像と 2 次元画像の勾配拘束を利用した、レンジセンサと画像センサの相対位置の推定法を提案している。

一方、シルエット画像や輪郭線を用いた位置合わせ手法も提案されている。Lensch ら [8], [9], [10] が提案したシルエット画像を用いた位置合わせ手法では、まず 2 次元画像と 3 次元幾何モデルのそれぞれのシルエット画像の排他的論理和をとることで類似度を評価する。次に Downhill Simplex 法を利用し、2 次元画像と 3 次元幾何モデルの位置合わせ誤差を収束させている。また、3 次元幾何モデルの 3 次元距離場を予め octree 形式で構築し、2 次元画像のシルエット輪郭線の視線方向への延長線と 3 次元幾何モデル間の 3 次元距離を最小化する手法が提案されている [1], [7]。Zuffi ら [21] は、人工関節の位置姿勢を 1 枚の X 線画像から推定する問題に適用し、3 次元距離誤差を Levenberg-Marquardt 法により最小化する手法を提案した。医療用画像における種々の位置合わせ手法については [13] に詳しい。

一方、2 次元輪郭線を用いた位置合わせ手法では、2 次元画像内の輪郭線上の点と投影された 3 次元幾何モデルのシルエット画像輪郭線の点との距離の和として位置合わせ誤差を求め、繰り返し計算により誤差を最小化する手法が一般に用いられる [2], [14], [16]。岩下らは、Level Set Method を利用して高速に求められる 2 次元輪郭線の等距離場を利用し、位置合わせ誤差を高速に計算する手法を提案している [5]。

また、建物などの人工構造物に対しては、レンジデータに平面をあてはめ、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によって位置合わせする手法が多く提案されている [17], [18], [12], [18] では、まずカラー画像上の消失点と焦点を結んだ線とそれに対応する 3 次元エッジが平行になるように姿勢を回転させ、おおまかな位置合わせを行う。次に、3 次元エッジをカラー画像上に投影し、2 次元エッジと比較し位置を決定している。

3. 提案手法

屋内環境や人工構造物は複数の平面で構成されていることが多く、その稜線の多くは平行関係または直交関係にある。そこで本章では、複数の稜線の平行性や稜線の直線性などの幾何学的整合性を利用して、3 次元幾何モデルと 2 次元カラー画像の位置合わせを行う手法を提案する。

3.1 手法の概略

提案する手法の概略を以下に示す。ただし、3次元幾何モデルと2次元カラー画像はそれぞれレーザスキャナとカラーセンサによって別々の視点から得られているとし、また、3次元幾何モデルは多数の微小な3角パッチで記述されているとする。

(1) 2次元カラー画像からCannyオペレータ等によりエッジを抽出する。

(2) 1組あるいは2組のエッジ群を取り出し、オペレータがそれらに対して後述する幾何学的条件を定義する。

(3) 2を十分多数のエッジ群に対して行う。

(4) レーザスキャナとカラーセンサ間の相対位置姿勢に適切な初期位置を与え、2,3で抽出された2次元画像のエッジ群を3次元幾何モデルに投影する。

(5) 投影された3次元幾何モデルの三角パッチを抽出し、投影点の3次元座標を求める。

(6) 投影点の3次元座標に対して、2,3で定義した幾何学的条件の満足度(幾何学的整合度)を計算する。

(7) 4~6を繰り返し、幾何学的整合度を最大化する相対位置姿勢を共役勾配法または最急降下法により推定する。

以下それぞれの手順について詳細に示す。

3.2 幾何学的整合度

まずエッジに付与される幾何学的整合度について説明する。提案手法では、以下の3つの幾何学的条件を用い、レンジセンサとカラーセンサの相対位置関係を推定する。

- 直線度(図1)
- 平行度(図2)
- 直交度(図3)

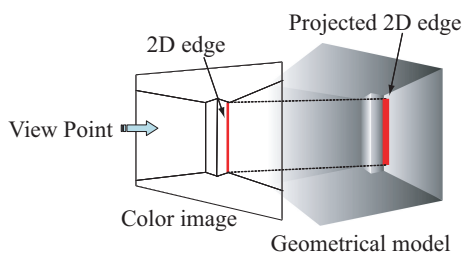


図1 幾何学的整合度(直線度)

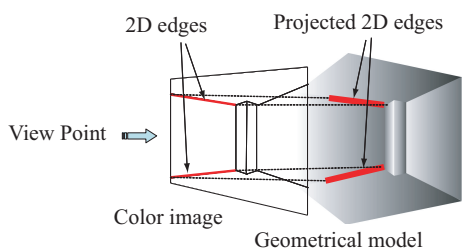


図2 幾何学的整合度(平行度)

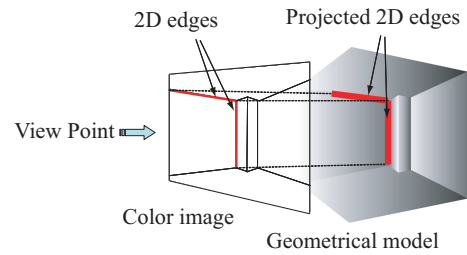


図3 幾何学的整合度(直交度)

3.2.1 直線度

2次元画像上からエッジを抽出し、そのなかで実世界において1つの直線と思われるエッジ群をHough変換あるいはオペレータからの指示により定義し、それを幾何モデルに投影することを考える。このとき、直線エッジの投影点が3次元幾何モデルの平面上、あるいは3次元的なエッジ上にある場合、その投影点も直線状になる。しかし、平面と平面にまたがって投影された場合、投影した2Dエッジは折れ曲がった線分となり、これは実世界では直線であることと矛盾する。従って直線エッジの投影点がどれくらい直線状に分布しているかを数値化することによって、レンジセンサとカラーセンサの相対位置を推定する際の1つの基準となる。これを本論文では直線度と定義する。

3.2.2 平行度と直交度

屋内環境では、平面同士は平行または直交関係にあることが多く、2次元画像から抽出した直線エッジ同士も平行または直交関係になっていることが多い。そこで2次元画像上で平行または直交関係と思われる2本の2次元直線エッジを幾何モデルに投影することを考える。

レンジセンサとカラーセンサの相対位置関係が正しく推定されている場合、2本の2次元直線エッジの投影点は平行または直交関係にある。一方、レンジセンサとカラーセンサの相対位置関係が正しい位置から離れている場合、投影点の平行性、直交性は満たされなくなる。したがって、直線度と同様に、どれくらい平行または直交関係であるかを数値化し、レンジセンサとカラーセンサの相対位置を推定する際の基準とする。本論文ではこれらを平行度、直交度と定義する。

3.3 OpenGLを用いた3次元投影点の計算

上述した直線度、平行度、直交度を数値化するには、幾何モデルに投影した2次元エッジの3次元座標が必要となる。本手法ではOpenGLの機能を用い、幾何モデルを構成する三角パッチの座標から投影点の3次元座標を決定する。

まず三角パッチそれぞれにあらかじめ番号付けを行う。この番号はある番号が呼ばれたときに、それに対応する三角形パッチが唯一決定されるように番号付けされていなければならない。これにより、2Dエッジ投影点を含む三角形パッチを決定できれば、そのパッチの3点の座標から2Dエッジ投影点の座標を求めることができる。

実際の番号付けではまず、RGBの初期値をすべて0にしておく。ここでRGBの値をそれぞれ8bitsの(R,G,B)であらわすことにする。OpenGLでは三角形パッチを表示する際、個別

に色を指定できるので、まず (0,0,0) として 1 番目のパッチを描画する。次に、R の値を 1 増やし (1,0,0) として 2 番目のパッチを表示する。R の値が 255 に達したら、R の値をいったん 0 にリセットし、G の値を 1 増やす。つまり (0,1,0) で 256 番目のパッチを描画する。このようにして幾何モデルを構成するすべての三角形パッチに番号付けを行い、幾何モデルを描画する。

次に 2 次元画像から抽出されたエッジを、描画された幾何モデルに投影して表示し、OpenGL の機能を用いて重なった三角パッチの色を調べる。これにより対応する三角パッチが簡単に探索でき、その 3 次元位置から 2 次元エッジ投影点の 3 次元座標を求めることができる。

3.4 幾何学的整合度の計算手法

上述した手法で求められた 2 次元エッジ投影点の 3 次元座標から、以下のようにして幾何学的整合性の計算を行う。

3.4.1 直線度

直線度の計算は以下のようにして行う。まず 2 次元画像から抽出された直線エッジ i を幾何モデルに投影した 3 次元点の共分散行列を求め、その共分散行列の固有値を求める。この固有値を $(0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3)$ とおき、それぞれの固有ベクトルを $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3$ とおく。 \mathbf{X}_1 は分散が最大となる方向、 \mathbf{X}_2 は分散が 2 番目に大きい方向、 \mathbf{X}_3 は分散が最小となる方向を表す。よって λ_1 と λ_2 が小さいほど、幾何モデルに投影した点群は直線に近づく。そこで、直線度を

$$E_{i, \text{straight}} = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (1)$$

によって評価する。このとき、その点群の方向は \mathbf{X}_3 となる。

3.4.2 平行度と直交度

まず平行または直交関係にある 2 本の 2 次元エッジの組 i を幾何モデルに投影した点群から、2 本の近似直線を求める。この近似直線の方向は直線度を評価する際に求めた \mathbf{X}_3 とする。この 2 本の近似直線の方向ベクトルを \mathbf{X}, \mathbf{X}' とおくと、平行度、直交度をそれぞれ

$$E_{i, \text{parallel}} = |\mathbf{X} \times \mathbf{X}'| \quad (2)$$

$$E_{i, \text{orthogonal}} = (\mathbf{X} \cdot \mathbf{X}') \quad (3)$$

によって評価する。

3.5 相対位置姿勢の推定

相対位置姿勢の推定は、上で求めた直線度、平行度、直交度の線形和を最小化することによって行う。位置合わせの評価値 E は以下の式で表される。

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \alpha \sum_i E_{i, \text{straight}} + \beta \sum_j E_{j, \text{parallel}} + \gamma \sum_k E_{k, \text{orthogonal}} \quad (4)$$

ここで \mathbf{R} は回転行列、 \mathbf{T} は平行移動行列、 α, β, γ は適当な重み係数を表す。本論文では最急降下法、あるいは共役勾配法を利用し、評価値 E を最小にする相対位置姿勢を推定する。

4. シミュレーション実験

提案した手法を用いて、計算機シミュレーションを行った。幾何モデルは図 4 に示す仮想的に作成した高さ 5m、幅 10m の部屋の内部とし、2 次元テクスチャ画像は、図 5 のように幾何モデルに色をつけ照光処理を施したものをキャプチャして作成した。

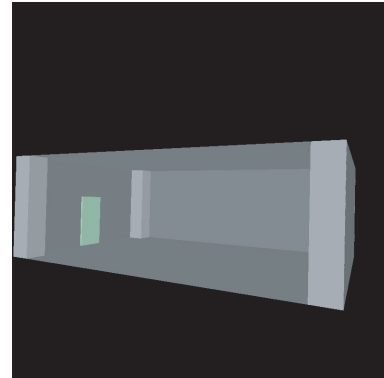


図 4 室内環境を模した幾何モデル

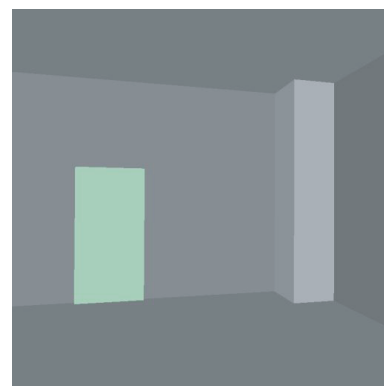


図 5 作成した 2 次元テクスチャ画像の例

4.1 評価値の変化

まず初期位置を真値とし、図 4 に示す幾何モデル上のドア (左側) に垂直な軸周りに回転させたときの、直線度、平行度、直交度の評価値の変化を調べた。結果を図 6 に示す。ただし、横軸は真値からのずれ角度 (rad)、縦軸は評価値である。これより、それぞれの指標で局所解は存在するものの、真値の場合のみ直線度、平行度、直交度のすべての評価値はほぼ 0 となることがわかった。

4.2 位置合わせ実験

初期位置を真値から適当な位置、姿勢だけ離して位置合わせ実験を行った。図 7 に実験結果の一例を示す。ただしこの例では、幾何モデルとテクスチャ画像の初期相対位置は、真値から x 軸周りに 9.0 度、 y 軸周りに 10.0 度、 z 軸周りに -1.5 度、 x 軸方向に -0.8 m、 y 軸方向に -0.26 m、 z 軸方向に 0.11 m ずらしたものとし、また、評価値の重み係数は $\alpha = 20.0$ 、 $\beta = 1.0$ 、 $\gamma = 1.0$ とした。また、図 8 に式 (4) で定義された評価値の変化を示す。ただし、横軸は繰り返し計算回数、縦軸は評価値 E で

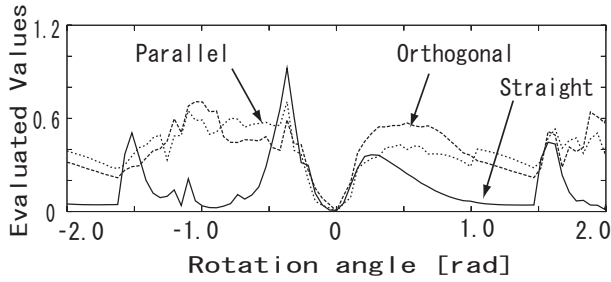


図 6 画面に平行な軸周りに回転させたときの直線度，平行度，直交度の変化

ある．このように，評価値 E は繰り返し計算回数に対して単調に減少している．また同様に直線度，平行度，直交度の変化の様子を図 9 に示す．これより，直線度は収束初期の段階で，また平行度，直交度はある程度真値に近くなってから大きく減少することがわかる．

4.3 位置合わせ性能の比較実験

提案手法（手法 1）と幾何エッジを抽出して濃淡エッジと一致させる手法（手法 2）との比較実験を行った．実験はそれぞれの手法に関して，初期位置を真値から最大各軸周りに最大 5 度，各軸方向に最大 1m，ランダムに 100 回変更して位置合わせを行った．収束後の位置，姿勢残差に対する収束率の比較を表 1 に示す．ただしここでの収束率とは，試行 100 回中でそれぞれの範囲に残差が収まった回数の比率を表し，例えば表 1 の第 2 行は，収束後の姿勢の残差が ± 2 度以内，位置の残差が ± 0.3 m 以内に収まった割合を示している．

真値からの残差 (ただし $i = x, y, z$)	手法 1 [%]	手法 2 [%]
$ \theta_i < 2.0$ 度, $ t_i < 0.3$ m	2	10
$ \theta_i < 4.0$ 度, $ t_i < 0.6$ m	20	10
$ \theta_i < 5.0$ 度, $ t_i < 1.0$ m	74	12

表 1 手法 1 と手法 2 の収束率の比較

この実験から，手法 1（提案手法）は手法 2 に比べて真値近傍への収束率は高いものの，収束時の残差が大きかった．これは手法 2 は真値近傍に収束した場合には収束精度は高いものの，初期位置が真値から離れている場合には局所解に陥る可能性が高く，逆に手法 1 は局所解に陥る可能性は低いものの，真値近傍での評価値の勾配が緩やかで，真値への収束精度が低いことを示していると考えられる．

4.4 実験 4

実験 3 より，それぞれの手法の特徴として，手法 1 は収束性能は初期位置にあまり依存しないが，最終的な収束精度が低く，逆に手法 2 は収束性能は初期位置に大きく依存するが，真値近傍での収束精度は高いことが明らかになった．そこで手法 1 と手法 2 を組み合わせた位置合わせ実験を行った．具体的には，まず手法 1 でおおまかな位置合わせを行った後，次に手法 2 で正確な位置合わせを行った．位置合わせの様子を図 10 に，結果を表 2 に示す．実験の結果，収束率，収束精度ともに，それぞれの手法を独立に用いる場合に比べて改善されることが確認された．

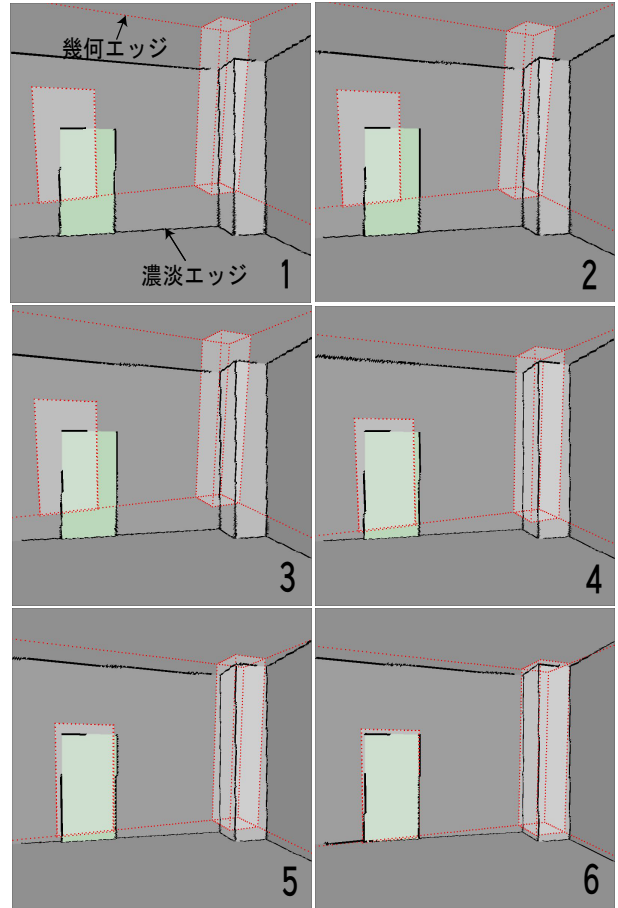


図 7 提案手法による位置合わせ結果

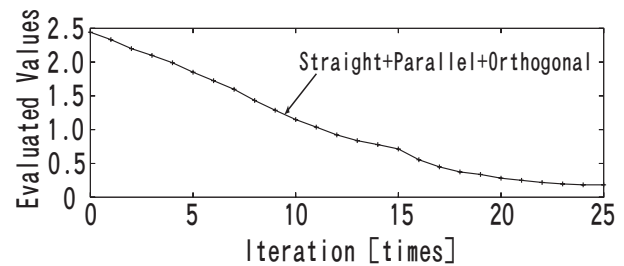


図 8 評価値の変化

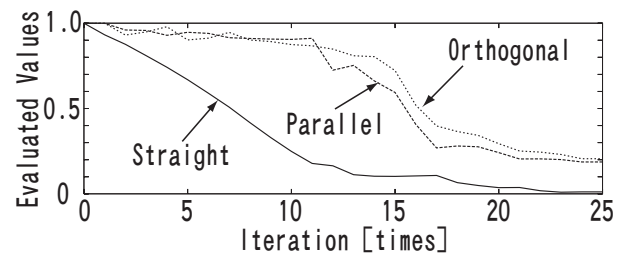


図 9 直線度，平行度，直交度の変化

5. 終わりに

本論文では，幾何学的整合性を用いたレンジセンサから得られた 3 次元幾何モデルとカラーセンサから得られた 2 次元カラー画像の位置合わせ手法を提案した．本手法は，まず，カラー画像から抽出された直線エッジ群を幾何モデルに投影し，

真値からの残差 (ただし $i = x, y, z$)	手法 1+手法 2 [%]
$ \theta_i < 2.0$ 度, $ t_i < 0.3m$	58
$ \theta_i < 4.0$ 度, $ t_i < 0.6m$	58
$ \theta_i < 5.0$ 度, $ t_i < 1.0m$	62

表 2 手法 1, 2 を組み合わせた場合の収束率

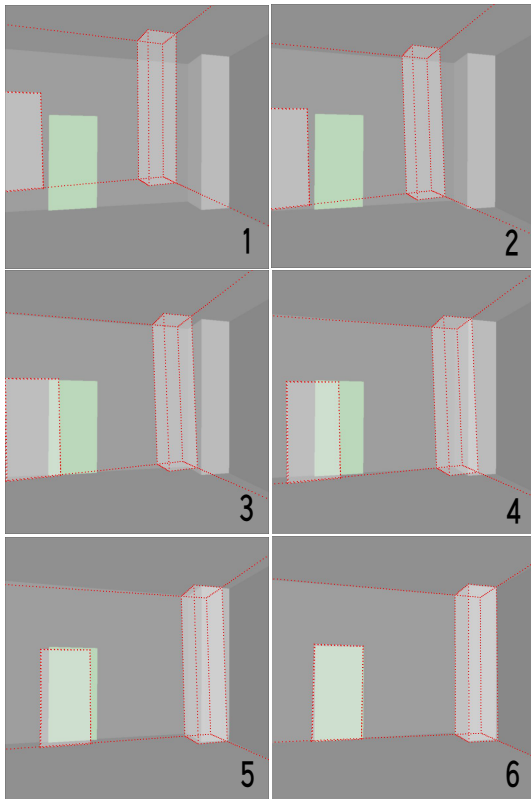


図 10 手法 1 (提案手法) + 手法 2 による位置合わせ結果

その投影パッチ群に対して直線性, 平行性, 直交性などの幾何学的整合性を数値化する. 次にそれを最大化するセンサ間の相対位置姿勢を探索, 推定することで, 大まかなテクスチャマッピングを行うものである. 本手法を用いて屋内環境を模擬した計算機実験を行い, 提案手法の有効性を確認した. また, 濃淡エッジと幾何エッジを一致させることで位置合わせを行う手法と比較実験を行い, 提案手法は収束時の誤差が大きいものの, 真値近傍への収束率は高いことがわかった. 更にこの 2 つの手法を組み合わせた場合の実験を行い, 収束率, 収束精度ともに向上することを確認した. 今後は屋内実画像を用いた位置合わせ実験を行う予定である.

文 献

- [1] L. Brunie, S. Lavalée, and R. Szeliski. Using force fields derived from 3d distance maps for inferring the attitude of a 3d rigid object. In *Proc. of the Second European Conference on Computer Vision*, pp. 670–675, 1992.
- [2] Q. Delamarre and O. Faugeras. 3d articulated models and multi-view tracking with silhouettes. In *Proc. of the International Conference on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 716–721, 1999.
- [3] P. E. Debevec, C. J. Taylor, and J. Malik. Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry- and image-based approach. In *Computer Graphics Proceedings, ACM SIGGRAPH'96*, pp. 11–20, 1996.
- [4] M. D. Elstrom and P. W. Smith. Stereo-based registration of multi-sensor imagery for enhanced visualization of remote environments. In *Proc. of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1948–1953, 1999.
- [5] Y. Iwashita, R. Kurazume, K. Hara, and T. Hasegawa. Fast alignment of 3d geometrical models and 2d color images using 2d distance maps. In *Proc. of The 5th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 164–171, 2005.
- [6] R. Kurazume, K. Noshino, Z. Zhang, and K. Ikeuchi. Simultaneous 2d images and 3d geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute. In *Proc. of Fifth Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*, pp. 99–106, 2002.
- [7] S. Lavalée and R. Szeliski. Recovering the position and orientation of free-form objects from image contours using 3d distance maps. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17, No. 4, pp. 378–390, 1995.
- [8] H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel. Automated texture registration and stitching for real world models. In *Pacific Graphics '00*, pp. 317–326, 2000.
- [9] H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel. Hardware-accelerated silhouette matching. In *SIGGRAPH Sketches*, 2000.
- [10] H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel. A silhouette-based algorithm for texture registration and stitching. *Graphical Models*, Vol. 63, pp. 245–262, 2001.
- [11] H. Lipson and M. Shpitalni. Optimization-based reconstruction of a 3d object from a single freehand line drawing. *Journal of Computer Aided Design*, Vol. 28, No. 8, pp. 651–663, 1996.
- [12] L. Liu and I. Stamos. Automatic 3d to 2d registration for the photorealistic rendering of urban scenes. In *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2005.
- [13] J. Maintz and M. Viergever. A survey of medical image registration. *Medical Image Analysis*, Vol. 2, No. 1, pp. 1–36, 1998.
- [14] K. Matsushita and T. Kaneko. Efficient and handy texture mapping on 3d surfaces. In *Comput. Graphics Forum 18*, pp. 349–358, 1999.
- [15] M. Morgenthaler and A. Rosenfeld. Multidimensional edge detection by hypersurface fitting. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 3, No. 4, pp. 482–486, 1981.
- [16] P. J. Neugebauer and K. Klein. Texturing 3d models of real world objects from multiple unregistered photographic views. In *Computer Graphics Forum 18*, pp. 245–256, 1999.
- [17] I. Stamos and P. K. Allen. Integration of range and image sensing for photorealistic 3d modeling. In *Proc. of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1435–1440, 2000.
- [18] I. Stamos and P. K. Allen. Automatic registration of 2-d with 3-d imagery in urban environments. In *Proc. of the International Conference on Computer Vision*, pp. 731–737, 2001.
- [19] K. Umeda, G. Godin, and M. Rioux. Registration of range and color images using gradient constraints and range intensity images. In *Proc. of 17th International Conference on Pattern Recognition*, pp. 12–15, 2004.
- [20] S. W. Zucker and R. A. Hummel. A three dimensional edge operator. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 3, No. 3, pp. 324–331, 1981.
- [21] S. Zuffi, A. Leardini, F. Catani, S. Fantozzi, and A. Cappello. A model-based method for the reconstruction of total knee replacement kinematics. *IEEE Trans. on Medical Imaging*, Vol. 18, No. 10, pp. 981–991, 1999.