

幾何学的整合性を用いた初期位置に頑強な 2D/3D 位置合わせ

九州大学 システム情報科学府 ○ 椛島 佑樹, 原 健二, 倉爪 亮, 岩下 友美, 長谷川 勉

Robust 2D/3D registration for initial positions using geometrical constraints

○ Yuuki KABASHIMA, Kenji HARA, Ryo KURAZUME, Yumi IWASHITA and Tsutomu HASEGAWA

Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

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.

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³⁾. 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, 半手動でだ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.

本報告では, 位置合わせ対象の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だ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だまかに位置合わせする問題を幾何学的整合性²⁾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, センサ間の位置関係を推定する手法を提案する.

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.

2 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.

2.1 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. エッジを線分ごとに分解し, 1 本あるいは 2 本のエッジ間で, 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.

2.2 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.

2.2.1 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, 複数の平面にまたがって投影された場合, 投影された 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 つの基準が得られる. これを本論文では直線度と定義する.

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 ($0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3$) を求める. この 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 $E_i^{straight} = \lambda_1 + \lambda_2$ によって評価し, このとき, その点群の方向ベクトルを X_i とする.

2.2.2 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あることが多い。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像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が成立しているかを数値化し、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。

平行度と直交度の計算は以下のようにして行う。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, j) 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。この近似直線方向ベクトルには直線度を評価する際に求めた \mathbf{X}_i を用いる。この2本の近似直線方向ベクトルを $\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j$ とおくと、平行度、直交度はそれぞれ外積と内積を用いて $E_{ij}^{parallel} = |\mathbf{X}_i \times \mathbf{X}_j|$ 、 $E_{ij}^{orthogonal} = |\mathbf{X}_i \cdot \mathbf{X}_j|$ によって評価される。

2.3 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。また、相対位置関係とエッジ同士の関係(平行または直交)を同時に推定できる。すなわち、エッジ i とエッジ j の関係が平行のとき、 $p_{ij} = 1$ 、非平行のとき、 $p_{ij} = 0$ とし、同様に、直交のとき、 $q_{ij} = 1$ 、非直交のとき、 $q_{ij} = 0$ とする。これにより、評価値 E を以下のように定義する。

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{T}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}) = \alpha \sum_i E_i^{straight} + \beta \sum_{i \neq j} p_{ij} E_{ij}^{parallel} + \gamma \sum_{i \neq j} q_{ij} E_{ij}^{orthogonal} + C_p \sum_{i \neq j} (1 - p_{ij}) + C_q \sum_{i \neq j} (1 - q_{ij}) + C_{pq} \sum_{i \neq j} p_{ij} q_{ij} \quad (1)$$

ここで \mathbf{R} は回転行列、 \mathbf{T} は平行移動行列、 $\mathbf{P} = \{p_{ij}\}$ 、 $\mathbf{Q} = \{q_{ij}\}$ であり、 $\alpha, \beta, \gamma, C_p, C_q, C_{pq}$ は適当な重み係数を表す。

実際の推定手順は、まず、 p_{ij}, q_{ij} を固定し、評価値 E を最急降下法あるいは共役勾配法を利用し、最小化する。次に、 \mathbf{R}, \mathbf{T} を固定し、 p_{ij}, q_{ij} を評価値 E が最小となるように更新する。このような計算を交互に繰り返すことで、エッジ同士の関係と相対位置関係を同時に推定する。

3 実験

3.1 合成画像

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、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。

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。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10.0度、 y 軸周りに10.0度、 z 軸周りに-3.0度、 x 軸方向に2.0m、 y 軸方向に0.5m、 z 軸方向に-2.0mずらしたものとした。実験では、まず、提案手法により大まかな位置合わせを行い、次にその相対位置関係を初期値として、精密な位置合わせを行った。ここで、精密な位置合わせとは、3Dエッジ点の画像投影点と2Dエッジ点間の距離を最小化することで位置合わせを行う手法である¹⁾。Fig.1に位置合わせの様子を示す。左図は位置合わせ前(初期

位置)、中央図は大まかな位置合わせを行った結果、右図は精密な位置合わせを行った結果である。

また、真値からの距離誤差の平均値は、位置合わせ前が33.4ピクセル、大まかな位置合わせ後が21.2ピクセル、精密な位置合わせ後が1.2ピクセルであった。ただし、距離誤差は、画面の上すべての3Dエッジ点を2次元テクスチャ画像上に投影し、それぞれの投影点から最も近い2Dエッジ点までの距離を平均して求めた。

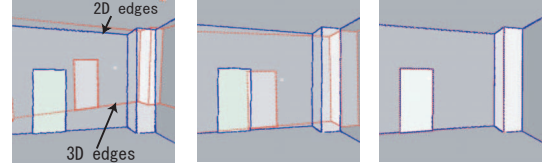


Fig.1: Simulation results.

3.2 実画像

次に、実環境での位置合わせ実験を行った。ただし、カメラの内部パラメータは既知であり、3Dエッジは、平面と平面の交線を求めることで抽出した。

レンジデータとテクスチャ画像を入力として、位置合わせ実験を行った。Fig.2に位置合わせ結果を示す。左上図は位置合わせ前、右上図は大まかな位置合わせを行った結果、左下図は精密な位置合わせを行った結果、右下図は位置合わせ後、テクスチャマッピングを行った結果である。

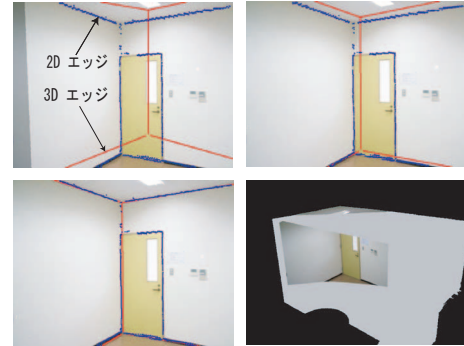


Fig.2: Mapping a real image on a 3D geometric model.

4 まとめ

本論文では、幾何学的整合性を用いたレンジセンサとカラーセンサの位置合わせ手法を提案した。本手法は、まず、直線性、平行性、直交性などの幾何学的整合性を用いて大まかな位置合わせを行った後、精密な位置合わせを行うものである。

また、本手法を用いて計算機実験と実環境での実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

5 参考文献

- 1) R. Kurazume, K. Nishino, 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.
- 2) 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.
- 3) 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.