

幾何学的整合性に基づくレンジデータとカラー画像の位置合わせ

椛島佑樹 原 健二 倉爪 亮 岩下友美 長谷川勉
九州大学

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、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、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、レーザスキャナから得られるレンジデータはノイズを多く含むため、3次元幾何モデルから正確な幾何エッジの抽出は困難である。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正確なテクスチャマッピングを行う方法を提案する。

Mapping textures on 3D geometric model using geometrical constraints

Yuuki Kabashima Kenji Hara Ryo Kurazume Yumi Iwashita Tsutomu Hasegawa
Kyushu University

Texture mapping, that is the method to map current color images on a 3D geometric model measured by a range sensor, is the key technique of the photometric modeling for the Virtual Reality. Usually range and color images are obtained from different viewing positions, through two independent range and color sensors. Thus, in order to map those color images, current textures, on the geometric model, it is necessary to determine relative relations between these two viewpoints. In this paper, we propose a new calibration method for the texture mapping using geometrical features such as 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、実物体の幾何、光学特性を正確にモデル化し、この二つを使ってコンピュータ内で再現する方法がある。そ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知られている。

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各視点間の相対位置関係を正確に求める必要があるが、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。

一方、屋内環境やビルなどの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、両センサの相対位置を推定する方法が考えられる [1]。しかし、レンジデータにおける幾何エッジの検出では、ノイズを多く含むレンジデータに対し、法線方向が不連続であるところを検出したり、各点の近傍で局所的に多項式を当てはめたりする必要があり、なかなか容易ではない [2, 3]。

本報告では、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エッジのみを間接的に利用することでテクスチャマッピングを正確に行う手法を提案する。一般に、カラー画像におけるエッジは濃度値の不連続点であり、レンジデータにおける幾何エッジの場合よりも、安定かつ正しくエッジ検出を行うことができる。他方、平面の集合で構成される物体シーンを対象とするビジョンの問題、特に形状復元の問題では、各々の平面や稜線に関する幾何学的条件を利用するアプローチがしばしばとられてきた [4, 5]。

以上の点に着目し、本研究では、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、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正確なテクスチャマッピングを行う方法を提案する。

従来の手法では、カラー画像とレンジデータの両方で、正確なエッジ検出が要求されるのに対し、提案手法ではレンジデータから幾何エッジを明示的に抽出することなく、テクスチャマッピングにおける位置合わせを行うことが可能である。

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。倉爪ら [6][7] 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 [8] 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 [9] 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 [10],[11],[12] 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 [13],[14] . Zuffi ら [15] 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 [16] 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 [17], [18], [19] . 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 [20] .

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 [21],[22],[1] . [22] 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 . 提案手法では図 1 , 図 2 , 図 3 に示す以下の 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
- 平行度
- 直交度

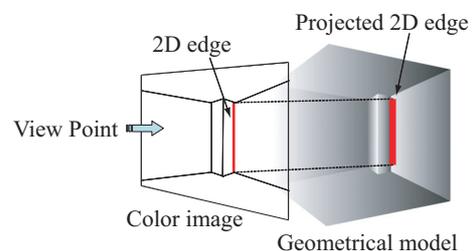


図 1: 幾何学的整合度 (直線度)

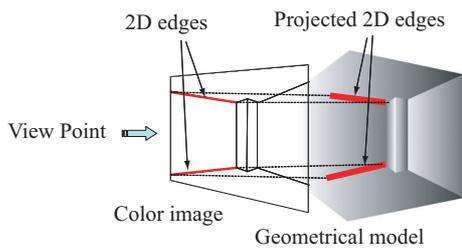


図 2: 幾何学的整合度 (平行度)

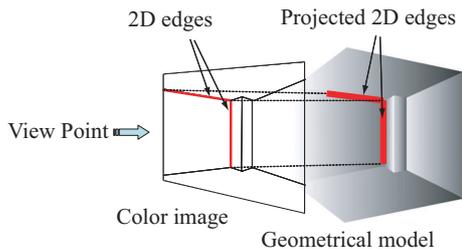


図 3: 幾何学的整合度 (直交度)

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けばよい。そうすると、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(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 X_1, X_2, X_3 とおく。 X_1 は分散が最大となる方向、 X_2 は分散が2番目に大きい方向、 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

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

によって評価する。このとき、その点群の方向は 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 X_3 とする。この2本の近似直線の方向ベクトルを X, X' とおくと、平行度、直交度をそれぞれ

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

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

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。

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

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 実験結果

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次元カラー画像は、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。

まず初期位置を真値とし、図5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。その結果を図4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、ローカルミニマムは存在するものの、真値の場合のみ直線性等すべての評価値はほぼ0となることがわかった。

次に、初期位置を真値から離して位置合わせ実験を行った。図5に実験結果を示す。ただし、幾何モデルとカラー画像の初期相対位置は、真値から x 軸周りに13.0度、 y 軸周りに-12.5度、 z 軸周りに-1.5度、 x 軸方向に-0.3m、 y 軸方向に1.0m、 z 軸方向に0.08mずらしたものとし、また、評価値の重み係数は $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 1.0$ 、 $\gamma = 1.5$ とした。また、図6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 である。このように、この場合は評価値 E は単調に減少し、6回目以降はほぼ0になっている。また、直線度、平行度、直交度の変化の様子を図7に示す。平行度、直交度は5回目にはほぼ0になっており、5回目以降の評価値は直線度が支配的であることがわかる。しかし一般的には直線度、平行度、直交度の収束性能への影響は、初期位置や選択した稜線の数、種類に大きく依存し、重み係数の適切な設計や制御が今後の検討課題である。

5 終わりに

本論文では、幾何学的整合性を用いたレーザスキャナから得られた3次元幾何モデルとカラーセンサから得

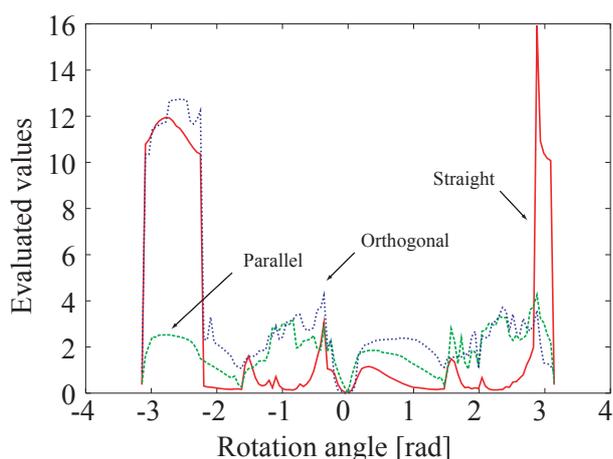


図 4: 画面に平行な軸周りに回転させたときの直線度, 平行度, 直交度の変化

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、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、正確なテクスチャマッピングを行うものである。また、計算機実験により提案手法の有効性を確認した。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。

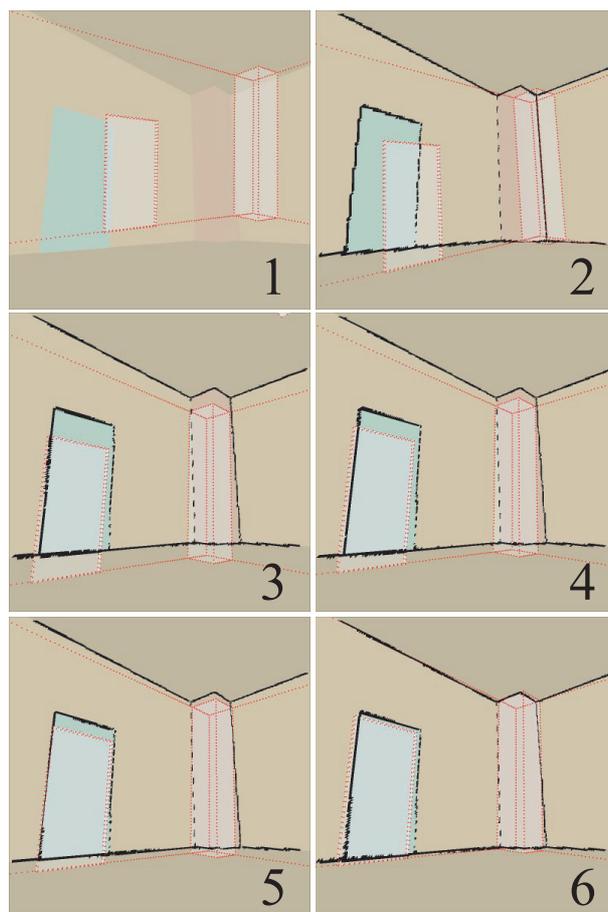


図 5: 位置合わせ結果

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] H. Lipson and M. Shpitalni. Optimization-based reconstruction of a 3d object from a single free-hand line drawing. *Journal of Computer Aided Design*, Vol. 28, No. 8, pp. 651–663, 1996.
- [5] 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.
- [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.

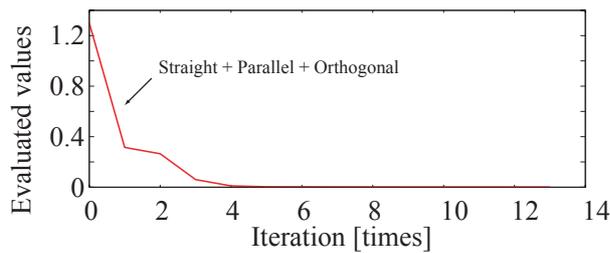


図 6: 評価値の変化

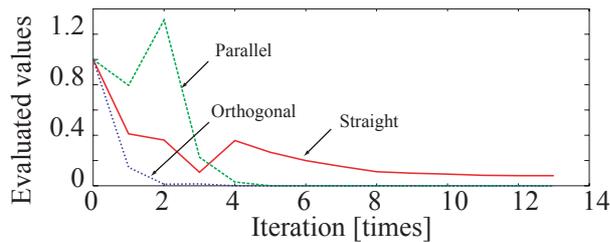


図 7: 直線度, 平行度, 直交度の比較

- [7] 倉爪, 西野, M. D. Wheeler, 池内. 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. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.
J85-D-II, No. 6, pp. 1038–1046, 2002.
- [8] 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.
- [9] K. Umeda, G. Godin, and M. Rioux. Registra-
tion of range and color images using gradient con-
straints and range intensity images. In *Proc. of
17th International Conference on Pattern Recog-
nition*, pp. 12–15, 2004.
- [10] H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel. Auto-
mated texture registration and stitching for real
world models. In *Pacific Graphics '00*, pp. 317–
326, 2000.
- [11] H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel.
Hardware-accelerated silhouette matching. In
SIGGRAPH Sketches, 2000.
- [12] H. Lensch, W. Heidrich, and H.-P. Seidel. A
silhouette-based algorithm for texture registra-
tion and stitching. *Graphical Models*, Vol. 63, pp.
245–262, 2001.
- [13] L. Brunie, S. Lavalée, and R. Szeliski. Using
force fields derived from 3d distance maps for in-
ferring the attitude of a 3d rigid object. In *Proc.
of the Second European Conference on Computer
Vision*, pp. 670–675, 1992.
- [14] S. Lavalée and R. Szeliski. Recovering the po-
sition and orientation of free-form objects from
image contours using 3d distance maps. *IEEE
Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelli-
gence*, Vol. 17, No. 4, pp. 378–390, 1995.
- [15] S. Zuffi, A. Leardini, F. Catani, S. Fantozzi, and
A. Cappello. A model-based method for the re-
construction of total knee replacement kinemat-
ics. *IEEE Trans. on Medical Imaging*, Vol. 18,
No. 10, pp. 981–991, 1999.
- [16] J. Maintz and M. Viergever. A survey of medi-
cal image registration. *Medical Image Analysis*,
Vol. 2, No. 1, pp. 1–36, 1998.
- [17] Q. Delamarre and O. Faugeras. 3d articulated
models and multi-view tracking with silhouettes.
In *Proc. of the International Conference on Com-
puter Vision*, Vol. 2, pp. 716–721, 1999.
- [18] K. Matsushita and T. Kaneko. Efficient and
handy texture mapping on 3d surfaces. In *Com-
put. Graphics Forum 18*, pp. 349–358, 1999.
- [19] P. J. Neugebauer and K. Klein. Texturing 3d
models of real world objects from multiple unreg-
istered photographic views. In *Computer Graph-
ics Forum 18*, pp. 245–256, 1999.
- [20] Y. Iwashita, R. Kurazume, K. Hara, and
T. Hasegawa. Fast alignment of 3d geometri-
cal models and 2d color images using 2d distance
maps. In *Proc. of The 5th International Confer-
ence on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp.
164–171, 2005.

- [21] 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.
- [22] 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.