

3次元パラメトリックモデルと複数X線投影像を用いた股関節の形状復元

3D reconstruction of a femoral shape using a parametric model and two 2D radiographs

○ 中村 かほり(九州大) 倉爪 亮(九州大) 岡田 俊之(大阪大)

佐藤 嘉伸(大阪大) 菅野 伸彦(大阪大) 長谷川 勉(九州大)

Kahori NAKAMURA[†] Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, Japan

Ryo KURAZUME[†] Toshiyuki OKADA Yoshinobu SATO Nobuhiko KANNO and Tsutomu HASEGAWA[†]

One of radical cures of hip joint diseases is a replacement operation to an artificial hip joint. In general, the preoperative examination is indispensable for this operation in order to determine an adequate shape of an artificial hip joint. A patient usually receives Computed Tomography(CT) examination to obtain a preoperative 3D shape of a patient's joint. However, radiation exposure by CT scan is much higher than the one by radioscopy, which is typically used for a diagnosis of osseous anomalies. This paper proposes a method to estimate a 3D shape of patient's femur from two radiographs and a parametric femoral model. Firstly, we develop the parametric femoral model utilizing statistical procedure of 3D femoral two 2D images using a distance map constructed by the Level Set Method. Experiments using synthesized images are carried out to verify the fundamental performance of the proposed technique.

Key Words: Registration, Radioscopy, Femur, Parametric model, Distance map

1 はじめに

X線CT(Computed Tomography)やMRI(Magnetic Resonance Imaging)は、生体の内部構造を短時間かつ非接触で取得できるため、現在多くの医療現場で用いられている。しかし高い精度が得られるX線CTは、一方で従来のX線レントゲン撮影と比較して被曝量が大きく、装置が大型かつ高価なため設置施設は大規模な医療機関に限られる、データ量が多く解析が難しい、事前に準備が必要で緊急性を要する骨折などでは利用しづらい、などの問題がある。そこで手間のかかるCT画像を撮影することなく、より手軽なX線撮影装置によって得られる複数のX線投影像を用いて、生体の内部構造、例えば骨格形状が3次元復元できれば、コスト、手間、X線被曝などの観点からメリットが大きい。特に大腿骨に関しては、人工関節手術(関節機能を代用する人工部品を設置する手術)や骨折治療において、CT画像なしでの3次元的な計算機誘導手術を行いたいという外科医からの強い要望があり、X線投影像からの3次元形状復元に対するニーズが大きい。

一方、2次元のX線投影像からの3次元形状の復元は基本的に ill-posed な問題であり、通常十分に多数枚の画像、あるいは形状に対する何らかの拘束が必要である。しかし人体の骨形状はある一定のパターンがあり、それがモデル化できれば、少数のX線投影像からの3次元復元が可能となる。さらに実際の問題として、形状復元のためにはX線投影像内で対象部位のみを抽出し、その位置姿勢を特定する必要がある。

そこで本論文では大腿骨の3次元復元問題に着目し、多くの骨形状データから作成した大腿骨パラメトリック形状モデルを用い、異なる2視点から撮影した2枚の大腿骨X線投影像から、大腿骨の位置、姿勢、3次元形状を推定する手法を提案する。本手法は、Level Set Methodの一手法であるFast Marching Methodを用いてX線投影像内の大腿骨輪郭線から2次元距離場を構築し、それを用いて3次元パラメトリック形状モデルと2次元大腿骨像の位置合わせ、パラメトリック形状モデルの形状パラメータ推定を行うものである。本論文では51例のデータから作成した大腿骨パラメトリック形状モデルを用い、CT画像から得られた10人の患者の大腿骨形状に対して、X線投影像を模した2次元画像を作成して位置姿勢および形

状パラメータの推定を行い、大腿骨の3次元形状を推定した結果を紹介する

2 3次元パラメトリック形状モデルの構築

2.1 大腿骨形状モデルの生成

本研究では岡田ら¹⁾によって提案されている統計的骨形状モデルを用いる。この手法は、多数の骨形状サンプルの3次元形状から、解剖学的特徴を考慮した統計的手法により、一般的な骨形状をある1つの平均形状と数個の形状パラメータからなる3次元パラメトリック形状モデル²⁾で記述するものである。本手法による大腿骨の3次元パラメトリック形状モデルの生成手順を以下に示す。詳細については¹⁾を参照されたい。

step1. 表1, 図1に示す大腿骨の解剖学的特徴を自動あるいは手動により取得する。

step2. 取得した特徴を基に大腿骨を4つの領域(骨頭部, 頸部, 大転子部, 骨幹部)に分割し、各領域に円筒または球面座標系を定義する。

step3. 各領域で設定された座標系において、均等に設定された直線と骨表面上の交点(表面形状データ点)を探索し、その3次元座標を取得する。

step4. 多くの骨形状に対してstep1~3を行い、主成分分析により平均形状と形状パラメータを得る。

2.2 3次元パラメトリック形状モデル

上記の手法により得られた51人の大腿骨形状モデルに対し、同一の番号がつけられた表面形状データ点の3次元座標を比較し、表面形状データ点の平均位置とそれぞれの変位量を求める。次に変位量を主成分分析し、上位50個の主成分と固有ベクトルを抽出する。これより、それぞれの大腿骨の3次元形状は、位置姿勢およびスケールを正規化した平均形状モデルと、主成分と固有ベクトルの積の線型和によって表現できる。具体的には、一般的な表面形状データ点 x' は、平均形状モデル上の点 x と、それぞれ

	特徴	部位
V_{Hc}	点	骨頭中心
A_P	直線	大腿骨の主軸
A_N	直線	頸部軸
P_{Nc}	面	頸部中心断面
V_{Gt}	点	大転子の頂点
V_{Lt}	点	小転子
V_{Lp}	点	腸骨大腿靭帯附着部
L_R	曲線	大転子の屋根線
L_V	曲線	大転子の谷線

Table 1: Femoral Anatomies

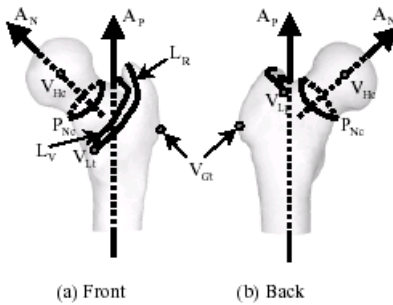


Fig.1: Coordinates for a femoral model

の主成分に対応する形状パラメータ ($para1, para2, \dots$) により、以下の式 (1) で表される。

$$x' = x + (para1 * \text{標準偏差 } 1 * \text{第 } 1 \text{ 主成分ベクトル}) + (para2 * \text{標準偏差 } 2 * \text{第 } 2 \text{ 主成分ベクトル}) + \dots \quad (1)$$

これより、一般的な大腿骨の 3 次元パラメトリック形状モデルは、

- 平均形状モデルと主成分、および主成分ベクトル
- 複数個 (最大 50 個) の形状パラメータ

の組み合わせで記述できる。

3 大腿骨 3 次元形状の復元方法

本章では、まず初めに任意の位置、方向から撮影された X 線投影像内の 2 次元大腿骨像と 3 次元パラメトリック形状モデルの位置合わせ手法について説明し、次に X 線投影像を用いた形状パラメータの推定手法について述べる。両手法とも、Level Set Method の一手法である Fast Marching Method により X 線投影像上に構築された 2 次元距離場を利用し、2 次元画像-3 次元モデルの位置合わせ、および形状パラメータ推定を行うものである。X 線投影像は静止画であることから、本手法では一度 2 次元距離場が構築されれば、以降の計算は最近傍点探索などを行うことなく高速に実行できる。

ここで、位置合わせと形状パラメータの推定を同時に行う場合、視点からの奥行きと 3 次元モデルのスケールは、原理的に分離不可能である。そこで提案手法では、異なる 2 視点から撮影した 2 枚の X 線投影像を用いる。また本論文では、大腿骨の 3 次元パラメトリック形状モデルは、

表面形状データ点を結んで作成される、均等で十分に多数の 3 角パッチにより記述されているとする。

3.1 2 次元大腿骨像と 3 次元パラメトリック形状モデルの位置合わせ

2 次元距離場を利用した X 線投影像内の 2 次元大腿骨像と 3 次元パラメトリック形状モデルの位置合わせ手順を以下に示す。

step 1. まず、動的輪郭モデル (Snakes や Level Set Method³⁾) を用い、X 線投影像から大腿骨輪郭線を抽出する。

step 2. Level Set Method の一手法である Fast Marching Method⁴⁾を用い、得られた X 線投影像の輪郭線からの 2 次元距離場を構築する。図 2 に大腿骨画像に対して求められた距離場の例を示す。

step 3. 大腿骨の 3 次元パラメトリック形状モデルを適当な初期位置に配置し、2 次元 X 線投影像上に投影する。

step 4. 2 次元 X 線投影像上に投影された 3 次元パラメトリック形状モデルに対し、そのシルエット画像の輪郭線を求め、輪郭線に対応する 3 角パッチを求める。

step 5(a). 得られた輪郭線上の 3 角パッチに対し、距離場に応じて計算される力を加える (図 3)。

step 6(a). ロバスト推定法の一手法である M 推定法を用いて、すべての輪郭線上の 3 角パッチに対して、加えられた力の和と 3 次元パラメトリック形状モデル重心回りのモーメントを求める (図 4)。

step 7(a). 異なる視点から得られた複数の画像に対して Step 3 から Step 6(a) を行い、力、モーメントの総和を求める。また得られた力、モーメントの総和に応じて、3 次元パラメトリック形状モデルの位置姿勢を更新する。

step 8(a). Step 3 から Step 7(a) を力、モーメントの総和が十分小さくなるまで繰り返す。

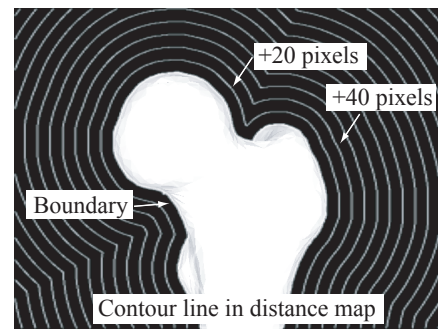


Fig.2: Distance map on a femoral image

3.2 形状パラメータの推定手法

次に 3 次元パラメトリック形状モデルに対する形状パラメータの推定法を示す。本手法においても、前項で構築した X 線投影像内の大腿骨像輪郭線の 2 次元距離場を用いる。

具体的には、前項の step 4 の後、以下の手順で最適な形状パラメータを推定する。

step 5(b). 得られた輪郭線上のすべての 3 角パッチに対し、その投影像における距離場の値の総和を誤差 E と定義する。

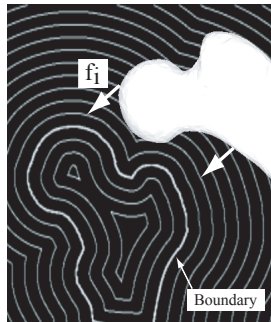


Fig.3: Applying force f_i to occluding patches

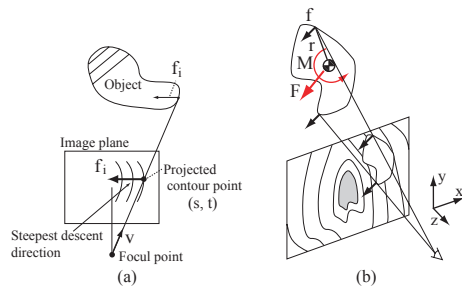


Fig.4: Force and moment around C.O.G

step 6(b). 誤差 E が最小となるように、共役勾配法を用いて形状パラメータ値を変更する。

step 7(b). 得られた形状パラメータ値に応じて、3次元パラメトリック形状モデルを更新する。

step 8(b). Step 3 から Step 7(b) を、異なる視点から得られた複数の画像に対して行い、誤差 E が十分小さくなるまで繰り返す。

なお、3次元モデルの位置、姿勢、および形状パラメータを共役勾配法などにより同時に推定することも可能であるが、予備実験の結果、位置、姿勢の推定と形状パラメータの推定を分離して交互に行ったほうが良い収束結果が得られたことから、本論文ではこれらを分離して行うこととする。

4 2枚の画像を用いた大腿骨形状の推定実験

提案手法による大腿骨形状の基本的な推定精度を評価するために、3次元パラメトリック形状モデルの構築に用いた大腿骨形状5例 (modeldata1 ~ 5) と、モデルの構築に用いなかった大腿骨形状5例 (testdata1 ~ 5) の計10例に対し、X線投影像を模した2次元画像を2枚作成して、提案手法により画像内での位置姿勢と形状パラメータを推定する実験を行った。ただし2次元画像は実際にX線撮影が可能な方向を考慮し、図5に示すように、視線が垂直に交わるように大腿骨の主軸 A_P まわりに90度回転した正面、真横位置からの2枚の画像を作成した。作成した画像の例を図6に示す。また、使用したすべての大腿骨の形状モデルはCT画像から予め正確に作成されており、3次元形状どうしの比較により、対応する表面形状データ点間の距離誤差を最小化する最適な形状パラメータ値は予

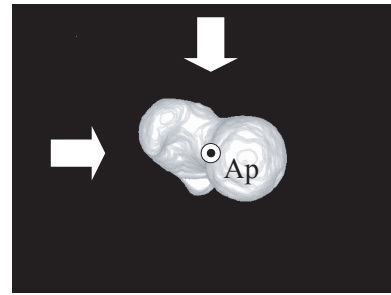


Fig.5: Camera direction

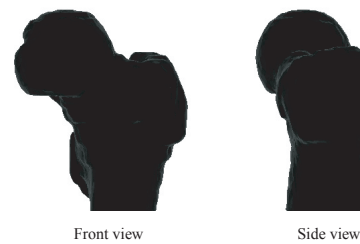


Fig.6: Synthesized images

め求められている。

まず、推定する形状パラメータ数を0から10まで変化させて提案手法により画像上での位置姿勢、および形状パラメータを推定した。ただし、2次元大腿骨像の位置合わせと形状パラメータの推定は交互にそれぞれ独立に行った。一例として、testdata4 に対し、平均形状と実対象形状、および推定された形状を図7に示す。さらに推定された形状と実際の形状の誤差を、推定形状の表面形状データ点と実対象形状の3角パッチ表面までの最短距離の平均値として求めた結果を図8に示す。ただし横軸 A は平均形状モデルと実対象形状の初期位置姿勢での誤差、0は位置姿勢のみ推定した場合の誤差である。これより推定する形状パラメータ数が増加するにつれて推定誤差は減少するが、推定パラメータ数が5程度で誤差が一定値に収束し、それ以上は誤差には大きな変化が見られないことがわかった。

また図9に、推定パラメータ数が5の場合に対して、以下のように誤差を定義し、それらを計算した結果を示す。平均誤差1 平均形状モデルと実対象形状の初期位置姿勢での平均誤差

平均誤差2 3次元形状どうしの比較から形状パラメータを推定した場合の平均誤差

平均誤差3 位置姿勢と形状パラメータの推定を交互に繰り返した場合の平均誤差 (提案手法)

これより、推定された形状の実対象形状との平均誤差は最大で1.1mm以下であり、提案手法により2枚の異なる方向から得られた大腿骨像を用いるだけで、3次元形状どうしの比較と同様の推定精度が得られることがわかった。また、統計モデルの構築に用いたデータと用いなかったデータ間で優位な差は見られないことも確認された。

5 まとめ

異なる2視点から撮影した2枚の大腿骨X線投影像から、3次元パラメトリック形状モデルを用いて、大腿骨の3次

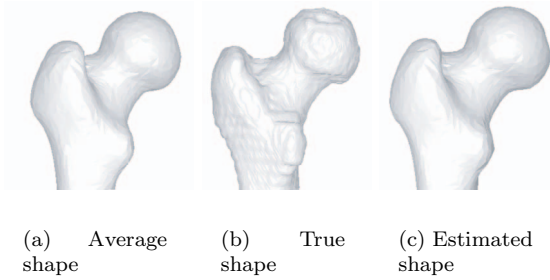


Fig.7: Results of the parameter estimation

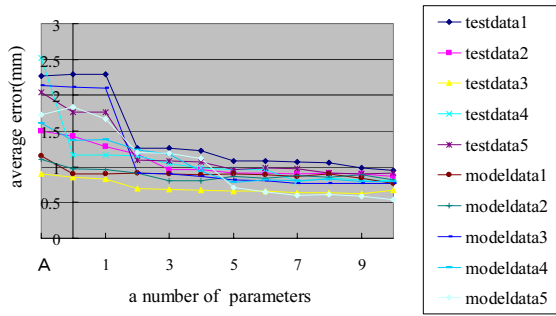


Fig.8: Average error for various numbers of shape parameters

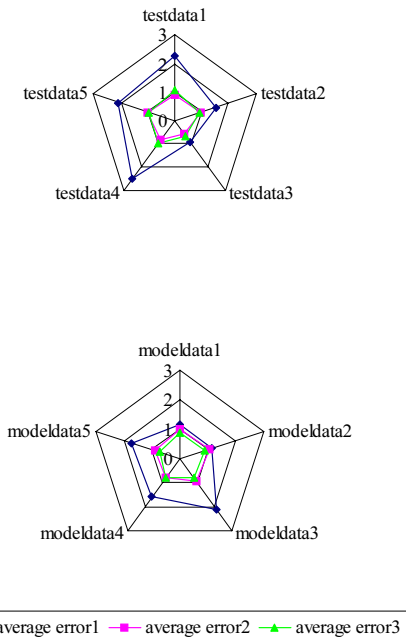


Fig.9: Average error in case that number of shape parameters is 5

	average	S.D	max	min
average error1	1.69	0.54	2.52	0.90
average error2	0.90	0.13	1.06	0.60
average error3 (testdata)	0.91	0.15	1.08	0.66
average error3 (modeldata)	0.81	0.07	0.90	0.71

Table 2: Average error(mm)

元形状を推定する手法を提案した．提案した手法は，Fast Marching Method を用いて画像内の大腿骨輪郭線から 2 次元距離場を構築し，それを用いて 3 次元パラメトリック形状モデルと 2 次元大腿骨像の位置合わせ，パラメトリック形状モデルの形状パラメータ推定を行うものである．本論文では 51 例のデータから作成した大腿骨パラメトリック形状モデルを用い，CT 画像から得られた 10 人の患者の大腿骨形状に対して，X 線投影像を模した 2 次元画像を作成して位置姿勢および形状パラメータの推定を行い，大腿骨の 3 次元形状を推定した．Image その結果，推定された形状の実対象形状との平均誤差は 1.1mm 以下であり，提案手法により 2 枚の異なる方向から得られた大腿骨像を用いるだけで，3 次元形状どうしの比較と同様の形状推定精度が得られることが確認された．今後は撮影方向や画像枚数を変えて同様の実験を行い，推定精度を高めるための最適な条件について検討する．さらに実際の X 線投影像を用いた実験を行い，提案手法の実用化を目指す予定である．

- 岡田, 佐藤, 小山, 菅野, 吉川, 越智, 田村進一. 3 次元 CT 画像を用いた解剖学的特徴に基づく統計骨形状モデルの構築. 第 24 回日本医用画像工学会大会 (JAMI2005), pp.-, 2005.
- TF Cootes TF, CJ Cooper, CJ Taylor, and J Graham. Active shape models their training and application., " Computer Vision and Image Understanding ", Vol.61, No.1, pp.38-59, 1995.
- J.Sethian. " Level Set Methods and Fast Marching Methods, second edition ". Cambridge University Press, UK, 1999.
- J.Sethian. A fast marching level set method for monotonically advancing fronts. In " Proceedings of the National Academy of Science ", Vol.93, pp.1591-1595, 1996.