

CTおよびCRによる3次元関節モデルの推定手法

Estimation of 3D-joint model using CT and CR images

伊藤 史人†
Fumihito Ito

1. まえがき

人体のCT画像から得られた3次元関節モデルは、必然的に撮影時の体位のままである。しかし、関節疾患のための術前検討においては適切な体位および関節状態での3次元関節モデルが必要である。膝関節の人工関節置換術(TKA)の場合は立位での情報が必要である。立位情報はCR画像から得られるが、これは2次元情報であり3次元情報として利用するには、CTの3次元情報とのマッチングを行わなければならない。本論文では、膝関節を例として、臥位CTおよび立位CRを利用することで3次元の関節モデルを推定する手法について述べる。

2. 膝関節による実験

本論文では、膝関節のTKAの術前検討会で利用すること想定して3次元関節モデルを生成する。提案手法は、X線透視像(CR)とCT画像のみを用いて立位3次元膝関節モデルを生成する点、および解剖学的情報を考慮することで大腿骨と脛骨を個別にイメージマッチングするという点に特徴がある。ここでの解剖学的情報とは、膝関節線および大腿骨と脛骨の骨軸情報である。なお、本論文で使用するX線透視像とCT画像の取得には特殊な撮影方法を用いないため、従来の撮影方法で取得した画像をそのまま利用することが可能である。膝関節を含む下肢については、図1に示す情報を利用して処理を行う。それぞれ、(a)大腿骨脛骨角(femoro-tibial angle; FTA)、(b)大腿骨軸-機能軸(外反角)、(c)関節-機能軸角、そして(d)脛骨軸-膝関節線角となる。他関節においても、特徴となる解剖学的情報を利用して3次元モデルを推定可能である。

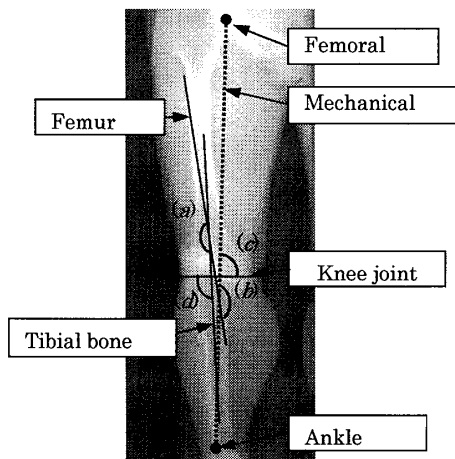


図1 TKAにおける下肢機能軸および重要な角度
Fig.1 Mechanical axis and important angles

3. 提案手法

本論文では、2段階のイメージマッチングにより関節モデルを生成する。第1段階ではX線透視像(CR)の大腿骨と脛骨を分離して、その部位ごとにCT画像とのイメージマッチングを行う。これは立位状態における大腿骨と脛骨の相対位置の変化への対策である。第2段階では前段階で得られた画像を基にCT画像から生成した3次元骨モデルを統合する。このイメージマッチングは第1段階を終えた骨部を統合するため、各骨部の平行移動処理のみで行うことができる。この平行移動は骨軸に沿って行う。これは骨軸に沿って行うことにより、X線透視像との位置合わせのための探索範囲を限定でき、本処理の効率化を図ることが可能になるからである。また、骨軸は術前計画において重要な解剖学的情報であり、イメージマッチングにおいても膝関節の形状を復元するために重要である。

3.1 大腿骨と脛骨の画像の分離

大腿骨と脛骨のイメージマッチングを個別に行うために、前処理としてX線透視とX線CTのそれぞれの原画像に対して膝関節を境に大腿骨と脛骨の部分と分離する。

(1) X線透視像の場合

下肢全長のX線透視像をディスプレイ上で表示し、膝関節を手動で決定する。膝関節(点線)上に沿って画像を切り出すと、下肢全長の画像から大腿骨(上方)と脛骨(下方)の部分と得られる。

(2) CT画像の場合

CT画像がボリュームデータであるため、まずコンピュータ上でX線透視装置と同様のジオメトリを構築し、下肢全長に対して透視投影を行い、疑似的な透視画像(digitally reconstructed radiograph; DRR)を生成する。生成したDRR上で、CT画像における大腿骨と脛骨の部分と分離するための膝関節の位置を決定する。ここで、DRR上の膝関節の決定は上述したX線透視像の場合と同様な処理で行うことができる。なお、今回生成した下肢全長DRRは大腿骨と脛骨のボリュームデータを分離するためであり、これ以降の処理では使用しない。

3.2 第1段階の処理

本論文では、X線透視像とCT画像上の大腿骨または脛骨の形状の違いは拡大縮小、回転そして平行移動のみによるものと仮定する。CT画像のイメージマッチングはDRRを通じて行うため、X線透視像とDRRの空間分解能を合わせれば、拡大縮小の違いがなくなる。そのため、CT画像のイメージマッチングは、当該データにおける6自由度の姿勢パラメータ(six degrees of freedom)を決定することで十分と考えられる。この姿勢パラメータには回転量(x, y, z)と移動量(tx, ty, tz)が含まれており、その概略図を図2に示す。添字の x, y, z はボリュームデータのそれぞれの軸に対応するものである。以下、具体的にCT画像のイメージマッチング方法について説明する。

†国立大学法人一橋大学, Hitotsubashi University

- (1) X線透視装置と同様のジオメトリを構築し、初期の姿勢パラメータを求める。
- (2) 姿勢パラメータを用いて、大腿骨または脛骨に対して透視投影を行い、DRRを生成する。
- (3) 生成したDRRとX線透視像との画像間類似度を計算する。類似度の評価関数Gとして、画像の輝度勾配(image gradient)にもとづく式(1)を採用する。当評価関数はイメージマッチングを行うために有効であることが分かっている^{2,3)}。

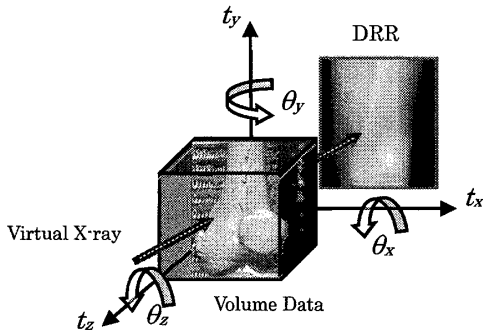


図2 ポリキュームデータの6自由度
Fig. 3 Six degrees of freedom of a volume image

$$G = \sum_{u,v} \frac{A_v}{A_v + (I_{diff}(u,v))^2} + \sum_{u,v} \frac{A_H}{A_H + (I_{diff}(u,v))^2} \quad (1)$$

ただし、

$$I_{diff}(u,v) = \frac{dI_{img}}{du} + \frac{dI_{DRR}}{du} \quad I_{diff}(u,v) = \frac{dI_{img}}{dv} + \frac{dI_{DRR}}{dv}$$

ここで、 I_{img} と I_{DRR} はそれぞれ画像平面の座標 (u, v) におけるX線透視像とDRRの輝度値であり、 A_H と A_V はそれぞれX線透視像の u と v 方向の輝度勾配の分散値である。

- (4) 姿勢パラメータを変更し、手順(2)へ戻る。さらに、評価関数Gが最大となる姿勢パラメータを得るまで本手順を繰り返す。

3.3 第2段階の処理

下肢全長のX線透視像を参照し、第1段階で生成した大腿骨と脛骨のDRRのイメージマッチングを行う。

- (1) 骨軸の抽出

骨軸の抽出では、徳田ら(2008)による手法¹⁾を採用した。X線透視像およびDRRの骨軸を決定するには、最初に、それぞれの画像上の骨部の左右の境界(骨境界)に対してしきい値処理を行い、境界付近のしきい値以上の画素群を求める。次に、それらの画素群に対して回帰直線式を求め、骨軸をこの左右の回帰直線の間にあるものとする。徳田らによれば、膝間隙から上方へ15cmを解析範囲とし、15cm地点の骨部断面と10cm地点の骨部断面を求めれば、骨軸をそれぞれの断面の midpoint をとる直線として求めることができる。ただし、骨の形状によって解析範囲の調整が必要な場合もあることに留意したい。

- (2) 骨軸に沿ったイメージマッチング

ここで、まず上述の方法により、大腿骨と脛骨の骨軸を抽出し、それぞれの骨軸と膝間隙との交点を求める。次に、骨軸に沿って各骨部のDRRを下肢全長X線透視像に位置合わせを行う。その際、評価関数を式(1)とし、骨軸と膝間隙との交点から $\pm d$ で1画素ずつ移動しながら、評価関数Gが最大になる位置を決定する。以上をもって、2段階

のイメージマッチングにより、大腿骨と脛骨におけるボリュームデータの姿勢パラメータと骨軸での移動量が求められ、立位3次元膝関節モデルを生成することができる。

5. 評価

下肢全長について、X線透視像と提案手法で構築したDRRの膝関節部分のズレを実距離で計算・評価を行う。ズレを計算するためには、両画像に対して互いに対応する地点の座標をもとに1次多項式を導き、当該式に当てはめた際、各地点のズレを残差、地点全体のズレを二乗平均平方根誤差(RMSE)として計測する。残差について(2)式で求める。

$$\begin{pmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} - \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix} \right\} \quad (2)$$

RMSEは下記の式によって計算できる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_{x_i}^2 + \xi_{y_i}^2} \quad (3)$$

5. 結果とまとめ

5.1 結果

実験は被験者3例について行い、それぞれRMSEは0.42(0.21mm)、0.69(0.34mm)、0.91(0.45mm)となった。CTとCRの解像度は最小で0.5mm/pixelと0.41mm/pixelであるから十分な精度が出ていると思われる。なお、3次元関節モデルの結果画像については図3に示す。

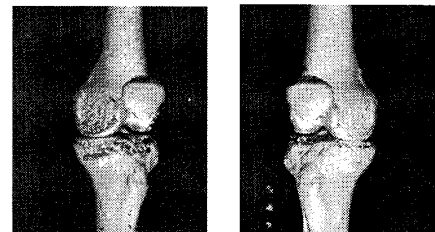


図3 結果画像
Fig. 3 Result Images

5.2 まとめ

解剖学的情報を利用することにより、CTとCRから3次元関節モデルを生成することができた。これにより、CRで任意の体位を撮影することで任意の3次元関節モデルを推定し生成することが可能になった。今後は医師による主観評価等を行っていききたい。

参考文献

- 1) 徳田正幸, 土井章男, 伊藤史人, 鈴木昌彦, 羽石秀昭: "X線CR下肢画像による膝関節の大腿骨と脛骨の自動抽出法", 画像電子学会誌, Vol.37, No.4, pp.81-89, (2008).
- 2) 小松公一, 田中信明, 坂本信, 田邊裕治: "透視単面X線像を用いた膝関節運動測定法の精度", バイオエンジニアリング講演会講演論文集, Vol.19, pp.230-231, (2006).
- 3) Banks, S.A., Hodge, W.A.: "Accurate measurement of three-dimensional knee replacement kinematics using single-plane fluoroscopy", IEEE transactions on biomedical engineering, Vol. 43, No. 6, pp.638-649, (1996).