

人工膝関節置換術後の3次元動作解析とモデル化

王 聡威[†] 廣瀬 直子[†] 有澤 博^{††} 白井利明^{†††} 齋藤知行^{†††}

[†]横浜国立大学大学院環境情報学府 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

^{††}横浜国立大学環境情報研究院 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

^{†††}横浜市立大学医学部整形外科 〒236-0004 神奈川県横浜市金沢区福浦 3-9

E-mail: [†]{superonion, naoko}@arislab.ynu.ac.jp, ^{††}arisawa@ynu.ac.jp,
^{†††}toshi-shirai@pat.hi-ho.ne.jp, t_saito@med.yokohama-cu.ac.jp

あらまし 近年、人工膝関節の置換術が行われていて、術後の人工膝関節の動態を定量的に解析することが求められている。一般的には、X線で撮影した映像と人工膝関節の3次元形状モデルをマッチングさせることで、人工膝関節の動態を解析できる。しかし、撮影装置の制約により、一度に一方向からしか撮影できないため、奥行き誤差が大きいという問題がある。そこで、同じ動作を他視点から二度以上撮影するという手法を提案する。本論文では現在行っている予備実験の結果について報告するとともに、提案の実現性について議論した。

キーワード 人工膝関節、X線透視撮影画像、モデルベースマッチング、異時点異視点

Three-Dimensional Kinematic Analysis and Modeling of Knee Implants after Total Knee Arthroplasty Operation

Congwei WANG[†] Naoko HIROSE[†] Hiroshi ARISAWA^{††}

Toshiharu SHIRAI^{†††} and Tomoyuki SAITO^{†††}

[†]Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

^{††}Faculty of Environment and Information Sciences, Yokohama National University
79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501 Japan

^{†††}Department of Orthopaedic Surgery Yokohama City University School of Medicine
3-9 Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama, 236-0004, Japan

E-mail: [†]{superonion, naoko}@arislab.ynu.ac.jp, ^{††}arisawa@ynu.ac.jp,
^{†††}toshi-shirai@pat.hi-ho.ne.jp, t_saito@med.yokohama-cu.ac.jp

Abstract Recently, the Total Knee Arthroplasty (TKA) operations were become a routine procedure. The precise measurement of TKA kinematics was required. Normally, the measurement was done by matching the monocular fluoroscopic image with 3D CAD model of the knee implant. But, the monocular vision has much reduced accuracy for determining translation perpendicular to the image plane. This article presents a technique of taking the fluoroscopy from different viewpoint at different time. The result of the pre-test is reported, and the realization of this technique is discussed here.

Keyword Knee implant, Monocular Fluoroscopy, Model based matching, Different time & Different viewpoint

1. はじめに

1.1. 情報工学と医学分野の連携

近年、医学分野が抱える問題を情報工学分野の技術で解決しようとする取り組みは広くなされていて、当有澤研究室でも、PET画像を用いたガン自動診断や人体モデルを用いた動作負荷評価などの研究が行われている。このように医学と情報工学の連携によって成果を挙げられる話題は数多くあるが、その中でも本論文では人工膝関節の動作解析という問題に取り組んだ。

1.2. 人工膝関節全置換術

1980年代後半から、長期間の使用等によって軟骨が

磨り減り、膝痛を訴える患者に対して、軟骨と周囲の骨を切除し人工物と取り替える、人工膝関節全置換術が一般的に行われるようになった。そういった手術を行った場合、術後の体内の状態を知ることが必要であるが、脱臼を起していないか、人工関節は壊れていないかといった定性的な情報はX線透視投影装置で患者の膝の部分撮影することで知ることができる。しかし、人工膝関節の挙動をもっと詳細に、定量的に知ることができれば、患者に埋め込まれた人工関節の客観的かつ詳細な評価を行うことができ、より最適で寿命の長い人工膝関節の設計、あるいは手術手技の改善

につながるため、その要望は高い。

1.3. モデルベースマッチング

一方、情報工学の分野においては、2次元の画像と3次元の形状データをマッチングする手法(モデルベースマッチング)がある。この手法を人工膝関節の動作解析に適用しようとする試みはこれまでも行われており、中でも、1990年代に入ってから、Banks[1]らはテンプレートマッチングという手法を提案し、Zuffi[2]らは2D/3Dレジストレーションという手法を提案した。

1.4. 問題点

しかし、X線透視投影装置は一度に1方向からしか撮影することができないため、画像における左右、上下の動きの検出精度に対して、前後の動きの精度が悪くなってしまおうという大きな問題点がある。Banks, Zuffiらはこれらの問題を考慮しておらず、またDennis[3]らは回転可能なX線撮影装置を用いて、静止した膝を異なる時点に2方向から撮影することにより、人工膝関節の3次元位置・姿勢情報を取得したが、連続した動作の解析はできていない。

そして藤田[4]らは、2方向から同時に撮影できる機器を用いて撮影した映像によって、正常膝関節の3次元動作解析を行ったが、このような機器は一般的ではなく、広く使われている1方向撮影機器で同様の解析を行えるような工夫が必要である。

1.5. 提案

そこで、前後の動きの精度が悪い問題点については2方向から撮影するという方法で解決する。また、一般的な1方向撮影機器については異なる時点で撮影するという方法で解決する。以上、二つの考え方を組み合わせ、本論文では患者に同じ動作を複数回行ってもらい、視点を変えて、複数回連続X線撮影するという手法を提案した。

以降2章では人工関節の動作解析に必要な技術と既存研究の取り組みについて述べ、問題点を挙げる。3章では提案手法の全体像を述べ、4章では手法の具体的な構成を述べる。5章で現在行っている予備実験の結果、6章でまとめと今後の展望について述べる。

2. 必要な技術と既存研究

2.1. 必要な Hardware

これまで行われてきた人工膝関節の動作解析に関するさまざまな研究では、膝関節という体内の情報を知るためにさまざまなアプローチがなされてきた。例えば In Vivo (生体) に対しては、皮膚にマーカーをつけ、マーカーの位置情報から体内の関節の情報を取得しようとした手法があるが、皮膚の上についたマーカーから人工膝関節の動きは正確に測定することはできない。一方、In Vitro (死体) に対しては、骨に直接マ

ーカーを着けることができるため、これによって人工膝関節の動きを正確に測定することができるが、実際に人工膝関節を使用している患者の解析はできない。

また、CT・MRIで撮影を行うことで、人体の臓器・骨格・関節などの3次元解析を行うことができる。しかし、撮影スペースに制限があることで荷重屈曲などの動作を行うことができなかつたり、撮影スピードが遅いため映像を撮影することができなかつたり、金属を撮影するとアーチファクトが生じるため、関節部分だけを抽出することができなかつたりするといった問題点があるため、CT・MRIは人工膝関節の3次元動作解析への応用も困難である。

一方X線透視撮影装置なら、患者が運動する十分なスペースがあること、映像を撮影することができること、直接人工関節の動作を観察することができること、金属物体がくっきりと写ることなどの数多くの利点があることから、撮影に最適な機器であるといえる。

2.2. 必要な Software

人工膝関節の動作解析では「モデルベースマッチング」の手法が広く行われている。X線画像から抽出したオブジェクトに対して、人工膝関節の形状・構造データを照合させることでオブジェクトの位置・姿勢を決定するという手法である。

このモデルベースマッチングについて以下に順を追って述べる。

2.2.1. 対象オブジェクトの3次元的な形状、構造モデルの取得

まず対象オブジェクトの3次元的な形状・構造モデルを計算機上に構築することが必要である。オブジェクトの形状は、三角形パッチなどのポリゴンデータや、円筒や超楕円形などによる近似を用いた表現などが使われることが多い。

そしてそのようなデータの取得方法としては、人工関節のような人工物の場合は、CADデータを基に作成されているため、非常に正確な形状モデルを直接的に得ることも可能であるし、一方そのようなデータのない場合でも、レーザースキャンで形状を取得する方法もある。

2.2.2. 画像からのオブジェクト抽出

マッチングのためには、撮影画像からオブジェクトを抽出することが必要である。一般的なカメラ画像においては、背景が変化しない場合なら背景画像を事前に取得しておき、差分を取ることでシルエットを抽出する方法や、連続する画像間での差を取り、動きのある部分を抽出する方法など、さまざまな方法が提案されている。

人工膝関節を撮影したX線透視投影画像の場合は、カメラ画像と異なりモノクロ画像であるため情報量が

少ないが、金属部分が鮮明に写ることによって簡単な画像処理を行うことで人工膝関節部分のみを抽出することができる。

2.2.3. オブジェクトの投影、画像との照合によるオブジェクトの位置姿勢の取得

最終段階として、画像から抽出されたオブジェクトのシルエットと、オブジェクトの形状、構造データを用いてオブジェクトの位置姿勢の取得を行う。あらかじめ計算機上に、撮影時に使用したカメラなどの撮像系を反映したカメラモデルを構築しておく。ここで撮影機器について説明する。

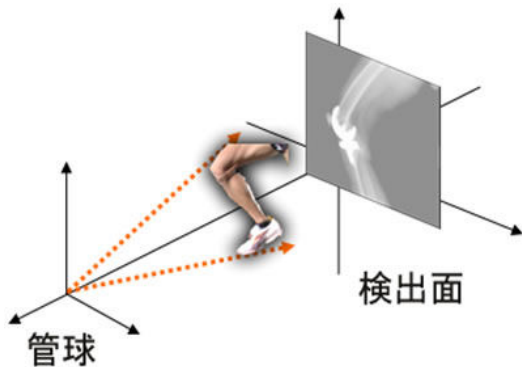


図1 X線透視投影装置での撮影の仕組み

X線透視投影装置が撮影を行う仕組みを図1に示す。管球からX線を照射し、まっすぐに進んだX線が検出面でフィルムに焼き付けられる。このような仕組みの撮影機器に対しては一般に使われているビデオカメラと同様のピンホールカメラモデルを適用することができる。

次に、この撮像系中でオブジェクトの形状、構造モデルをもとに、オブジェクトにさまざまな位置、姿勢をとらせ、仮想的にオブジェクトを画面に投影し、シルエットを得る。これと、実際に撮影されたシルエットの一致度を比較し、もっとも一致した位置姿勢をそのときのオブジェクトの位置姿勢として出力する。

2.3. 既存研究

本節では、これらの技術を用いた既存研究について、問題点を考察する。

Banks[1]らの研究では、人工膝関節を投影した投影像の輪郭形状が、物体の姿勢に応じて変化すること、また投影像の位置や大きさも、物体の空間的位置に対応して変化することを利用して、位置・姿勢が既知の投影像群をライブラリとして用意しておき、位置・姿勢が未知の投影像をライブラリと照合することで、その位置・姿勢を推定した。

一方Zuffi[2]らは、X線焦点と投影画像の輪郭点を結ぶ全投影線が、人工膝関節のCADモデル表面と完全に接したところが、正確なモデルの位置・姿勢であると

考え、推定を行った。

しかし前節で述べたように、Banks, Zuffiらの研究は単方向撮影であるため、与えられる情報はある視点からみた2次元の画像のみである。したがって、例えばオブジェクトがカメラの奥行き方向に沿った動作を行ったとき、図2の左側の投影平面のように画像上でのシルエットの形状変化は小さくなるが、単視点撮影ではこれを図2の右側のような別角度からの撮影によって補正することができない。つまり、画像における左右、上下の動きの検出精度に対して、前後の動きの精度が悪くなってしまいう問題に対して、単方向撮影では解決することができない。

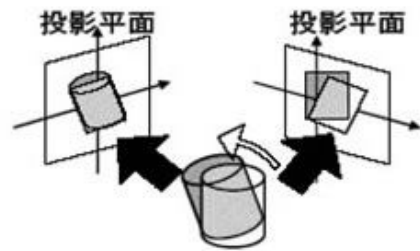


図2 方向による変化

3. 人工膝関節動作解析システムの提案

以上の問題を解決する手法として、われわれは視点を変えて複数回X線映像の撮影を行うことを提案する。

3.1. 全体の流れ

まず、患者に1回目の運動を行ってもらい、それを任意の方向から撮影する。このとき得られた画像列を以下シリーズAとする。そして、もう一度患者に同じ動作をしてもらい、それを1回目とは別の方向から撮影する。こうして得られた画像列を以下シリーズBとする。

次にそれぞれ得られた画像列に対してモデルベースマッチングを行う。

閾値処理

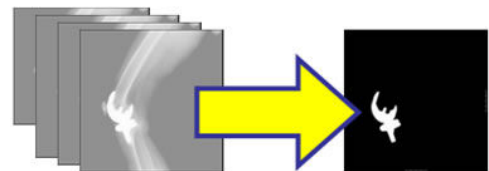


図3 閾値処理によるオブジェクト抽出

まず、図3のように撮影された画像列に画像処理を行い、人工膝関節部分だけを抽出したシルエット画像を作成する。

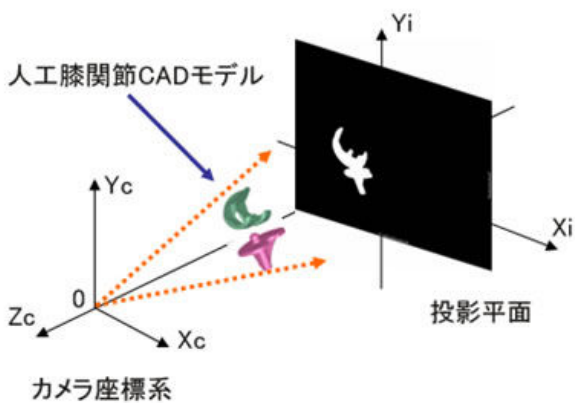


図4 シルエット画像の作成

また一方で、図4のように撮影機器に適切なカメラモデルを当てはめることで、コンピュータ上で仮想的に撮影空間を構築し、人工関節がある位置・姿勢にあるときのシルエット画像を作成する。こうして得られた二枚の画像を照合することで、推定される人工関節の位置・姿勢を取得し、この処理を全ての撮影画像に対して行うことで動作解析を行う。最後に、異なる視点で解析した結果を用いて、各シリーズのパラメータを組み合わせることで、全体的に精度の良い解析結果が得られる。

以上の処理を行うことで、提案手法を実現する。

3.2. 使用する撮影機器とCADデータ

3.2.1. X線透視撮影装置



図5 X線透視撮影装置

本研究で用いたX線透視撮影装置は東芝社製FPD搭載型X線TVシステムDynaDirect Winscope6000である(図5)。照射野はFPD34×34cmである。写真で1の位置にある管球からX線を照射し、写真で2の位置にあるインテンシファイアでX線量を検出する。

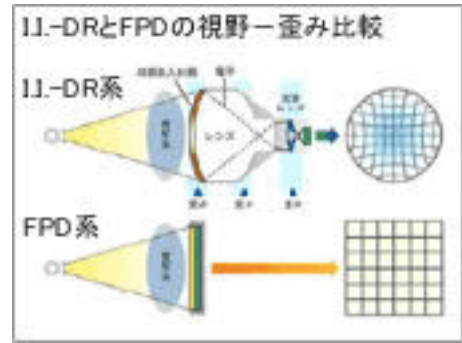


図6 X線平面検出器

また、一般的なカメラの場合はレンズによる周辺部のゆがみなどを考慮することが必要であるが、本研究で用いた撮影機器の場合は、縦34×横34cm角サイズ(フィルムの大角相当)の大視野であり、これまで使われているシステムで失われていた四隅部分も容易に透視・撮影できることに加えて、中心から周辺部まで歪み、輝度変化のない安定した画像が得られる(図6[8])。そのため、単純なピンホールカメラモデルの適用だけで十分であると考えられる。

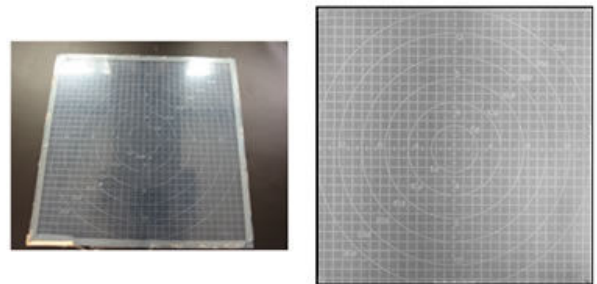


図7 キャリブレーションボード

実際にキャリブレーションボード(図7左)を置いて撮影したX線撮影画像(図7右)を図7に示す。キャリブレーションボードに描かれた直線が、中心から周辺部までまっすぐに伸びていることが分かり、ゆがみが少ない画像を得られていることが確かめられる。

3.2.2. 人工関節の形状データ

本研究で用いた人工関節のCADデータは、人工関節等の整形外科分野の医療機器メーカーである、(株)日本ストライカーから頂いた。データ中で、人工膝関節の3次元形状はSTL形式で表現されており、実物に非常に近い正確なデータであると言える。

4. 人工関節の動作解析システム

この章では、3章で述べた人工関節の動作解析システムに関して説明を行う。まずコンピュータ上に撮影環境をモデル化し、仮想的にシルエット画像を作成することについての説明を行い、次に撮影画像から人工

関節部分だけを抽出する処理について説明する。

4.1. コンピュータ上でのシルエット作成

シルエット作成には撮影機器をモデル化することが必要である。これにより、空間中にある一点が、検出面のどの位置に投影されるかを知ることができ、それを人工関節の全ての頂点について行なえば、コンピュータ上で仮想的にシルエット画像を作成することが可能となる。

4.1.1. X線透視撮影装置のモデル化

撮影された2次元の画像、つまり検出面と、実世界の3次元情報を関連付けるには、実世界と画像の対応付けが必要である。ここでは装置の構造を考慮して、一般的なカメラに対して用いられているモデルと同様のピンホールカメラモデルを適用した。

カメラ座標系において、実世界のある一点を (X_c, Y_c, Z_c) と置き、その点が画像上に投影された点を $(X_i, Y_i, 0)$ とする。このとき、以下のような式が成り立つ。焦点距離 f は撮影機器の仕様より 1050mm とした。

$$X_c / Z_c * f = X_i \dots\dots\dots(1)$$

$$Y_c / Z_c * f = Y_i \dots\dots\dots(2)$$

一般的なカメラに対してはゆがみを考慮したより複雑なモデルを当てはめるが、本研究で用いた装置はその特性上ゆがみが非常に少ないので、この単純なモデルのみを適用した。

以上より、カメラ座標系に存在するある一点が画像上にどのように投影されるかを計算することができる。

4.1.2. 座標系の設定

人工関節の CAD データは、CAD データの座標系に基づいてすべての頂点の位置が記されている。したがって、前節のような投影を行うには、カメラ座標系に変換することが必要である。

CAD データ座標系 $(X_{cad}, Y_{cad}, Z_{cad})$ からカメラ座標系のある点 (X_c, Y_c, Z_c) への変換は回転行列 R と平行移動行列 T によって行われる。

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{cad} \\ Y_{cad} \\ Z_{cad} \\ 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

この変換行列 R, T に含まれる 3 つずつ計 6 つのパラメータは、一つの剛体がどのような位置・姿勢にある

かを示す。ここでは人工膝関節が二つの部位によって成り立っていることから、回転および平行移動行列をそれぞれに設定し、計 12 個のパラメータで人工膝関節の位置・姿勢を決定する。

4.1.3. シルエット画像作成

以上より、12 個のパラメータで決定されたある位置・姿勢にある人工膝関節のある頂点 $(X_{cad}, Y_{cad}, Z_{cad})$ の、画像上での位置 $(X_i, Y_i, 0)$ を計算することができた。これを人工関節のすべての頂点について行い、内部を塗りつぶすことでシルエット画像を得ることができる。

4.2. 撮影画像からの人工関節部分の抽出

金属物質である人工膝関節は、X線透視投影装置で撮影すると、非常に鮮明に写り、単純な閾値処理だけで容易にシルエットを抽出することができる。しかし骨部分やX線防護服なども、人工膝関節と同様にX線を透過しにくい物質であるため、単純な閾値処理を画像全体に施しただけでは、シルエットのみを抽出することができない。そこで本研究では、患者の動作によって人工関節が動く範囲は限られていることに着目した。動作解析の際に行われる荷重屈曲、屈曲、階段昇降といった動作は左右方向への動きが大きいのに対し、上下方向の動きは少ない。そこで、画像中で閾値処理を施す部分、すなわち人工関節が写っていると考えられる部分をあらかじめ切り出すことで、人工関節のシルエットのみを抽出することとした。この範囲は手で決定し、シルエットを抽出するための閾値の設定は経験的に決定した。

4.3. 最適化処理

以上より、ある位置・姿勢にある人工膝関節のシルエット画像と、撮影画像から抽出した人工膝関節のシルエット画像が作成できる。そこで、これらの二枚の画像の類似度を評価関数、人工膝関節の空間的な位置・姿勢を決定する 12 のパラメータを変数として、最適化を行うことで、人工膝関節の位置・姿勢を推定した。類似度は二枚のシルエット部分の和を分母、積を分子として、この値を 1 に近づけるようにした。今回の問題の特徴として、シルエット画像を作成し、二枚の画像を走査するという評価値の導出に時間がかかるため、最適化は評価関数を呼び出す回数の少ない、Powell の方法を採用した。

4.4. 異時点異視点撮影画像の統合

複数視点の映像を取得しようとしたとき、複数台のビデオカメラで同時に撮影するという方法が一般的である。しかし、異時点異視点撮影する場合は時点間の対応と座標系の統合という問題点を解決しなければならない。また、患者が全く同じ動作を繰り返すことが

困難であるので、二度の動作をできるだけ近づけるための、患者に対する工夫が必要となる。

まず、時点間の対応について述べる。

一つ目の考え方として、皮膚にマーカーをつけ、動作と同時にビデオカメラで撮影することで、マーカーの位置変化情報を取得し、時点間対応を取るという方法が挙げられる。X線透視撮影装置の撮影と同時に、複数台のビデオカメラで患者の膝の部分撮影し、マーカーの位置から膝の屈曲角度を求める。このようにして取得した屈曲角度に基づいて、1回目と2回目に撮影された映像の時点間対応を取ることが可能であると考えられる。

二つ目の考え方として、骨にX線透視撮影装置に写るマーカーをつけ、マーカーの解析結果から膝関節の屈曲角度を求め、1回目と2回目の映像の時点間の対応が見つかることが可能である。しかし患者の負担が大きいことを考慮する必要がある。

夫について説明する。まず患者の足を機械などに完全に固定することで、常に同じ動きをするよう強い制限を加える方法が考えられる。この方法は確実に同じ動作を繰り返すことが可能であるが、患者の自然な動作の解析を行うことができないという問題点がある。しかし自然な動作を行なってもらうために制約を減らすことで、患者の動作の速度は異なっても、同じ軌跡をたどるようにすることができると考える。たとえば階段昇降の動作では二度の動作で膝がぐらついたりすることがあるが、深屈曲動作（地面に膝をついた状態から正座を行なう動作）なら、脛骨の位置が固定されるため、二度の動作解析結果の統合が可能であると考えられる。したがってこのような動作に対しては本論文の提案手法は有効である。

以上の方法を用いることで、時点・座標系の対応を取り、異時点に2方向から得られた画像に対して、正確な3次元動作が解析できる。

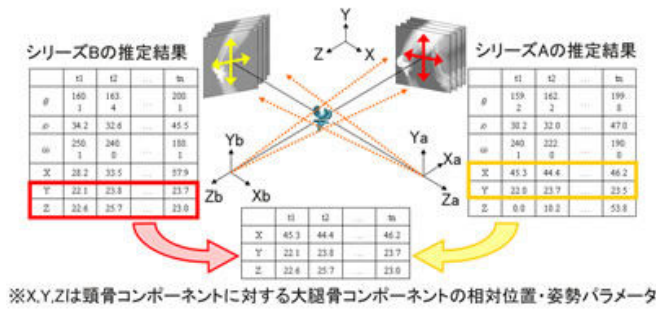


図8 異時点異視点撮影画像の統合

さらに三つ目の考え方を図8に示す。シリーズAとシリーズBの各パラメータは、大腿骨コンポーネントの脛骨コンポーネントに対する相対位置・姿勢パラメータを表している。撮影方向に対して垂直な方向は高精度に解析できるので、シリーズAのX,Y方向と、シリーズBのY,Z方向の値は高精度な結果となる。次に説明する座標系の統合を行えば、両シリーズのYの値で時点間対応を取り、シリーズAのXの値とシリーズBのZの値を組み合わせることで、全体的に精度のよい解析結果が得られる。

次に、座標系の統合について述べる。医師の要望は人工膝関節の各コンポーネントの絶対位置・姿勢ではなく、脛骨コンポーネントに対する大腿骨コンポーネントの位置・姿勢である。このことに着目すれば、両コンポーネントの解析結果を相対的な位置・姿勢の値に変換しても問題はない。そして、このような変換を行うことによって、異なる視点から撮影した異なるカメラ座標系での値を、同じ座標系で直接比較することができる。

最後に、二度の動作をできるだけ近づけるための工

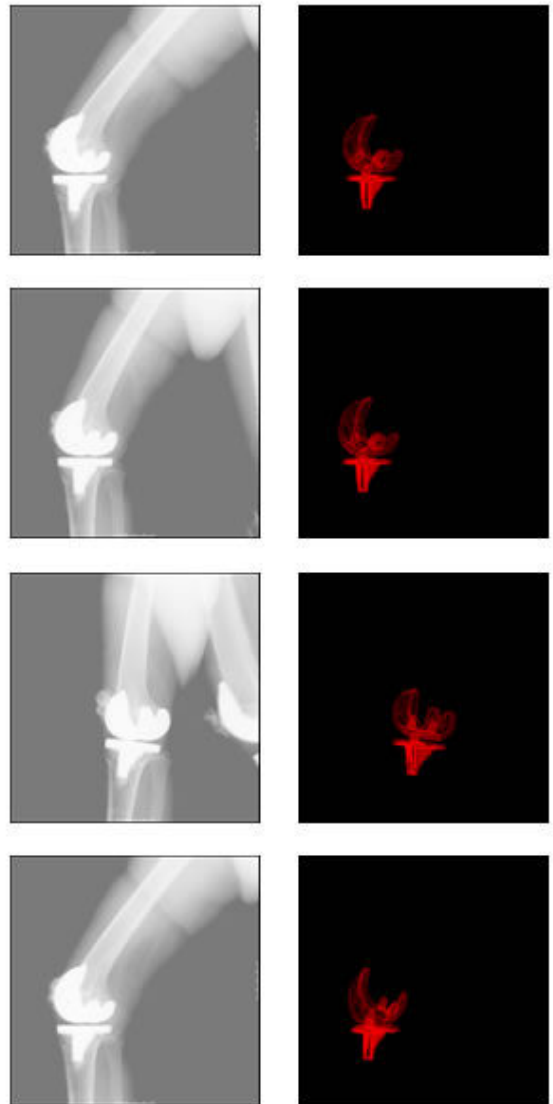


図9 予備実験結果（斜めから見た映像）

5. 予備実験の結果

現在、提案手法を実現するための予備実験を行っている。患者に同じ屈曲動作を二度行ってもらい、膝部分を真横から見た映像と、斜め前から見た映像を取得した。ここではその解析結果について述べる。

実験環境は以下のとおりである。

CPU: Intel® Xeon® CPU 3.00GHz

メモリ: 2.75GB RAM

OS: Microsoft Windows XP Professional

開発環境: Microsoft Visual C++ .NET

結果を以下に示す。図9は斜めから見た映像の解析結果の一部、図10は横から見た映像の解析結果の一部である。

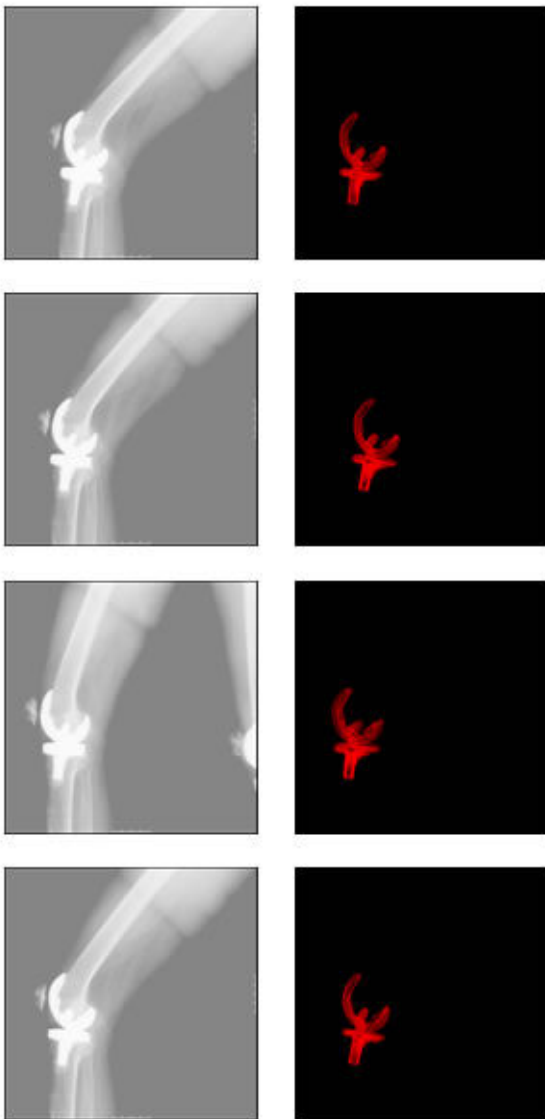


図10 予備実験結果（横から見た映像）

いずれの画像においても、撮影方向に垂直な方向（つまり画像上での上下、左右の方向）はよく一致し

ていることがわかる。

一方、精度の検定を行なうため、コンピュータシミュレーションを行なった。実際の膝関節の動作に近い位置・姿勢パラメータの時系列データを作成し、そこから得たシルエット映像に対して解析を行い、正解値と推定値の誤差を導出した。結果を図11に示す。

位置のパラメータに関しては、左右、上下方向が5mm程度、奥行き方向が8cm程度の誤差があった。一方、姿勢のパラメータに関しては、どのパラメータも10°程度の誤差があった。以上より、奥行き方向の精度向上の必要性が明らかとなり、二方向の撮影を行なうことで解析精度の向上が期待できる。

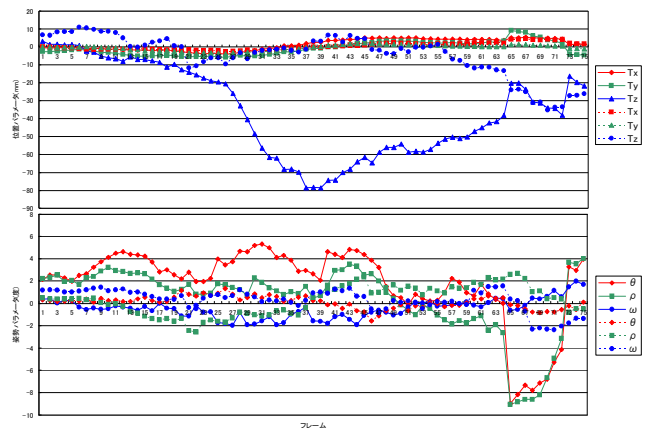


図11 精度検定結果

6. まとめと今後の展望

本研究では、単方向撮影による人工膝関節の動作解析における、撮影方向に関する推定精度を向上させるため、複数回連続 X 線撮影するという手法を提案し、解決の歩みを示した。これにより、広く使われている一方向 X 線撮影機器に対して高精度な解析が期待できる。

今後は、異時点に撮影した複数方向の撮影画像の解析結果の統合という技術のさまざまな応用に取り組むとともに、人工膝関節の3次元動作解析をより高精度に行うと考えている。例えば、輪郭を抽出する方法である Snakes[10]を試したり、他のマッチングアルゴリズムを考慮するなど、システムの改良を図っていこうと考えている。

文 献

- [1] Banks SA: Model Based 3D Kinematic Estimation from 2D Perspective Silhouettes: Application with Total Knee Prostheses [doctoral dissertation], Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology. 1992.
- [2] Zuffi S, Leardini A, Catani F, et al.: A model-based method for the reconstruction of total knee replacement kinematics. IEEE Trans Med Imaging,

18(10),981-991. 1999.

- [3] Dennis DA, Komistek RD, Colwell, Clifford E. Jr, Ranawat, Chitranjan S, Scott RD, Thornhill TS, Lapp MA: In Vivo Anteroposterior Femorotibial Translation of Total Knee Arthroplasty: A Multicenter Analysis. *Clinical Orthopaedics & Related Research*. 356:47-57, November 1998.
- [4] 藤田智, 羽石秀昭, 鈴木昌彦, 守屋秀繁: 2方向 X線透視像と3次元 CT画像を用いた膝関節の3次元動き情報の取得. 第23回日本医用画像工学会大会. 2004.
- [5] 廣瀬直子, 秋山拓也, 有澤博: 詳細な形状モデルを用いたオブジェクトの3次元位置・姿勢推定. 第17回データ工学ワークショップ(DEWS 2006) 論文集. 2006.
- [6] 山崎隆治, 渡邊哲, 他: X線透視画像を用いた人工膝関節の三次元動態解析システムの開発. *日本放射線技術学会雑誌* 61(1), pp.79-87. 2005.
- [7] Li G, Wuerz TH, DeFrate LE: Feasibility of using orthogonal fluoroscopic images to measure in vivo joint kinematics. *J Biomech Eng*. 126;314-318. 2004.
- [8] Dyna Direct, 東芝メディカルシステムズ株式会社, http://www.toshiba-medical.co.jp/tmd/products/x/tv/d_direct.html
- [9] 廣瀬直子, 秋山拓也, 有澤博, 白井利明, 齋藤知行ほか, “X線透視撮影画像を用いた人工膝関節の3次元動作解析” 第13回京都・横浜・奈良バイオメカニクスカンファレンス, Dec.2006
- [10] M.Kass, A.Witkin, and D.Teraopoulos: Snakes; Active contour models. *Int.J.ComputerVision*. Vol.1, No.4, pp.321-331, 1998.