

下肢アライメントの測定システムと膝関節運動の これまでの流れと今後の課題について

新潟医療福祉大学医療技術学部理学療法学科
寺島和浩

キーワード：下肢アライメント評価 膝関節運動 6自由度電気角度計 2方向X線撮影
Computed Radiography

Development of Assessment Systems of Leg Alignment And Movement of Knee Joint And Their Future Problems

Kazuhiro Terajima, Ph. D

Abstract

We made a three dimensional skeletal model of leg using the bone contour data from CT and non-contact three dimensional digitizer and developed evaluation system combining this scanning and the analysis of leg alignment-assessment based on two directional X ray imaging (bi-planar X-rays). Further, we have engaged on the development of measuring system of knee joint movement using bi-planar X-rays and six-degree-of freedom electric goniometer. Also we carried out the evaluation of installation of artificial knee joint and the methods of installation.

We have described that analysis of leg alignment assessment can be determined the clinical evaluation parameter into three dimensions by incorporating the anatomical coordinate systems which are defined the reference points obtained from traditional two directional X ray photographical analysis, three dimensional model of bones and shapes of bones. We have described the measurement of movement of knee joints using six-degree-of-freedom electric goniometer. This equipment can be employed for measurement of movement of knee joint during walking and the some results are presented. In the evaluation of installment we have described the method of evaluation from both position and statue by projecting the artificial joint component models using projective determinants from X ray images photographed from two directions. In development of installation techniques of artificial knee joints, we have altered the position and statue of the guide for bone cutting, using a special device with six axis and transfer the femoral bone components to the target position determined by 3 dimensional model of bones before an operation.

Key words : Evaluation of Leg Alignment Assessment. Knee Joint Motion. Six-Degree-of-Freedom Electric Goniometer. Bi-Planar X-Rays. Computed Radiography

要旨

これまで、著者らは、CTやレーザースキャンなどのデータから骨の3次元モデルを作成し、2方向X線画像を用いた下肢ア

ライメント解析と組み合わせた評価、2方向X線画像と6自由度電気角度計を用いた膝関節運動測定などを行うシステムの開発をしてきた。また、これらのシステムを応

用して人工膝関節の設置評価や、人工膝関節設置法の開発をしてきた。

下肢アライメント解析は、従来の2方向X線撮影による解析に骨の3次元モデルと骨形状から決めた参照点で定義する解剖学的座標系を導入することで臨床評価パラメータを3次的に定義できることを述べている。また、6自由度電気角度計を用いた膝関節運動測定について述べている。この機器は、歩行中の膝関節運動の測定にも用いることができ、その測定結果を示している。人工膝関節の設置評価では、2方向X線撮影したX線画像上に射影行列を用いて人工関節コンポーネントモデルを投影し、位置と姿勢を評価する方法を述べた。人工膝関節設置法の開発では、6軸の特殊デバイスを用いて骨切りガイドの位置と姿勢を変化させ、術前に3次元骨モデルを用いて決めた目標位置に、人工関節の大腿骨コンポーネントを移動させる方法を述べた。

はじめに

これまで著者らは、整形外科医らとの共同で、臨床バイオメカニクスに関わる研究に従事してきた。バイオメカニクスは、生体の機能を力学を応用して解明していく研究分野で、医学、工学、体育学などの多岐にわたる専門分野からのアプローチがある。著者はこの中で特に膝関節運動と下肢アライメントの測定システムの開発とそのシステムを用いた解析を行ってきた。

測定評価は、精度が重用視される。しかし、生体は、測定対象そのものが曖昧さを持っている場合があるため、特に困難とされている。そのようなものの特徴を考える際、類似している既知の概念を当てはめて、未知の特徴を推測することが多い。例えば、膝関節の大腿骨の遠位が2個の球が並んでいる形状に似ている時、球の中心を結ぶ軸周りの蝶番の運動を行うであろうと考える。

しかし、生体に関しては未知の要因が多く、単純なモデルだけでは表現できない。

例えば、膝関節症患者の関節運動を考えると、大まかな蝶番運動と、大腿骨と脛骨の形状の変化に伴う関節に作用する力の変化、関節面の軟骨の変化、筋力の変化、靭帯の変化などが複雑に絡む。したがって、下肢アライメントや関節面形状を正確に計って、筋力の変化や靭帯の変化による影響を推定することが必要になると考える。

これまで、著者らは、CTやレーザースキャンなどのデータから骨の3次元モデルを作成し、2方向X線画像を用いた下肢アライメント解析と組み合わせた評価、2方向X線画像と6自由度電気角度計を用いた膝関節運動測定などを行うシステムの開発をしてきた。また、これらのシステムを応用して人工膝関節の設置評価や、人工膝関節設置法の開発をしてきた。そこで、今後のリハビリテーションへの応用を検討するため、これらの方法とこれまでの応用を紹介する。

方法および結果

1. 下肢アライメント解析システム^{1) 2)}

A. 骨モデルの作成

骨モデルは、以下の方法で作成する。間隔2mm~10mmのCTスライス画像より、骨の輪郭をマウスポインターで、1スライスあたり20~300点手動で抽出する。これらをスライス垂直方向に積み重ねて、骨表面点列データにする。図1に骨表面点列データに三角形パッチを張ったワイヤモデルを示す。

B. 解剖学的座標系

大腿骨と脛骨に解剖学的特徴点を元にして、基準座標系を構築する。通常は、大腿骨と脛骨の位置が異なると座標値が変化するが、これらの座標系から見た場合は、大腿骨や脛骨の位置や姿勢に依存しない座標値を決めることができる。このような座標系を用い

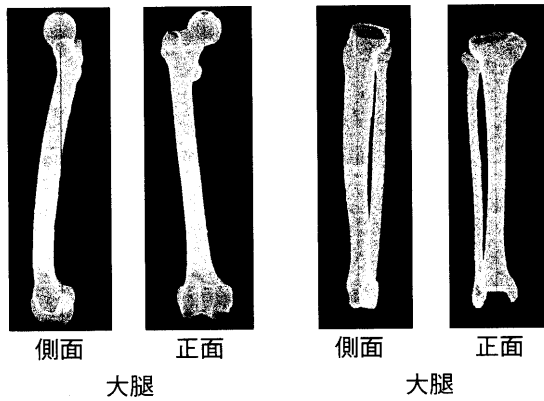


図1 下肢の骨モデル

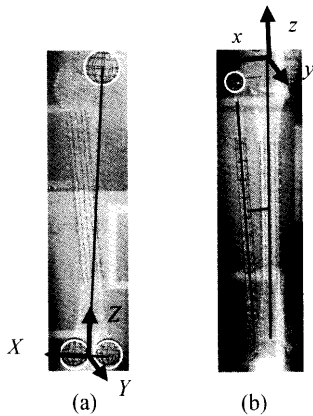


図2 下肢の解剖学的座標系

れば、座標変換により、幾何学的な計算を簡単に行うことができるので便利である。運動解析の際は、これらの骨に固定された座標系がワールド座標系と呼ばれる空間の座標系のどこにあるかを表現する。また、肢位の変化は、大腿骨座標系と脛骨座標系の相対位置の変化として捉えることができる。

大腿骨座標系は、骨表面点列データの内、大腿骨骨頭、大腿骨内外側後顆に球をフィッティングし、それぞれの中心点を参照点として構築する。大腿骨の内外側それぞれの後顆中心を結ぶ軸 (X軸) と、3点を含む平面の法線 (Y軸) とを用いて、X,Y,Zの3軸が直交する座標系を構築する。原点は内外側それぞれの後顆中心の midpoint とする。

一方、下腿骨座標系は、脛骨と腓骨それぞれ、骨幹部を円柱で近似し、直線軸を決

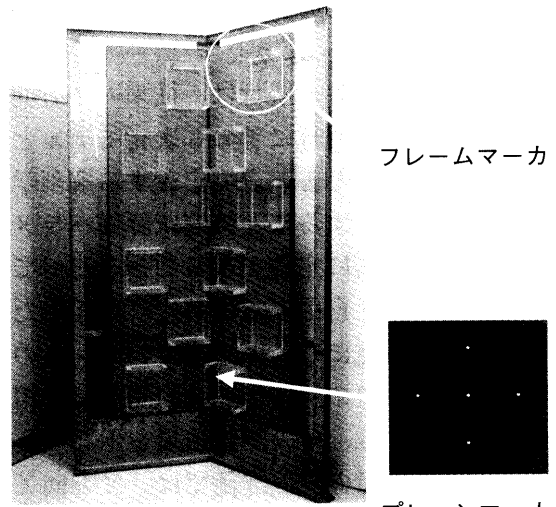


図3 カセット台

める。脛骨近位の関節面を決め、脛骨後顆接線 (x軸) と脛骨軸 (z軸) からx,y,zの3軸が直交する座標系を構築する。このとき脛骨関節面と脛骨軸との交点を原点とする。(図2)

C. 2方向X線撮影と参照点のデジタイズ

2方向X線撮影は次の手順で行う。(i)CR 2方向画像読込、(ii)キャリブレーションデータの抽出、(iii)CR 2方向画像で基準線の表示と参照点の決定、(iv)参照点の3次元化 (v)参照点からの下肢アライメント評価パラメータの算出である。

立位で膝関節に荷重された状態での下肢アライメントを測定するため、図3に示すような開き角度120度のカセット台の前に対象を立て、デジタルX線 (computed radiography: 以下CR) 撮影を行う。カセット台には、フィルムの代わりに特殊X線プレートが3枚入った長尺カセットを設置する。特殊X線プレートから読み出された画像情報はデジ

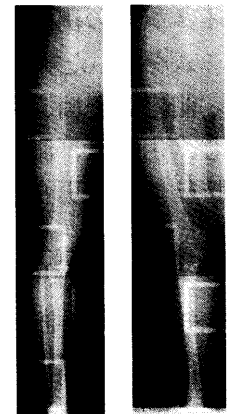


図4 2方向CR画像

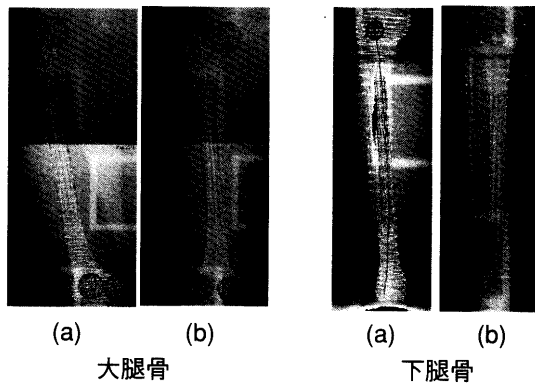


図5 骨モデルのX線画像上への投影

ルデータとしてパーソナルコンピュータに転送される。図4は得られたデジタルX線 (computed radiography: 以下CR) 画像である。また、カセット台にはキャリブレーションに用いるための直径1mmの鋼球が埋め込んであるマーカーフレームが設置されている。X線照射点とX線プレートとの関係は、X線照射点を焦点、X線プレートを画像平面としたピンホールカメラモデルと考えられる。そこで、マーカーフレーム中の鋼球の3次元座標とX線画像に射影された2次元座標の関係から、ピンホールカメラモデルにおける射影行列、カメラパラメータを求める。このパラメータからステレオ視の原理で対象の参照点の3次元座標を算出する。(a)で作成した大腿骨・下腿骨3次元骨モデルを先に述べた射影行列で下肢全長を撮影したX線画像上に投影して、大腿骨、下腿骨(脛骨と腓骨)それぞれの輪郭を重ね合わせる。この方法で立位での大腿骨と下腿骨の正確な3次元位置を測定できる。(図5)

D. 評価パラメータの算出

大腿骨と脛骨の相対位置は、カセット台上に決めたワールド座標系を基準にして、それぞれの骨格上の解剖学的参照点から求めた前述の解剖学的座標系の位置から求める。解剖学的参照点は図6に示すように、

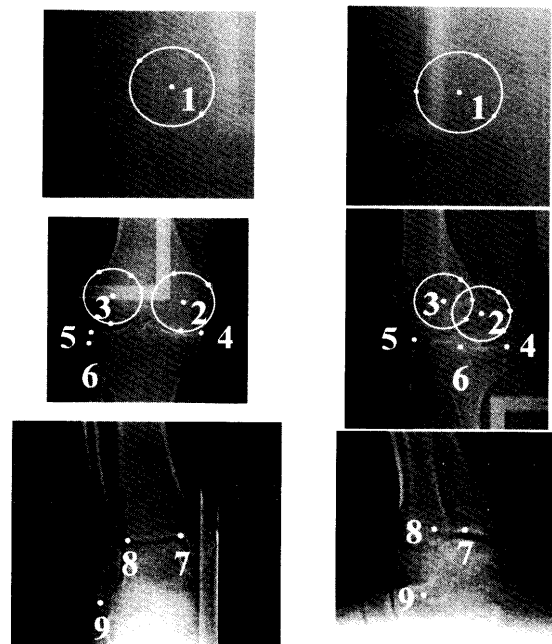
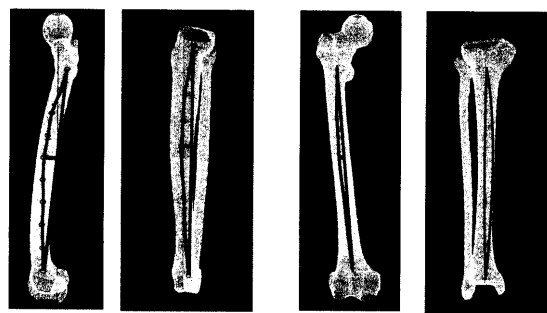


図6 参照点の詳細



側彎度 前彎度

図7 大腿・下腿の前彎度側彎度

X線画像上において、大腿骨骨頭(1)、大腿骨内外側後顆を円で近似した場合のその中心点(2,3)、脛骨近位関節面内外側縁(4,5)、脛骨遠位関節面内外側頂点(7,8)、腓骨最遠近位端頂点(6,9)をオペレータがデジタイズする。さらに、骨幹部を等間隔の線分で区間に分け、骨軸を求めるための骨輪郭点をデジタイズする。算出できる評価パラメータは、大腿骨湾曲度と最大湾曲位置、脛骨湾曲度と最大湾曲位置、大腿脛骨角、膝関節伸展角、下肢荷重線通過位置、関節裂隙角、大腿骨前捻角、膝関節回旋角、脛骨捻れ角である。図7はモデルを用いた評価パラメタ

一の例として大腿・下腿の前彎度側彎度の定義を示す。現在、X線画像に大腿・下腿3次元骨モデルを重ね合わせることで、表面形状を含めたより立体的な下肢アライメント評価システムを開発している。

2. 膝関節運動解析システム³⁾

A. 6自由度電気角度計

これまで、変形性関節症膝、十字靭帯損傷膝などの病態や人工関節全置換術膝における形状や靭帯の有無の影響による運動変化などの把握のため6自由度電気角度計を用いた膝関節運動の測定を行ってきた。6自由度電気角度計は6個の電気角度計（ポテンシオメータ）を立体的にリンクして、回転と並進、それぞれ3つの運動パラメータをリアルタイムで測定できる。両端部には1mmの鋼球を埋めたマーカーが取り付けられており、大腿骨と脛骨との位置関係を把握するために用いる。6自由度電気角度計を図8に示すように膝関節の横にストラップで取り付ける。

れる運動のパラメータ、すなわち、屈伸、内外反、内外旋、内外側、前後、遠近位に変換する。

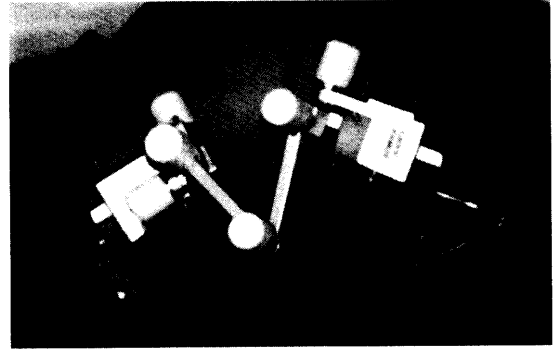


図8 6自由度電気角度計

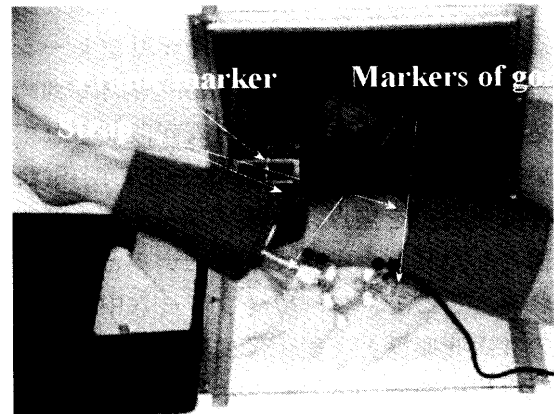


図9 正面側面2方向X線撮影

B. 2方向X線撮影

膝関節の運動は、大腿骨と脛骨の相対運動である。そこで、6自由度電気角度計の両端部の動きを大腿骨と脛骨の相対運動に変換する。

膝関節の横にストラップで取り付けままで、正面と側面のX線撮影を行う。カセットを取り付けるため、図9に示すような直角のカセットフレームを用いる。このカセットフレームには直径1mmの鋼球を埋設したマーカーフレームが取り付けられており、X線源とX線プレート（CR画像）で規定された3次元空間内での参照点の座標が求められるようになっている。このシステムを用いて、6自由度電気角度計の両端部の相対運動を前述した大腿骨と下腿骨に設定した解剖学的座標系を用いて、臨床で用いら

C. 膝関節の運動解析への応用

歩行解析のため、両側の足の踵とつま先に感圧導電ゴムを貼付し、膝関節運動と同時に踵接地とつま先離床の時刻を測定する。図10は健常者10名を対象に、歩行時の膝関節運動の測定結果を膝関節運動のパラメータで示したものである。踵接地から次の踵接地までを1周期として横軸にとり、縦軸にそれぞれの運動パラメータをプロットした。

表1 従来法と本法の回転角の精度（度）

	大腿骨側		脛骨側	
	従来法	本法	従来法	本法
内反	5.7	5.2	6.3	5.1
外反	5.1	5.1	4.0	5.1
内旋	5.9	5.0	5.4	5.4
外旋	3.8	5.1	6.0	5.4

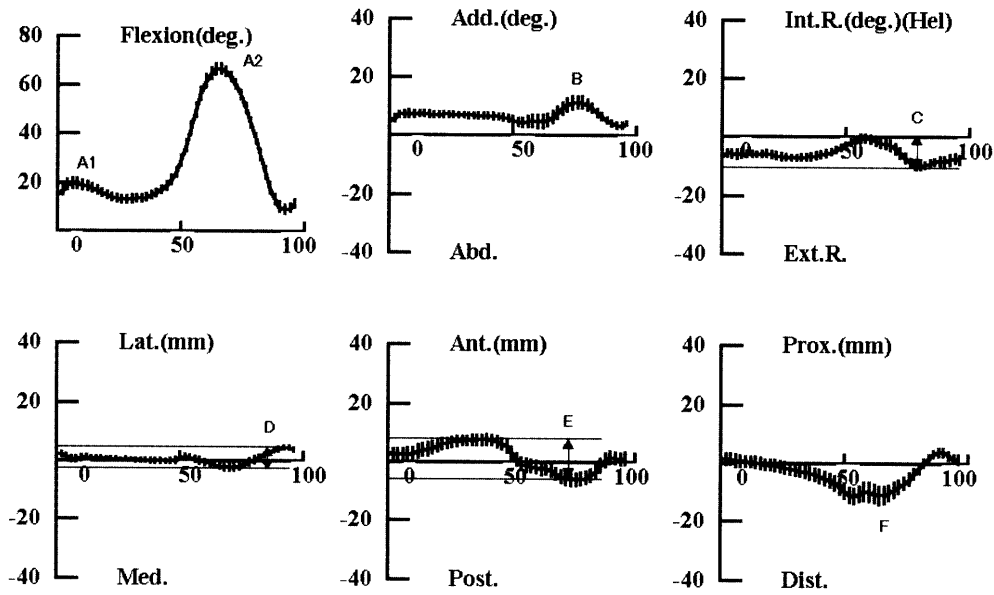


図10 健常者の歩行時の膝関節運動

3. 人工膝関節の設置位置評価^{4) 5)}

人工膝関節の設置位置の評価は、一般に正面と側面像において、コンポーネントの基準軸と大腿骨、脛骨軸骨軸それぞれのなす角度合計4つの角度で検討されている。しかし、前述の下肢アライメント解析システムを応用することで、人工膝関節の設置位置の評価を大腿骨、脛骨それぞれにおいて回転3並進3計6個のパラメータを用いて行うことができる。前述の通りCTから骨モデルを作成し、解剖学的座標系を設定する。次に、人工関節のモデルを作成し、

カメラ校正法で求めた射影行列を用いて、2方向のX線画像に投影する。人工関節モデルの位置と姿勢を変化させながら、設置位置を測定する。図11に人工関節モデルの重ね合わせた結果を示す。画像中の点が人工関節3次元モデルの表面点群の投影である。表1は、このシステムでコンポーネントを内外旋、内外反それぞれ5度回転させて目標値とした場合の測定結果を従来法と人工関節モデルの重ね合わせ法で比較したものである。



(a)大腿骨側

(b)脛骨側

図11 コンポーネントモデル重ね合わせによる位置決め

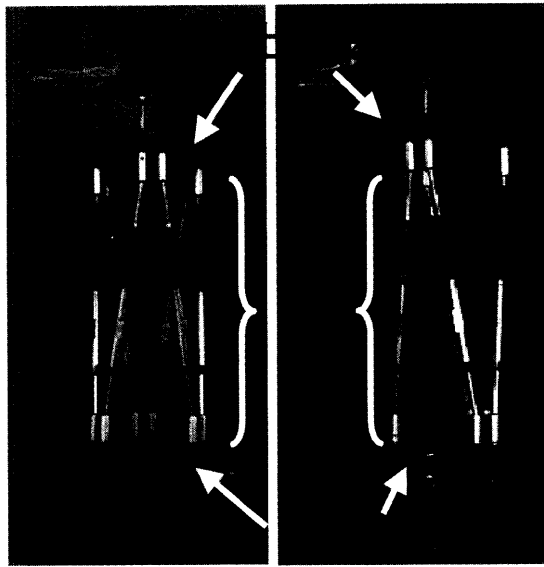


図12 位置決め装置

4. 人工膝関節設置法（大腿骨側）の開発⁶⁾

下肢アライメントシステムと図12に示すような骨切り装置を用いた人工膝関節設置法について述べる。人工関節の設置は以下の手順で行う。①術前計画（図13）②術中の位置関係の把握（図14）③骨切り（図15）④術後評価（図16）である。図17はモデル大腿骨3体に対する実験手術における本法の術前計画と術後評価の差から精度を示している。位置精度は内外側方向で平均1.4mm、最大1.5mmで、前後方向では平均1.2mm、最大1.4mmで、遠近位方向では平均0.5mm、最大0.8mmであった。また、姿勢精度は前後傾斜角で平均0.6度、最大1.2度で、内外反角では平均0.7度、最大1.0度で、回旋角では平均0.9度、最大で1.2度であった。

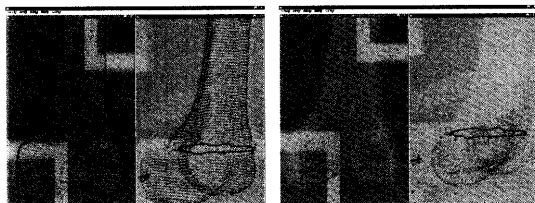


図13 手順1：術前計画

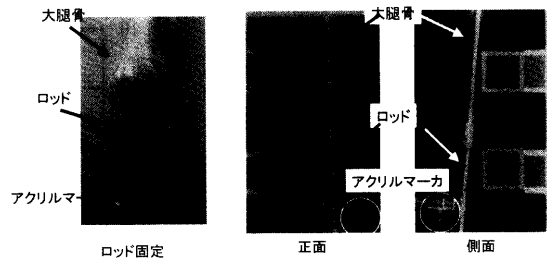


図14 手順2：術中の位置位置関係の把握

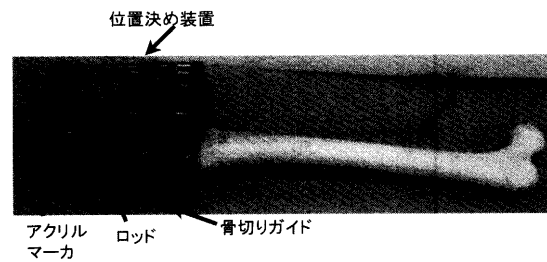


図15 手順3：骨切り

考 察

下肢のアライメント評価は、これまで正面X線像を用いた平面的な評価がほとんどであった。X線画像を用いた解析の場合、影を用いた形状評価であるため、2方向画像を用いたとしても完全な立体としての評価は困難である。しかし、CTなどの3次元表面形状データを用いることで、形状を補うことができるため、評価のパラメータも3次的に定義できる。しかし、X線被爆量や費用など様々な負担を考慮するとCTの撮影を日常的に行うことは困難である。したがって、著者は、一度得られたCT情報で骨格モデルを作成し、2方向X線撮影でアライメントや骨形状の変化をとらえるシステムを考えている。下肢のアライメント評価において膝関節に対する荷重状態、すなわち立位での評価は重要と考える。さらに、アライメントと関節運動の関連性を考えるうえでは、基準となる座標系を一致させると便利である。そこで、大腿骨と脛骨に設定した解剖学的座標系を基準にして、アライメント解析と運動解析の時の基準を統一して扱えるようにしている。このこと

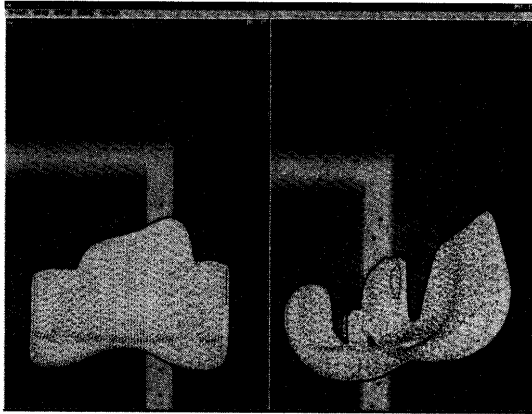


図16 手順4：術後評価

で、人工関節置換術の術前術後の関節運動の比較なども行えるようになると思う。6自由度電気角度計を用いた膝関節運動測定は、簡単にまた実時間的に関節運動をとらえることができるため、下肢アライメントの結果を組み合わせることで、たとえば、人工関節の最適な設置位置の術前計画を下肢のアライメントのみでなく、術後の関節運動を予測して行うなどの展開が考えられる。これを行うために、上述した骨格モデルを発展させ、関節運動を規定している形状、靭帯や筋肉、外力など様々な関連性を明確にしなければならない。また、人工膝関節設置法は基本的にはコンピュータ支援手術の一例であり、術中の骨切り装置の位置把握の時間短縮などが必要である。

まとめ

下肢アライメント評価システム、膝関節運動測定システムとそれら応用して人工膝関節の設置評価や、人工膝関節設置法の開発について紹介し、今後の課題について述べた。

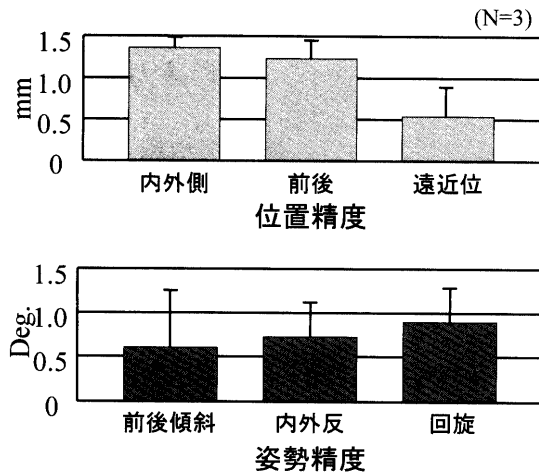


図17 位置・姿勢精度

引用文献

- 1) 長崎浩爾, 古賀良生, 高木 孝ら: 変形性膝関節症の3次元下肢アライメント解析. 日本臨床バイオメカニクス学会誌. Vol. 20: 447-458. 1999.
- 2) 寺島和浩, 長崎浩爾, 古賀良生ら: 3次元的下肢アライメント評価-CT情報の導入による大腿骨の解剖学的座標系の決定-. 日本臨床バイオメカニクス学会誌. Vol. 21: 497-502. 2000.
- 3) 寺島和浩, 原 利昭, 古賀良生ら: C Rシステムを用いた膝運動三次元解析システムの開発>整形外科バイオメカニクス. Vol. 13: 213-217. 1992.
- 4) 前田貴史, 寺島和浩, 松枝宗則人ら: 人工膝関節の設置位置評価. 日本臨床バイオメカニクス学会誌. Vol. 21: 229-234. 2000.
- 5) 前田貴史, 寺島和浩, 大森豪ら: コンポーネントモデルを用いた人工膝関節の設置位置評価. 日本臨床バイオメカニクス学会誌. Vol. 22: 409-414. 2001.
- 6) 木村修司, 寺島和浩, 大森豪ら: 開発した大腿骨側人工膝関節骨切り管理装置の精度についての検討. 日本臨床バイオメカニクス学会誌. Vol. 22: 313-317. 2001.