

厚生労働科学研究費補助金

障害者対策総合研究事業(身体・知的等障害分野)

体幹保持機能障害のある身体障害者に対して生体内3次元解析システムを用いた脊椎骨構築
および動態情報フィードバック型革新的体幹保持デバイスの開発に関する研究

平成 22 年度 ～ 24 年度 総合研究報告書

研究代表者 菅本 一臣

平成 25 (2013) 年 5 月

目 次

I. 総合研究報告

体幹保持機能障害のある身体障害者に対して生体内3次元解析システムを用いた脊椎骨構築および動態情報フィードバック型革新的体幹保持デバイスの開発に関する研究 菅本 一臣	3
脳性麻痺側彎症における体幹保持破綻に伴う脊椎変形の生体内3次元解析に関する研究 梶浦 一郎	5
X線透視画像を用いた骨関節3次元動態計測・解析の自動化に関する研究 医用画像に基づく3次元動態計測 山崎 隆治	7
II. 研究成果の刊行に関する一覧表	10
III. 研究成果の刊行物・別刷	11

総合研究報告書

体幹保持機能障害のある身体障害者に対して生体内3次元解析システムを用いた脊椎骨構築
および動態情報フィードバック型革新的体幹保持デバイスの開発に関する研究

研究代表者 菅本 一臣 大阪大学大学院医学系研究科寄附講座教授

研究要旨 身体障害者における体幹保持破綻に伴う脊椎変形に対して我々の施設で開発したコンピュータソフトを用いた評価システムを用いて、側弯における脊椎変形の3次元変形評価を正確でかつ詳細に行うことを目的とし、それを行った。

梶浦一郎・社会福祉法人 愛徳福祉会 南大阪療育園 理事長
山崎隆治・大阪大学臨床医工学融合研究教育センター 特任准教授

A. 研究目的

側弯症は一般に単一平面内での2次元変形ではなく、回旋を伴い複雑な変形をきたす3次元変形である。これまで側弯症の回旋変形に対し、レントゲン撮影を用いた2次元評価法が提唱されてきたが[Nash CL 1969]、レントゲン写真などを用いた2次元評価では、回旋や前後弯が強い場合に正確な評価が困難となり、このような2次元評価には限界が生じる。このため側弯症の回旋変形の正確な評価には3次元評価が必要となるが、これまで手法の限界からほとんどなされていない。脳性麻痺に伴う側弯症においても、脊柱変形のパターンを3次元的に検討した報告はこれまでほばない。(H22年度)

身体障害者に生じる体幹保持機能低下によって発症する側弯に対してポリカーボネイト製のカスタム体幹装具を作成する。その前後で脊椎変形の3次元変形評価を行い、最適の装具の作成を目指す。

(H23, 24年度)

B. 研究方法

骨関節の構築および動態を3次元的に解析できる様々なシステムを開発してきたという実績があるが、それを用いることにより骨の重心、長軸、短軸、骨構築状態の評価、移動距離など考えられうる限りの様々なパラメーターを算出することで骨関節形態を評価することができる。今回脊椎側弯を有する身体障害者に対してCTにて頸椎より骨盤にかけて

撮影を行い、脊椎骨構築異常の正確で詳細な3次元変形評価を行うことであった。(H22年度)

骨関節の構築を3次元的に解析できるシステムを開発してきたが、それを用いることにより骨関節形態を3次元的に評価することができる。今回脊椎側弯を有する身体障害者に対してポリカーボネイト製カスタム装具装着の前後でCTにて頸椎より骨盤にかけて撮影を行い、その矯正率を算出し、最適な装具開発を目指す。(H23, 24年度)

(倫理面への配慮)

CTでは被爆量を通常の1/10以下でも可能であり、全脊椎を撮影しても5mSv程度である。またそれは大学の倫理委員会にてすでに承認済みである。ただし被爆はゼロではなく、治療効果を正確に判定する目的があるとはいえ被験者に危険を及ぼす可能性があるために、インフォームドコンセントを得る必要がある。リスクなどを口頭で説明し同意書に署名された場合のみ解析を行う。同意が得られなかった場合にはCT撮影は行わない。また得られたデータは個人情報として扱われるべきものであるため、そのデータ管理にはセキュリティーを十分考量する。(H22年度)

本研究は大学の倫理委員会にてすでに承認済みである。ただし被爆はゼロではなく、治療効果を正確に判定する目的があるとはいえ被験者に危険を及ぼす可能性があるために、インフォームドコンセントを得る必要がある。また得られたデータは個人情報として扱われるべきものであるため、そのデータ管理にはセキュリティーを十分考量する。(H23, 24年度)

C. 研究結果

脳性麻痺側彎症 8 例, 特発性側彎症 8 例を対象とした。これを撮影したものを共同研究者の梶浦らに解析を行わせた。(H22 年度)

脳性麻痺側彎症 8 例, 特発性側彎症 8 例を対象とした。これを撮影したものを共同研究者の梶浦らに解析を行わせた。その結果、Cobb 角度で 38 度から 22 度へ約 40%の改善率がみられた。(H23 年度)

脳性麻痺側彎症 25 例, 特発性側彎症 8 例を対象とした。これを撮影したものを共同研究者の梶浦らに解析を行わせた。その結果、Cobb 角度で 38 度から 22 度へ約 40%の改善率がみられた。(H24 年度)

D. 考察

これまで考えられてきた以上に側弯における脊椎変形は平面的なものではなく、3次元的な変形が大きいことが明らかとなった。それをもとに最適のデバイスを作成する意義が改めて認識でき、最適の装具を提供できる可能性が示唆された。

E. 結論

本研究では、側弯における脊柱変形の 3 次元評価を詳細に行い、従来の 2 次元評価指標との関係性を調べ 3 次元形態学的について明らかにした。側弯においては、特に回旋変形の生体内評価は本研究のような手法を用いなければ詳細な脊柱回旋変形の評価は、不可能であると考えられる。(H22 年度)

側弯における脊柱変形を 3 次元形態学的について明らかにした。特に回旋変形の評価はこれによって評価が可能であり、提案のポリカーボネイト製デバイスで 40%の改善が得られていることが明らかとなった。(H23, H24 年度)

F. 健康危険情報

CT では被爆量を通常の 1/10 以下でも可能であり、全脊椎を撮影しても 5 mSv 程度である。またそれは大学の倫理委員会にてすでに承認済みである。ただし被爆はゼロではなく、治療効果を正確に判定する目的があるとはいえ被験者に危険を及ぼす可能性があるために、インフォームドコンセントを得る必要がある。

G. 研究発表

1. 論文発表

・ In vivo Three-dimensional kinematics of the cervical spine during head rotation in patients with cervical spondylosis. Spine 36:778-83, 2011

・ In vivo three-dimensional segmental analysis of adolescent idiopathic scoliosis. Hattori T, Sakaura H, Iwasaki M, Nagamoto Y, Yoshikawa H, Sugamoto K. Eur Spine J. 2011 Oct;20(10):1745-50. Epub 2011 Jun 18.

・ Three-dimensional motion of the uncovertebral joint during head rotation. Nagamoto Y, Ishii T, Iwasaki M, Sakaura H, Moritomo H, Fujimori T, Kashii M, Murase T, Yoshikawa H, Sugamoto K. J Neurosurg Spine 2012 Oct;17(4):327-33.

・ Kinematics of the thoracic spine in trunk rotation: in vivo 3-dimensional analysis. Fujimori T, Iwasaki M, Nagamoto Y, Ishii T, Kashii M, Murase T, Sugimura T, Matsuo Y, Sugamoto K, Yoshikawa H. Spine (Phila Pa 1976). 2012 Oct 1;37(21):E1318-28

・ Three-dimensional measurement of intervertebral range of motion in ossification of the posterior longitudinal ligament: are there mobile segments in the continuous type? Fujimori T, Iwasaki M, Nagamoto Y, Kashii M, Ishii T, Sakaura H, Sugamoto K, Yoshikawa H. J Neurosurg Spine. 2012 Jul;17(1):74-81.

2. 学会発表

・ 脳性麻痺に伴う側弯変形の新しい装具療法
日本リハビリテーション医学会 2010年 鹿児島
・ 56th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society Mar. New Orleans.

In vivo three-dimensional kinematics of the cervical spine during head rotation in patients with degenerative cervical spine

Nagamoto Y, Ishii T, Sakaura H, Iwasaki M, Moritomo H, Kashii M, Sugamoto K, Yoshikawa H.

・ Cervical Spine Research Society Asia Pacific region Apr. Japan Three-Dimensional Measurement of Intervertebral Range of Motion in Ossification of the Posterior Longitudinal Ligament Fujimori T, Iwasaki M, Nagamoto Y, Kashii M, Ishii T, Sakaura H, Sugamoto K, Yoshikawa H

・ American Society of Biomechanics Aug. Florida In vivo three-dimensional analysis of the thoracic spine in trunk rotation Fujimori T Iwasaki M Nagamoto Y, Ishii T, Kashii M, Murase T, Sugamoto K, Yoshikawa H

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

特願2007-328479

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

研究報告書

脳性麻痺側彎症における体幹保持破綻に伴う脊椎変形の生体内 3 次元解析に関する研究

研究分担者 梶浦 一郎 社会福祉法人大阪発達総合療育センター南大阪療育園理事長

研究要旨 肢体不自由児に代表されるような身体障害者において、体幹保持機能は ADL 上最も重要な機能のひとつである。本研究では体幹保持機能障害を有する身体障害者に対して革新的体幹保持デバイスの開発し、ADL を向上と続発する側弯などの不可逆的な脊椎変形を予防することを目的とする。また我々が開発してきた独自のシステムにより X 線イメージ装置と CT 装置を組み合わせることで骨関節形態および動態を 3 次元的に解析し、身体特性データをフィードバックしながらデバイスを最適化する。

A. 研究目的

側彎症は一般に単一平面内での 2 次元変形ではなく、回旋を伴い複雑な変形をきたす 3 次元変形である。これまで側弯症の回旋変形に対し、レントゲン撮影を用いた 2 次元評価法が提唱されてきたが [Nash CL 1969], レントゲン写真などを用いた 2 次元評価では、回旋や前後弯が強い場合に正確な評価が困難となり、このような 2 次元評価には限界が生じる。このため側彎症の回旋変形の正確な評価には 3 次元評価が必要となるが、これまで手法の限界からほとんどなされていない。脳性麻痺に伴う側彎症においても、脊柱変形のパターンを 3 次元的に検討した報告はこれまでにほぼない。(H22 年度)

身体障害者の ADL 上重要な体幹保持機能障害に対して、独自の 3 次元的解析を用いて骨関節形態および動態をフィードバックした革新的体幹保持デバイスを開発および最適化し、続発する側弯などの不可逆的な脊椎変形を予防する。(H23, H24 年度)

B. 研究方法

骨関節の構築および動態を 3 次元的に解析できる様々なシステムを開発してきたという実績があるが、それを用いることにより骨の重心、長軸、短軸、骨構築状態の評価、移動距離など考えられる限りの様々なパラメーターを算出することで骨関節形態を評価することができる。今回脊椎側弯を有する身体障害者に対して CT にて頸椎より骨盤にかけて撮影を行い、脊椎骨構築異常の正確で詳細な 3 次元変形評価を行うことであった。(H22 年度)

対象は側弯を有する脳性麻痺患者 30 名(男性 16 名、女性 14 名)。平均年齢は 14.5 才。全脊椎 2 方向 X 線検査によりデバイス装着前後の側弯変形を評価した。デバイスによる ADL 変化については介護者アンケートを使用した。(H23 年度)

対象は側弯を有する脳性麻痺患者 150 名(男性 85 名、女性 65 名)。平均年齢は 14.7 才。全脊椎 2 方向 X 線検査および CT によりデバイス装着前後の側弯変形を評価した。デバイスによる ADL 変化について介護者アンケートを使用した。(H24 年度)

(倫理面への配慮) CT は被爆量を通常の 1/10 以下、全脊椎撮影で 5 mSv 程度である。またそれは大学の倫理委員会にてすでに承認済みである。撮影では被験者に危険を及ぼす可能性があるために、インフォームドコンセントを得る必要がある。リスクなどを口頭で説明し同意書に署名された場合のみ解析を行う。同意が得られなかった場合には CT 撮影は行わない。また得られたデータは個人情報として管理にはセキュリティを十分考慮する。

C. 研究結果

脳性麻痺側彎症 8 例を対象とした。

・側弯カーブは終椎付近で椎間の回旋変形が最も強く、頂椎付近で椎間の楔状変形が最も強い傾向であった。

・従来の報告同様 Cobb 角と椎間の回旋、楔状変形はいずれも強い相関を示した(回旋： $r=0.83$, 楔状変形： $r=0.90$)。

・Cobb 角あたりの椎間回旋角度、椎間傾斜角度はいずれも特発性側弯症に比べて大きくなる傾向が認められ、すなわち見かけの同じ Cobb 角に対する実際の椎間回旋、椎間楔状変形は、本症側弯症において特発性側弯症よりも大きくなっていった（回旋： $p=0.09$ ，楔状変形： $p<0.05$ ）。

・側弯形成への椎間および椎体の寄与率について考察し、両群とも椎体の寄与が大きかったが（CP： $p<0.05$ ，AIS： $p=0.09$ ），2群間で有意差は認められなかった。

・最小椎弓根面積の左右比を求め、左右の非対称性は本症側弯症に比べ特発性側弯症で有意に強く認められた（ $p<0.01$ ）。（H22年度）

Cobb 角はデバイス非着用時に平均 66.4 度、着用時に平均 52.8 度であり、デバイスによる側弯矯正は平均 13.6 度となった。介護者アンケートでは、84%の患者において座位機能の安定、92%で上肢機能の改善が報告された。（H23年度）

デバイスによる側弯矯正は平均 17.9 度、装着時間は 8.1 時間、治療中止は 7 例であった。CT 解析では Harrington Factor が低い（緩やかな）側弯変形ほど良好な矯正を得た。頂椎レベルと支柱形状は装着コンプライアンスに相関した。座位機能の安定、上肢機能の改善について再現性を認めた。（H24年度）

D. 考察

これまで考えられてきた以上に脳性麻痺側弯症における脊椎変形は平面的なものではなく、3次元的な変形が大きいことが明らかとなった。それをもとに最適のデバイスを作成する意義が改めて認識できた。（H22年度）

装着感の良い持続可能な当該デバイスで十分な側弯変形の矯正が可能であった。座位の安定など ADL の改善を認めた。今後はこれら所見と CT 検査を基に 3次元解析を進めて身体特性のフィードバックによるデバイスの最適化を進める。（H23年度）

側弯変形の形状に応じた支柱形状の決定により CP 患者の身体特性が反映され、高い矯正力と良好なコンプライアンスのデバイスが作成可能であった。継続的な装着により ADL の改善を認めた。（H24年度）

E. 結論

本研究では、脳性麻痺側弯における脊柱変形の 3次元評価を詳細に行い、従来の 2次元評価指標との関係性を調べ 3次元形態学的について明らかにした。

脳性麻痺側弯においては、特に回旋変形の生体内評価は本研究のような手法を用いなければ詳細な脊柱回旋変形の評価は、不可能であると考えられる。（H22年度）

当該デバイスは脳性麻痺などによる身体障害者において良好なコンプライアンスで導入可能であった。

CT 検査による 3次元解析と並行して行う臨床経過および ADL に関する評価方法が確立した。（H23年度）

当該デバイスの最適化により、側弯変形の矯正と ADL の改善を認め、高いコンプライアンスを示した。

CT による 3次元解析は身体特性フィードバックとデバイスの最適化に極めて有用であった。（H24年度）

G. 研究発表

1. 論文発表

幼発期発症の側弯変形に対する DSB（愛称プレーリーくん）による治療の試み（第一報）. 近畿小児整形. 2011；24：1-4

2. 学会発表

・脳性麻痺に伴う側弯変形の新しい装具療法
日本リハビリテーション医学会 2010年 鹿児島
・Rett 症候群に伴う側弯変形に対する装具(DSB)治療経過 第45回日本側弯症学会年次総会 2011年10月
・乳幼児期発症の側弯症に対する新しい装具治療の試み 第23回小児整形外科学会 2012年11月
・A novel spinal brace in management of scoliosis due to cerebral palsy. 国際整形外科学会(SICOT) 2012年11月
・Rett 症候群に伴う側弯変形に対する装具(DSB)治療経過 第46回日本側弯症学会年次総会 2012年10月
・Management of scoliosis due to Rett syndrome with the novel spinal brace. ヨーロッパ神経学会(EFNS) 2012年9月

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

平成 23 年 5 月 「動的脊椎装具・プレーリーくん」
特許取得 特許番号 4747327

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

X線透視画像を用いた骨関節3次元動態計測・解析の自動化に関する研究

研究分担者 山崎 隆治 大阪大学臨床医工学融合研究教育センター・特任准教授

研究要旨 平成 22, 23 年度では、まず医用画像を用いた腰椎に特化した新しい3次元動態計測手法を開発し、変形腰椎を想定した検証実験を実施、最終的に各種椎骨（頸椎など）を含めた全椎骨の動態機能評価が可能な計測システムに拡張した。本研究（平成 24 年度）では、対象モデル（各種椎骨）の増加に伴う、計測・解析の多大な労力を軽減し、円滑に3次元動態計測・解析が可能なシステムの開発を試みた。本研究により、脊椎のような多数の骨で構成されるモデルにおいても、自動的に動態情報を計測・解析し、個々の症例に対応した動態情報フィードバック型の新しい体幹保持デバイスをスムーズに開発できる可能性が開けた。

A. 研究目的

我々はこれまでに、X線イメージ装置やCTまたはMRI装置を組み合わせることで骨関節の構築および動態を3次元的に解析できる様々なシステムを開発し、脊椎骨についても生体内評価を可能にしてきた。一方で、“正確な動態情報”をフィードバックさせた新しい体幹保持デバイスを開発する点において、脊椎骨に特化した新たな3次元動態計測法の開発および改良が必要となり、本研究では、正常脊椎における高精度3次元動態計測法と変形脊椎計測への応用が目的となる。（H22年度）

これまでに、脊椎骨に特化した新しい3次元動態計測手法の開発を行い、特に腰椎に対して正常および変形の動き模擬した検証実験、および動態計測・解析を実施してきた。本研究では、これまでの計測手法をさらに拡張し、頸椎を対象とした3次元動態計測・解析を実現する。これにより、脊椎を構成する全ての椎骨の動態情報をフィードバックさせる新しい体幹保持デバイスの開発の可能性が開ける。（H23年度）

これまでの研究では、まずX線透視画像をベースとした腰椎に特化した新しい3次元動態計測手法を開発し、変形腰椎を想定した検証実験を実施、最終的に各種椎骨（頸椎など）を含めた全椎骨の動態機能評価が可能な計測システムを開発してきた。

一方で、この計測システムでは、脊椎のような多数の骨で構成されるモデルを対象とした場合、種々の画像処理・画像解析過程で膨大なマニュアル作業が必要となり、円滑な3次元動態計測・解析を行う上で大きな障害となっていた。そこで本研究では、自動解析の妨げとなっていた画像の位置合わせ（レジストレーション）の際の対象モデルの初期点（適切な位置と姿勢の付与）の問題に着目し、3次元的な位置・姿勢が全てのX線フレームにわたって自動的に、かつ安定に推定可能なシステムの開発を試みた。（H24年度）

B. 研究方法

まず、正常ボランティア1名を対象に、脊椎（主に胸・腰椎～骨盤）のCTを撮影し、各々の3次元骨モデル作成する。次に、動画対応型フラットパネルディテクタ装置（従来のX線イメージと異なり検出器が平面でかつ高解像度が得られる装置）を用い、変形脊椎の動きを模擬するために、乗馬型機器に被検者が騎乗し乗馬運動させた状態で脊椎を正面と側面から撮影する。最後に、各々正・側面の2次元動態画像から、2次元/3次元画像位置合わせ技術（画像認識技術）を用いて、全ての脊椎骨モデルの位置と姿勢を推定し、3次元的な動態を計測・解析する。

実験として、1. 乗馬運動中の脊椎の3次元動態の可視化および観察、2. 第12胸椎～第1仙椎の

棘突起の動きの解析， 3. 回転パラメータ（側屈運動，前後運動，回旋運動）の解析，を実施した。（H22年度）

頸椎（第1頸椎（C1）～第7頸椎（C7））の3次元骨形状モデルは，CT装置を用いて取得・作成する。実際の頸椎の動きは，動画対応型フラットパネルディテクタ装置を用いて撮影し，高鮮鋭・高解像度のデジタルデータを取得する。これらの画像データから，2次元/3次元画像位置合わせ技術（画像認識技術）を用いて，全ての頸椎骨モデルの位置と姿勢を推定し，3次元的な動態を計測・解析する。今回拡張した手法には，医用画像に特有のノイズが発生した状態でも，安定した位置・姿勢推定が可能となるようロバスト統計学に基づいたアルゴリズムを導入している。

実験は，健常ボランティア9名に対して，X線透視下における側方向からの前屈・後屈運動（最大屈曲から最大伸展までの運動）と左右回旋運動（最大左回旋から最大右回旋までの運動）を実施した。また同様にして，X線透視下における前後方向からの左右回旋運動（開口位）と側屈運動を実施した。評価項目としては，C1-C2，C2-C3，C3-C4，C4-C5，C5-C6，C6-C7間の動きを対象とした。（H23年度）

これまでの手法では，X線画像上の輪郭情報に起因する投影線とモデル表面上との距離値を評価関数とした，2次元/3次元画像位置合わせ技術（画像認識技術）を用いてきた。提案手法では，これまで動態解析を行った症例により作成される対象モデルの統計動態モデルを評価値として導入することにより，自動かつ安定した位置・姿勢推定を試みた。

実画像を用いた実験として，これまで人工膝関節を対象として動態解析データが多数蓄積されていることから（脊椎の解析データは，対象モデル数が多く膨大な時間がかかり，多数のデータが得られていないため），人工膝関節の統計動態モデルを作成，評価関数に導入し，提案手法による計測システムの性能評価を行った。このとき統計動態モデルとしては，対象モデル間の相対的な動態モデル（平均と分散）

を利用した。（H24年度）

（倫理面への配慮）

新しい計測手法を用いた実験を行うにあたり，本研究機関における倫理委員会の承認を得，また被検者には検査目的の十分な説明を行って同意を得た。（H22年度）

今回拡張した計測手法を用いて，X線撮影実験を行うにあたり，本研究機関における倫理委員会の承認を得，また被検者には検査目的の十分な説明を行って同意を得た。（H23年度）

C. 研究成果

実験1では，全ての画像において，各脊椎モデルの安定かつ高精度な位置・姿勢推定結果が得られた（検者間誤差で1mm， 1° ～最大2mm， 2° 程度），スムーズな3次元動態の可視化結果が得られた。実験2では，棘突起の動き追跡・解析することにより，乗馬型機器運動に依存した脊椎の動きが反映された。実験3では，各回転パラメータの計測が，乗馬型機器運動（ここでは変形脊椎の動きを模擬していると仮定）を定量表現するのに改めて重要であることが分かった。（H22年度）

現在，一部（3名）の解析結果が得られているので報告する。頸部最大回旋時におけるC1-C2間の回旋角度は，同方向に平均 $37.3 \pm 0.3^{\circ}$ 回旋することが認められ，回旋の大部分はC1-C2間で行われることが確認された。また，最大回旋時の側屈カップリング運動は，C2-C3，C3-C4，C4-C5，C5-C6，C6-C7間では同方向に側屈するのに対し，C1-C2間では反対方向に側屈（平均 $3.4 \pm 1.4^{\circ}$ ）することが確認された。（H23年度）

実際の人工膝関節屈曲動作におけるX線透視画像20症例を用いて，大腿骨・脛骨間の相対動作モデルをLeave-one-out法で作成し，実験を行った。

提案手法により，初期フレームを除き，全自動で（途中で破綻することなく）人工膝関節の位置・姿勢推定が可能なが確認できた。また，その際の正解位置との距離誤差と角度誤差を算出した結果， $0.63\text{mm}/1.46^{\circ}$ であった。（H24年度）

D. 考察

本研究における脊椎骨を対象とした3次元動態解析計測法は、安定かつ高精度な方法であり、変形脊椎の動きを模擬した実験結果からも、臨床応用において相当の評価が可能であると考えられる。(H22年度)

本研究における頸椎を対象とした3次元動態解析計測手法は、安定かつ高精度な方法であり、これにより全椎骨の動態機能評価が可能であると考えられる。(H23年度)

本研究における人工膝関節を対象とした3次元動態計測手法は、必要最小限のマニュアル作業で高精度な位置・姿勢推定結果が得られ、かつ安定であったことから、動態解析の自動化に有効であることが確認された。(H24年度)

E. 結論

2次元/3次元画像位置合わせ技術を用いた正確な脊椎運動を3次元的に初めて明らかにし、その有効性が確認された。これにより骨形態だけでなく、“正確な動態情報”をフィードバックさせた新しい体幹保持デバイスの開発を促進させる可能性がある。(H22年度)

本研究により、全椎骨の動態情報をフィードバックさせる新しい体幹保持デバイスの開発を促進させる可能性があることが示唆された。(H23年度)

本研究の成果により、脊椎のような多数の骨で構成されるモデルに応用した場合も、自動的に動態情報を計測・解析し、個々の症例に対応した動態情報フィードバック型の新しい体幹保持デバイスをスムーズに開発できる可能性が開けた。(H24年度)

G. 研究発表

1. 論文発表

- ・ Three-dimensional kinematic estimation of mobile-bearing total knee arthroplasty from x-ray fluoroscopic images, Proceedings of SPIE Medical Imaging, Vol.7962 B1-7, 2011
- ・ 3D Spine Kinematics on Riding Fitness Machines Using 2D/3D Image Registration, IFMBE Proceedings,

・ 3D Spine Kinematics on Riding Fitness Machines Using 2D/3D Image Registration, IFMBE Proceedings, Vol.39, pp.222-225, 2012

2. 学会発表

・ Three-dimensional determination of mobile-bearing total knee arthroplasty kinematics using X-ray fluoroscopy, Int J CARS Vol.5 Supple.1, 2010, Switzerland

・ A 3D spine kinematic measurement method on riding fitness machines using 2D/3D image registration, 日本生体医工学会 Vol. 49 Supple. 1, 2011年, 東京

・ In vivo three-dimensional determination of normal knee kinematics from dynamic flat-panel detector images, The 11th CAOS-International, 2011, London

・ Robust 3D Kinematic Estimation of Total Knee Arthroplasty From X-Ray Fluoroscopic Images, The 24th ISTA, 2011, Belgium

・ 脊椎外科領域における3次元画像解析の臨床応用, 第24回バイオエンジニアリング講演会, 2012年, 大阪

・ Initial pose estimation for automated 3D kinematic analysis of total knee arthroplasty using X-ray fluoroscopic images, The 25th Annual Congress of the International Society for Technology in Arthroplasty, 2012, Sydney

・ 医用画像に基づく骨関節3次元動態計測技術と臨床展開, 電子情報通信学会医用画像研究会, 2012年, 山口

H. 知的財産権の出願・登録状況

なし

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年	ページ
菅本一臣、山崎隆治	臨床医工学スキルアップ講座	倉智嘉久	臨床医工学・情報学スキルアップシリーズ	大阪大学出版会	大阪	2010	312

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
長本行隆、菅本一臣	In vivo Three-dimensional kinematics of the cervical spine during head rotation in patients with cervical spondylosis	Spine	36	778-83	2011
Hattori T, Sakaura H, Iwasaki M, Nagamoto Y, Yoshikawa H, Sugamoto K	In vivo three-dimensional segmental analysis of adolescent idiopathic scoliosis.	Eur Spine J.	20(10)	1745-50	2011
T. Yamazaki, et.al	Three-dimensional kinematic estimation of mobile-bearing total knee arthroplasty from x-ray fluoroscopic images	Proceedings of SPIE Medical Imaging	7962	B1-B7	2011
T. Yamazaki, et.al	3D Spine Kinematics on Riding Fitness Machines Using 2D/3D Image Registration	IFMBE Proceedings	39	222-225	2012
梶浦一郎、森口悠	幼児期発症の側彎変形に対するDSB（愛称プレーリーくん）による治療の試み（第一報）	近畿小児整形外科	24	29-32	2011
Nagamoto Y, Ishii T, Iwasaki M, Sakaura H, Moritomo H, Fujimori T, Kashii M, Murase T, Yoshikawa H, Sugamoto K	Three-dimensional motion of the uncovertebral joint during head rotation.	J Neurosurg Spine	7(4)	327-33	2012
Fujimori T, Iwasaki M, Nagamoto Y, Ishii T, Kashii M, Murase T, Sugiura T, Matsuo Y, Sugamoto K, Yoshikawa H.	Kinematics of the thoracic spine in trunk rotation: in vivo 3-dimensional analysis.	Spine (Phila Pa 1976)	37(21)	E1318-28	2012
Fujimori T, Iwasaki M, Nagamoto Y, Kashii M, Ishii T, Sakaura H, Sugamoto K, Yoshikawa H	Three-dimensional measurement of intervertebral range of motion in ossification of the posterior longitudinal ligament: are there mobile segments in the continuous type?	J Neurosurg Spine	17(1)	74-81	2012

2.3 医用画像による骨関節形態 および動態解析・予測

大阪大学大学院医学系研究科運動器バイオマテリアル学
大阪大学臨床医工学融合研究教育センター

菅本 一 臣
山崎 隆 治

● 1 ● はじめに ● ● ●

関節外科領域において、変形性関節症や関節リウマチなどの関節破壊を伴う慢性疾患は、高齢化社会に伴い、その患者数もますます増加し、新しい治療法の開発が社会的にも早急に求められている。形態・機能障害を受けた関節の機能再建には、人工関節置換術が現在最も有力な治療法であり効果的である。人工関節は近位・遠位骨に固定される金属コンポーネントと、摺動緩衝の役割を果たすポリエチレンインサートによって構成されており、部分的に解剖学的なデザインと工学的なデザインが取り入れられている。これらの工学的デザインには長期にわたる耐久性とさまざまな生体運動の制動性（拘束と許容）が要求される。一方、手術後の人工関節において、関節可動域の制限や不安定な動き、ポリエチレンインサートの磨耗や、術後疼痛などの障害が報告されている。それらは、一般に人工関節のデザインや手術操作に依存するところが大きく、人工関節の動態と密接にかかわっている。

このことから、術後人工関節の正確な動態を計測・解析することはきわめて重要課題となっており、精密かつ詳細な解析は、ヒトの機能的な特徴を考慮した人工関節の開発や新しい治療法（手術手技）を確立するために必須となっている。また、人工関節に置換されていない骨関節の詳細な運動機能評価を行うことは、人工関節との機能比較のみならず、骨関節機能病態の解析、診断支援、整形外科手術支援などさまざまな方面で応用が期待されている。

本章では、先進医用画像処理技術を用いた骨関節動態計測・解析法と、人工関節を含む各種骨関節の最新の解析データを中心にその臨床的意義について述べる。

● 2 ● 医用画像を用いた骨関節動態計測・解析法 ● ● ●

画像位置・重ね合わせ技術

近年の医用画像装置の急速な発展やコンピュータ処理技術の進歩に伴い、複数画像間の位置・重ね合わせ（レジストレーション）技術はコンピュータ支援診断やコンピュータ支援手術に応用されるようになった。医用画像処理の中でも、画像のレジストレーションは、セグメンテーション（対象領域抽出処理）と同様、重要な要素技術の一つである。たとえば、CT（Computed Tomography）や

MRI (Magnetic Resonance Image) 装置から得られる形態学的情報をもつ画像と、PET (Positron Emission Tomography) や SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) などの機能情報をもつ画像をレジストレーションし可視化することで、より多くの情報量をもった画像が得られ、診断精度の向上が期待できる。画像のレジストレーションは、2次元-2次元(2D-2D)画像どうしで行われるものから、ボリュームやサーフィスデータを用いる3次元-3次元(3D-3D)画像、手術ナビゲーション等に応用される3D-実空間画像といった目的・用途に応じてさまざまな形を取りうる。以下では、骨関節の精密動態計測・解析にきわめて有用であり、現在世界でもスタンダードになりつつある2D-3Dおよび3D-3Dレジストレーション手法について技術的側面から中心に述べる。

2D-3D レジストレーション

2D画像と3D画像を用いる2D-3Dレジストレーションの技術は、近年、高精度医用画像が容易に取得可能となったことや、コンピュータの性能向上、およびレジストレーションアルゴリズム自身の改良により、医療への応用分野も幅広くなっている。放射線治療の分野では、治療前の3D-CT画像と治療中に得られる2D-X線透視画像を用いてレジストレーションを行い、照射野の位置補正や患者の体動補正に応用されている^(1,2)。整形外科や脳外科などの領域では、手術支援や低侵襲手術などを目的として、術前の3D-CTやMRI画像と術中の2D-X線透視画像のレジストレーション技術が用いられる^(3,4)。また最近では、腹腔領域の内視鏡下手術においても、2D-内視鏡画像をベースに、同様の技術応用が試みられている。2D-3Dレジストレーション技術の威力が大いに発揮されるのが、骨格系の運動バイオメカニクスの分野である。動態情報が取得容易な2D-X線透視画像と解析対象の3D-既知形状モデルを用いることで、時間軸を含めた3D動態解析が可能となる。

骨格関節部のようなダイナミックな3D運動を解析対象とする場合、皮膚マーカを用いた3Dセンサーによる方法は、荷重時のダイナミックな動きを容易に計測可能であるが、動きに伴う骨部とのマーカ位置に大きなズレが生じ、正確な3次元位置情報が得にくいなどの問題が生じる。また、CTやMRI装置を用いた直接計測法は、正確な3次元位置情報が得られる一方で、関節荷重時のダイナミックな運動を行うだけの物理的スペース・時間分解能がなく、詳細な動態情報を取得するのが困難である。さらに、人工関節が解析対象となると、金属アーチファクトの影響が生じ、画像解析は困難をきわめる。このような背景から、現在、特に人工関節の3D動態解析においては、X線透視画像を用いた2D-3Dレジストレーション技術の適用が主流となっている⁽⁵⁻⁹⁾。

2D-3Dレジストレーションには、大別して輪郭情報を用いる特徴ベースレジストレーションと画素値情報を用いる濃淡ベースレジストレーションの2つの手法があり、解析対象の形態、要求精度、計算時間(リアルタイム性の有無)等により目的に応じて適用が異なる。人工関節の3D動態解析については、比較的複雑な形状を有するX線投影画像が得られ、精度・計算時間の点から特徴ベースレジストレーションによる解析が好まれる傾向にある。ここでは、以降の節で取り上げる人工関節の3D動態解析に適用される特徴ベースの2D-3Dレジストレーション手法について概説する。

図1は、X線透視撮影によって得られた人工膝関節のX線投影画像を示す。取得された画像は、中心投影像と見なすことができ、X線透視撮影系の幾何学的パラメータと人工膝関節モデルの3D幾

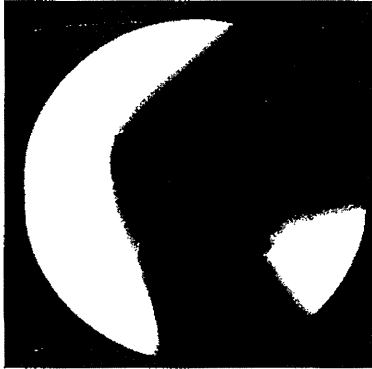


図1 人工膝関節のX線投影画像
X線透視撮影により得られた人工膝関節の画像（際内の黒い部分）を示す

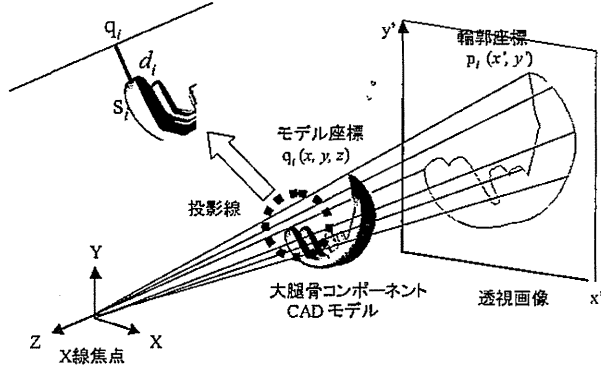


図2 X線透視画像（輪郭画像）からの人工膝関節の位置・姿勢推定
X線焦点と画像上の輪郭点を結ぶ全投影線に、CADモデルが当てはまるよう位置と姿勢を推定する

何学的形状が既知であれば、X線画像からの対象モデルの3D位置・姿勢を推定できる。一般に、X線透視撮影系の幾何学的パラメータは、キャリブレーションキューブを用いて算出し⁽¹⁰⁾、人工関節の3D幾何学的形状情報は設計図であるCAD（Computer Aided Design）モデルを利用する。人工関節の3D動態は、全ての連続X線画像に対して対象モデルの位置・姿勢推定を行うことで、解析が可能となる。位置・姿勢推定に用いる2D-3Dレジストレーションアルゴリズムの基本原理は、“X線焦点と画像上の輪郭点を結ぶ全投影線が、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”というコンセプトに基づいている（図2）。したがって、全投影線とモデル表面間の距離値の総和 d_i を評価関数 E と定義することで、モデルの位置・姿勢推定問題を、距離値の最小化問題として取り扱うことができる。

$$E = \sum_{i=1}^N d_i^2 \rightarrow \text{最小化}$$

つまり、各投影線から最短距離に位置するCADモデル表面上の3D座標点と、投影線上の3D座標点のペアを全て計算し、それらデータセットから剛体変換によってCADモデルを回転・移動させ、上記の評価関数 E が最小値となるまでこの過程を繰り返すことで位置・姿勢を推定する。この方法は、ICP（Iterative Closest Point）法⁽¹¹⁾による表面形状ベースレジストレーションによく類似している。

3D-3D レジストレーション

3D-3D レジストレーションとは、文字通り3D画像と3D画像どうしの位置・重ね合わせを意味しており、コンピュータ支援診断やコンピュータ支援手術に広く応用されている技術の一つである。3D画像とは、一般に、前述したCADモデル（三角パッチ等の多角形の面で構成されたサーフィスデータ）の他、CT画像やMRI画像などのスライス画像を積層して作成した画像を指し、濃淡情報（2D画像ではピクセル値に対して、3D画像ではボクセル値と呼ぶ。）をもつボリュームデータと、濃淡情報を除去して多角形の面のみで対象モデルの表面形状あらわしたサーフィスデータとがある。3D-3D

レジストレーション技術の応用例としては、近年、手術支援（手術ナビゲーション）や手術シミュレーション、放射線治療計画等へ積極的に導入されており、コンピュータの性能向上とともに、レジストレーションの高速化、更なる高精度化が可能となりつつある技術である。

骨格関節部への3D動態計測・解析に応用する場合、目的とする動きを異なる時相でCTやMRI装置を用いて直接的に計測・解析する際に必須となる技術である。すなわち、連続的な異なる時間に同一モダリティによって3D画像を取得し、各画像を比較（3D-3Dレジストレーション）することにより、時系列的な3D動態の計測・解析が可能となり、静的な3D動態を正確に把握する際に威力を発揮する。以下では、濃淡情報をもつボリュームデータを用いたボクセル濃淡ベースレジストレーションと表面形状モデルのみを用いた表面形状ベースレジストレーションについて概説する。これら3D-3Dレジストレーション手法が、以降の節で取り上げる各骨関節の3D動態計測・解析に応用される。

ボクセル濃淡ベースレジストレーションは、2つの3D画像のボクセル値の類似度を調べることによってレジストレーションを行う。3D画像中のすべてのボクセル値情報を用いるため、比較的安定したレジストレーションを行うことが可能となる。類似度を計る尺度としてはいくつかの手法が提案されており⁽¹²⁻¹⁵⁾、ここでは2つの画像の相関係数を用いる手法について述べる。各々の画像のボクセル値を $A(i, j, k)$ 、 $B(i, j, k)$ とすると、相関係数を表す以下の評価関数 R を定義することで、モデルの位置・姿勢推定問題を、相関係数を最大化する問題として取り扱うことができる。

$$R = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^L \left\{ (A(i, j, k) - \overline{A(i, j, k)}) \times (B(i, j, k) - \overline{B(i, j, k)}) \right\}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^L (A(i, j, k) - \overline{A(i, j, k)})^2 \times \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^L (B(i, j, k) - \overline{B(i, j, k)})^2}} \rightarrow \text{最大化}$$

すなわち、剛体変換によって対象モデルを回転・移動させながら、相関係数 R が最も高くなるようなモデルの位置・姿勢を推定することになる。本手法は、二つの画像が比較的似ている画像や同一モダリティどうしのレジストレーションに向いており、コントラストが大きくことなる画像どうしではうまく実行しないなどの問題が生じる。

表面形状ベースレジストレーションは、2つの画像のサーフィス（表面）間が最も近い距離になるようなレジストレーション手法である。したがって、本質的には先に述べた特徴ベースの2D/3Dレジストレーションと類似しており、同様の評価関数 E を定義することになる。一方の3D画像は点群、他方の3D画像は三角パッチとしてデータをもたせ、点群と最も近い三角パッチ上の点を探し、それらデータセットから剛体変換によって対象モデルを回転・移動させ、評価関数 E が最小となるまでこの過程を繰り返し位置・姿勢を推定する。この手法は、ボクセル濃淡ベースレジストレーションに比較して、高速にレジストレーションが可能であるが、精度・安定性については、対象モデルの形状に大きく依存するという欠点をもつ。

以上、2D画像と3D画像、および3D画像と3D画像のレジストレーション法について簡単に述べ

たが、以降の節ではこれらレジストレーション手法を用いた人工関節および各種骨関節の動態計測・解析データを示し、その臨床的意義について述べる。

● 3 ● 人工関節の動態 ● ● ●

本節では、まず「人工関節」について述べ、次に臨床医学的視点からその「対象疾患」および「問題点」を簡単に言及する。人工関節の3次元動態について、主として膝関節の計測・解析データとその臨床的意義を述べ、最後に他の人工関節への応用例も示す。

人工関節とは

人工関節とは変形性関節症や関節リウマチなどにより関節軟骨が変性もしくは破壊され、関節運動時の疼痛・可動域制限・不安定性・機能障害を生じた患者に行う手術術式の一つであり、疼痛の緩和に加え関節機能の再建を目的としている。2006年の統計では、日本全国で約9万件の人工関節置換術が施行されている。そのうち、膝関節の人工関節置換術は年間約5万件、股関節では年間約3万5千件行われており、共に10年前と比較するとおおよそ2倍の症例数となっている。新しい手術方法の開発や人工関節デザインの開発に伴い人工関節の症例数は年々増加の傾向を示している。

治療の方法は虫歯の治療方法と相重なる部分がある。すなわち、疾患により障害を受けている関節軟骨及び軟骨下骨を正確に削り取り、金属やセラミックからなる人工関節コンポーネントをはめ込むというものである。関節は通常2つの骨から構成されているため、その2つの骨双方に人工関節コンポーネントを挿入する。さらに2つの金属コンポーネント間には主に軟骨代替部となるポリエチレンでできたインサートを挟み込むことにより、スムーズな関節運動を可能としている(図3)。人工関節コンポーネントの内、関節摺動面と呼ばれるポリエチレンと接触する部分是对摩耗性に強いコバルトクロム合金やアルミナ・ジルコニウムといったセラミックが用いられている。ポリエチレンに関しても、対摩耗性を向上させるために製造過程で様々な工夫がなされている。

手術後は施設により異なるがおおよそ1か月のリハビリテーションが行われ、可及的速やかに歩行

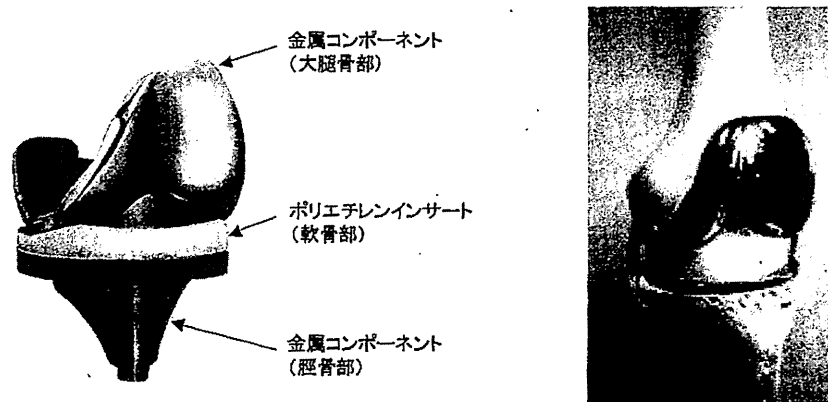


図3 人工膝関節(左図)と擬似骨に挿入・置換された人工膝関節(右図)の例

可能となる。費用に関しては3割負担患者が1ヶ月半入院した場合、約70～80万円の窓口負担となる。しかし、高額療養費の申請手続きを行えば、自己負担限度額を超えた額は支給される。

対象疾患

人工関節置換術が適応となる対象疾患は、主として変形性関節症および関節リウマチである(図4)。変形性関節症とは、軟骨の摩耗、骨棘形成、変形など関節構成体の退行性変化と増殖性変化を示す疾患であり、膝関節の場合、明らかな原因がなく加齢に伴い起こってくる一次性変形性膝関節症と、外傷や特発性骨壊死に引き続いて起こってくる二次性変形性膝関節症がある。一次性変形性膝関節症の場合、内側型の変形が多い。変形が高度であり(関節裂隙がほぼ消失しているなど)、保存治療にて除痛効果が乏しい場合、手術適応となる。年齢が比較的若く、関節破壊が片側だけであり、靭帯機能が残存している場合は、骨温存できる矯正骨切術を行うことがあるが、年齢が高い場合や関節破壊が大きい場合は人工関節置換術を行う。人工関節置換術には現在、大腿下腿関節の片側のみを置換する単顆片側関節置換術(UKA: Unicompartmental Knee Arthroplasty)と膝蓋大腿関節を含め大腿下腿関節の内側外側を置換する人工膝関節全置換術(TKA: total knee arthroplasty)がある。

関節リウマチは、免疫機能亢進を基盤とする慢性炎症性自己免疫疾患であり、全身の関節に生じる疾患である。膝関節は2番目に多い罹患関節であり、荷重関節のため罹患すると日常生活動作が著しく障害される。関節破壊は変形性膝関節症と異なり、外側や関節面全体に及ぶことが多い。保存治療を行っても関節破壊が進行し、機能障害や日常生活動作障害が改善しない場合、手術適応となる。膝に行う手術としては、関節破壊が小さい場合、除痛・炎症改善を目的として滑膜切除術を施行することがあるが、関節破壊が大きい場合には、人工膝関節全置換術を施行する。

問題点

現在、整形外科領域での手術において、人工膝関節、人工股関節などの人工関節置換術は一定の評

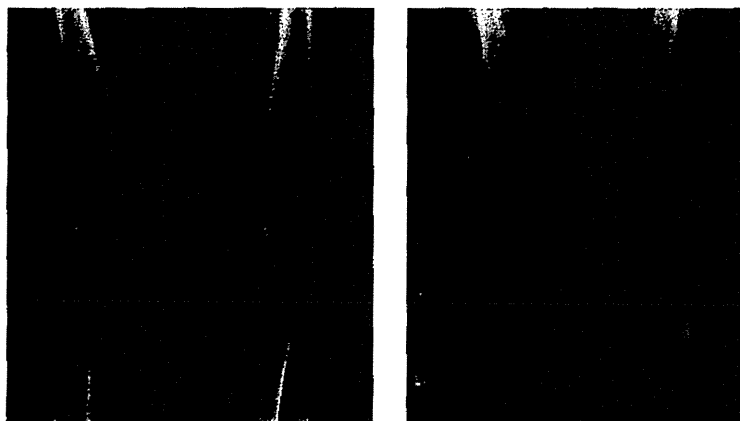


図4: 変形性膝関節症(左図)および関節リウマチ膝(右図)の単純X線画像。変形性膝関節症については、外側型(右膝)と内側型(左膝)を示す。

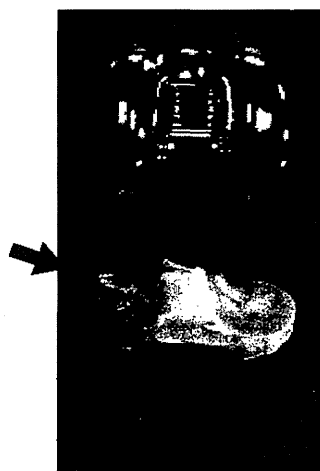


図5 人工膝関節のポリエチレン摩耗
種々の原因によって摺動面の材料となっている
ポリエチレン（軟骨代替部）に摩耗が生じる

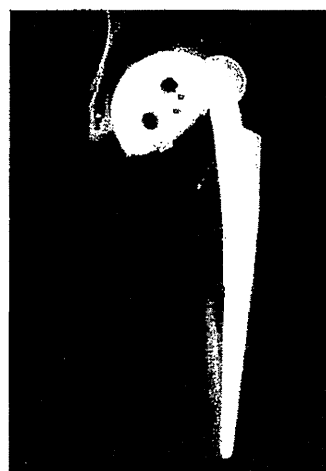


図6 人工股関節の脱臼
構造的な安全可動域を超える
と脱臼を起こすことがある

価を得たものとなっているが、未だ解決していない問題が多々存在する。まず人工関節コンポーネントは、最新の技術によって作られているが、人工物であるがゆえにその耐久性には限界がある。種々の原因により摺動面の材料となっているポリエチレンに摩耗（図5）が起こり、その摩耗粉が骨と人工関節コンポーネントとの界面に入り込むことによって骨融解を招き人工関節に緩みを生じる⁽¹⁶⁾。また、人工関節置換術後の関節可動域は、正常の関節可動域と比べて小さいことが多い。さらに人工股関節に関しては、その構造上、可動域の安全範囲があり、それを超えると人工関節の脱臼を起こすことがある（図6）。

これらの問題は、人工関節デザインや使用材質、手術操作等に依存するところが大きく、人工関節の動態と密接にかかわっていることが知られている。したがって、術後人工関節の正確な動態を計測・解析することはきわめて重要であり、精密かつ詳細な解析は、新しい人工関節の開発や手術手技を確立するために必要不可欠となっている。古くは、X線透視画像のみを使用した2次元的な関節の動態計測・解析が実施されてきたが、前述のような問題点を解決・改善するだけの十分正確な動態データが必ずしも得られないため、近年では3次元的な動態計測・解析が必須となっている。

人工膝関節動態解析

1990年代の後半から、生体内における人工膝関節の正確な3次元動態を計測・解析することを目指して、2次元動画情報が取得可能なX線透視画像と人工関節CADモデルを用いる2D-3Dレジストレーション手法の応用が数多く試みられてきた⁽⁵⁻⁹⁾。ここでは、前節で述べた2D-3Dレジストレーション手法を用いて得られた人工膝関節の3次元動態計測・解析結果の一例を示し、その臨床的意義について言及する。

図7は、人工膝関節術後患者（右膝）に対して荷重下屈曲動作（スクワット動作）を施行してもら

い、一連の3次元動態を可視化した結果（各X線画像に人工膝関節CADモデルをレジストレーションした結果）と、3次元動態の定量データを示したものである。人工膝関節の3次元運動をあらわす定量データは、脛骨に対する大腿骨コンポーネントの相対的な位置・姿勢で表記している。図に示す症例では、膝の最大屈曲可動域は、約130°まで認められ、膝屈曲運動に伴い最大約16°の大腿骨外旋と、約19mmの大腿骨後方移動（frame number：19～111）を確認することができる。また、屈曲角度105°以降から大腿骨の外転運動（最大約5°）が観察される（frame number：77～111）。図8は、この荷重下屈曲動作時において、任意のフレームでの脛骨に対する大腿骨コンポーネントモデルの相対的な位置・姿勢の変化を示したもの（図の上段）と、その間のポリエチレンインサートモデル表面の接触域を可視化したものである（図の下段）。このときの屈曲角度はそれぞれ、0°、32°、66°、88°、111°であり、インサート表面上の赤色部が擬似的な接触域の可視化結果である。接触域の位置の変化から、大腿骨コンポーネントの外旋運動が容易に判別できる。また、接触域は、屈曲運動に伴い減少

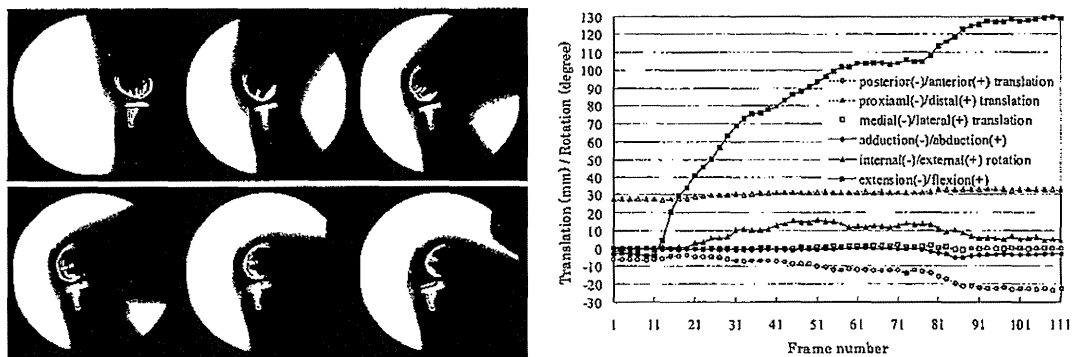


図7 人工膝関節術後患者（右膝）における3次元動態解析結果の一例（荷重下屈曲動作時）

各X線画像に人工膝関節CADモデルをレジストレーションした結果（左図）と、脛骨に対する大腿骨コンポーネントの相対的な位置・姿勢定量データ（右図）を示す。

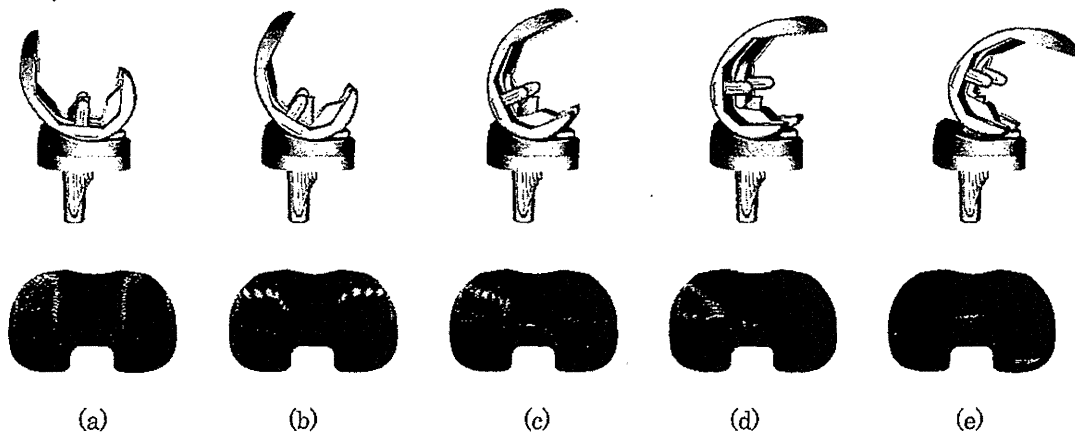


図8 図7の荷重下屈曲動作時における任意のフレームでの脛骨に対する大腿骨コンポーネントモデルの相対的な位置・姿勢の変化（図の上段）と、その間のポリエチレンインサートモデル表面の接触域の可視化結果（図の下段）（口絵11）

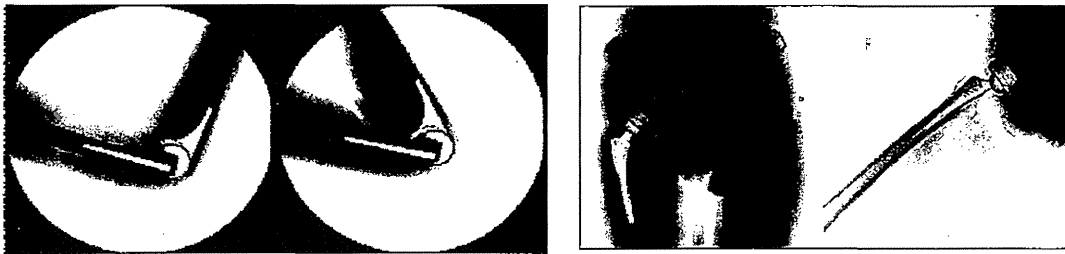


図9 人工肘関節（左図）および人工股関節（右図）における動態解析の例
各 X 線画像に人工関節 CAD モデルをレジストレーションした結果を示す。

傾向に見られるが、これは大腿骨コンポーネントが徐々にインサートのエッジ部に近づき、両コンポーネント表面間の一致度が減少しているからである。屈曲角度が最大付近に達したとき（図8(e)上段）、内側面の接触域は観察されていないが（図8(a)下段）、これは前述した大腿骨コンポーネントの外転運動（浮き上がり）によるもので、可視化によりそのような動きも容易に捉え理解することができる。さらに、インサート表面上の内外側面の接触域と同様に、中央の突起部（post-cam）に接触が見られたのは非常に興味深く（図8(c)-(e)下段）、これは膝の後十字靭帯に相当する部位であり、post-cam 機構の機能評価が行える可能性を示している。

このように、本例一つを取り上げてみただけでも、術後人工膝関節の3次元動態を計測・解析することは臨床的にきわめて意義が大きい。人工膝関節の問題点でも触れたが、そのデザインや手術操作等の違いにより、しばしば関節の不安定な動きや不良運動を引き起こし、結果としてインサートの磨耗や術後疼痛、再手術に至る場合が度々生じる。したがって、人工関節自身の改良や手術手技・治療法の改善、また術後経過観察の点から動態解析により過度の磨耗の可能性がないかなど、インサートの接触域のバランス等を含めた評価をしておくことは重要となる。異なる人工関節デザインによる動きの相違や、さまざまな日常動作における新しい知見など、今日においても非常に臨床的に有用な情報が提供されている⁽¹⁷⁻¹⁹⁾。

他の人工関節への応用

前述の人工膝関節置換術後の3次元動態解析に用いられている2D/3Dレジストレーション手法を応用して、現在、膝以外の他の人工関節の術後生体内動態解析も開発・実施されている。比較的小さな関節の代表として人工肘関節、大きな関節の代表として人工股関節の例を図9に示す。人工肘関節は屈曲動作に加えて、伸展動作や捻る動作等の解析が可能となっている。股関節は関節可動域の非常に大きな関節であり、歩行・しゃがみ込み・外開きなど、さまざまな動作の3次元解析が注目を浴びている。

● 4 ● 骨関節の形態・動態 ● ● ●

本節では、「骨関節のしくみ」について概略を述べたあと、肘関節を例にその3次元動態解析結果

を示す。また、骨関節の形態評価、術前計画シミュレーションの観点から、医用画像を用いた3次元解析結果を示し、その臨床的意義について言及する。

骨関節のしくみ

関節とは、相対する2つあるいはそれ以上の骨を連結する構造体を指し、骨・関節軟骨・関節包・滑膜・靭帯などから構成されている（図10）。以下では、関節構造の代表的な例を取り上げて説明する。

- 関節軟骨：相対する骨面は関節面といわれ、関節を形成する骨端は薄い硝子軟骨層、すなわち関節軟骨で覆われる。関節軟骨は関節面を平滑にし、よく適合させて摩擦を減じ、その弾性によって外力に対する緩衝帯となる。
- 関節包：関節をつくる骨の骨膜は互いに連続して関節包となる。骨の間にあつて関節包で囲まれる腔を関節腔という。相対する骨は関節包で互いに連結され、関節包は関節軟骨で覆われた骨端を包み込んでいる。関節包は外内2層からできる。外層は骨膜の表層につづく丈夫な繊維性膜で、繊維膜といわれる。内層は血管に富む柔らかな膜で、滑膜といわれている。滑膜は滑液という粘稠な液を分泌する。滑液は関節腔を満たし、関節腔の内面を潤滑にして摩擦を減じ、また関節軟骨に栄養を与える。
- 靭帯：靭帯は関節包を補強する紐状の結合組織繊維束で、一般に関節包に癒着する。靭帯は一般に関節包の外側にあるが（関節外靭帯）、ときに関節腔内にある（関節内靭帯）。靭帯は関節包を強化し関節の安定性に寄与するとともに関節の過度の運動を阻止して損傷を防ぐ。

このような関節構造をなす関節が運動を行うためには、主として筋肉が大きく関与し、筋肉の収縮により関節に動きをもたらす。筋肉の大部分は骨に付着しているため、筋肉は関節の運動・固定に重

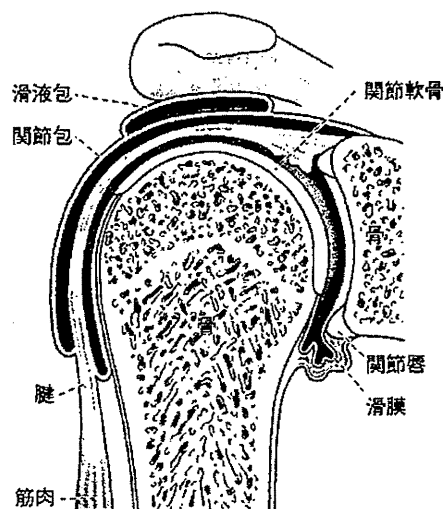


図10 可動関節の構造（肩関節の例）
<標準整形外科, 第10版, 医学書院, P.36より転載>