

すべてが変わったリハビリテーションの概念と治療体系

大阪大学大学院医学系研究科 運動器バイオマテリアル寄附講座

菅本 一臣

邦文要旨： 運動器は皮膚に被覆されているためにこれまでその動きに関して十分には明らかにされてこなかった。従来の研究手法では様々な欠点があったのである。我々の教室では十数年前より独自に骨関節の3次元動態を解析するシステムを開発してきた。

これは従来のCT, MRI, X線イメージ装置を用いて3次元動態解析を行うという技術である。一つの方法はX線イメージ画像からその画像が撮影された骨の空間位置座標を推定するものである(2D3Dレジストレーション法)。さらにもう一つは関節動態の軌跡上での複数肢位でCTまたはMRI撮影を行い、各肢位で撮像された画像から骨の移動距離、移動回転角度を算出する方法である(voxel based registration)。これらの方法は組み合わせたり、応用活用することでほぼすべての骨関節の動きを解析できるようになった。これを用いることにより手術およびその後のリハビリテーション治療体系が大きく変わろうとしている。

Key words: bone and joint, 3D kinematics, in vivo, range of motion, ROM exercise

I. はじめに

リハビリテーションにおける理学療法や作業療法の最も基本となる訓練に関節可動域訓練と筋力増強訓練がある。関節可動域訓練ではその中心になる骨関節の3次元の動きのメカニズムを知らなければ効率的な訓練はできない。やみくもな訓練は全く意味のないものである。

しかしその一方で、骨関節の3次元の動きは生きた人間では皮膚におおわれているために直接観察することができない。例えば肩関節の動きの際には肩甲骨は皮膚の下を大きく活動している。それを理解して訓練を行わなければならない。本章では文章の字数の制限上すべての関節に関して言及できないが、いくつかの代表的な関節に関して、さらにその一部を紹介する。

II. 生体内での骨関節の3次元動態解析

近年、我々の施設ではオリジナルのコンピュータ動態解析システムを確立しているが、これは従

来のCT, MRI, X線イメージ装置を用いて3次元動態解析を行うという技術である。一つの方法はX線イメージ画像からその画像が撮影された骨の空間位置座標を推定するものである。レントゲン像はいわば骨の影絵であるから、その画像を元に撮像された骨の正確な空間位置座標を開発したコンピュータプログラムにて推定することができる。

(2D-3Dレジストレーション法^{1,2)})さらにもう一つは関節動態の軌跡上での複数肢位でCTまたはMRI撮影を行い、各肢位で撮像された画像から骨の移動距離、移動回転角度を算出する方法である(voxel based レジストレーション法)。これらの方法は組み合わせたり、応用活用することでほぼすべての骨関節の動きを解析できるようになった^{5,6)}。

1. 2D-3D レジストレーション法¹⁻³⁾

X線投影画像はいわば骨の影絵を示している(図1)。その影絵を得るための人工関節の空間位



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（黒部）を示す。

置および向きはただひとつしかない。よって人工膝関節の CAD データが既知であれば、これらを正確に算出できる。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）。

2. voxel based レジストレーション法³⁻⁵⁾

骨関節の 3D 動態解析を行うにあたっては通常の CT や MRI 装置を用いる。例えば肘関節の屈伸運動は、図3に示すように最大屈曲位から最大伸展位の約 30 度刻みでの 4~5 ポジションで 3 次元 MRI を撮像する。各画像での上腕骨、橈尺骨を抽出しその同一骨どうしをボクセル濃淡ベースでのレジストレーション（MRI 画像における各骨要素の intensity（輝度値）は CT 画像でいう CT 値に相

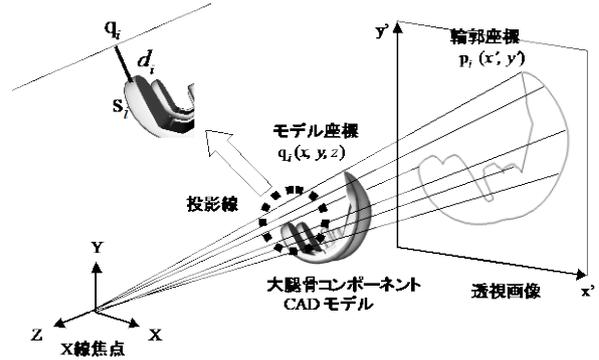


図2 X線透視画像（輪郭画像）からの人工膝関節の位置・姿勢推定

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。

当する)を行うことにより 3次元移動量が算出できる。またその画像の間をコンピュータで補間することによって、いわばコンピュータによるパラパラ漫画を作成する。肘関節の屈伸の動きを解析してみるとそれは単純な蝶番様の動きではなく、内顆は一定であるが外顆はある一定の法則性を持って回転軸が偏位しているのがわかる⁶⁾（図4）。

III. 動きの多様性をもたらす骨関節運動の画一性

首や手首は様々な方向にグリングリンと動かすことができる。その場合、そのもととなる骨関節も同様に様々な方向へ動いているように思われる方が多いと思う。しかし、多くの関節ではそうではなくて、関節はある方向に決まった動きをすることが多い。しかし、その近接する関節の動きとうまく連動しながら、最終的に全体としての関節部は様々な方向に動くことが可能となる。



図3 肘関節の運動例

運動を 4~5 分割し、各肢位画像を 3 次元 MRI 装置にて取得する。

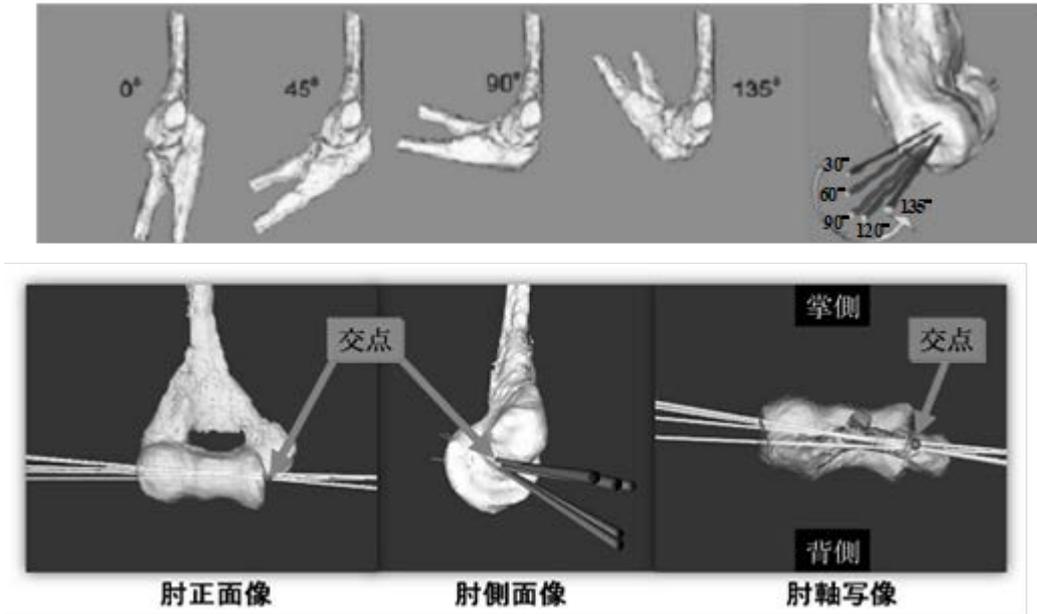


図4 生体内3次元動態解析による肘関節屈伸運動（上段）とその屈伸運動における回転軸の動き（下段）
肘関節部の屈伸運動は一軸性の回転運動ではなく、上腕骨（肘関節）内側にある側副靭帯付着部に回転中心（回転軸の交点）が存在する多軸性の運動であることを示す。

1. 頸椎の3次元動態⁷⁻⁹⁾

頸椎は7つの骨で構成されている。その中で第1, 2頸椎は特徴的な形と動きをしているので後述することにして。

第3から第7頸椎はほぼ同様の基本構造をしている（図5）。前方は椎体とその上下には重みを支える椎間板が存在する。後方は左右に一つずつ前方にせりあがった形で傾斜している椎間関節がある。椎間関節はその形態から動きを知ることができる。それは下関節突起がせり上がるかせり下が

るかの1方向の単純な動きである。左右の関節で見ると、必ず逆の動きが行われることになる（図6）ために、第3頸椎から第7頸椎で見ると必ず一定の動きしかできない。

これを知ったうえで頸椎の回旋運動と側屈運動を比較してみよう（図7）。一見全く異なる首の動きであるために、各頸椎の動きは大きく異なるように感じるが、第3頸椎から第7頸椎の動きは全く同じである。



図5 頸椎の基本構造

前方は椎体とその上下には重みを支える椎間板が存在する。後方は左右に一つずつ椎間関節がある。中央を脊髄神経が通っている。

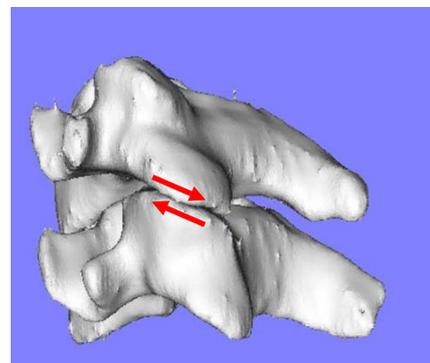


図6 側面から見た第4, 5頸椎とその間の椎間関節

椎間関節は前方に傾斜している、左右にある関節部で骨がせり上がる、ずり落ちる動きを互に行うことによって、頸部の側屈、回旋運動が行われる。

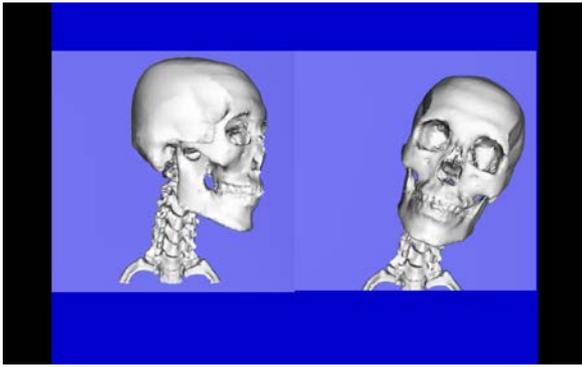


図7 頸椎の回旋運動（左）と側屈運動（右）

ではどうして首の動きを変えることができるのであろうか？その答えは頭蓋骨と第1, 2頸椎の動きにある。第1, 2頸椎間の動きは第2頸椎の歯突起を中心に第1頸椎が大きく回旋する。その際に前後屈、さらには沈み込みといった付随する動きが行われる（カップリングモーション）。さらに頭蓋骨第1頸椎間では頭蓋骨が主に前後屈の動きが行われる。

この2種類の動きがキーとなって、第3から第7頸椎の動きは全く同じであるのにも関わらず、首は回旋したり、側屈したりすることができるのは頭蓋骨と第1, 2頸椎の動きが補完を行っているからである。

2. 手関節の3次元動態^{4,5,7)}

手関節の屈伸運動は、最大屈曲位から最大伸展位の約30度刻みでの4~5ポジションで3次元

MRIを撮像する。その画像の間をコンピュータで補間することによって、いわばコンピュータによるパラパラ漫画を作成する。手関節の屈伸の動きを解析してみると、掌背屈、撓尺屈、ダーツモーションの如何にかかわらず、遠位手根骨の動きはほぼ一軸性でしかも同一であることが明らかとなった（図8）。手根骨の月状骨や舟状骨は手関節のどのような動きに対してどう動くのだろう。手関節は屈伸や撓尺屈に対して驚くべきことに遠位手根骨は常に一定の一軸性の動きをする。近位手根骨はその動きを補完することによって手関節は屈伸も撓尺屈といった動きとしては90度異なる動きをさせることも可能となる。一方遠位手根骨の運動軸は丁度手関節のダーツスローをする方向に向いているために、手関節のダーツスロー運動では近位手関節は殆ど動かずに済む。

この原理を理解するのに直行して並べたコロの上にボードを置いたモデルを考えてみるとよくわかる（図9）。

直行する2枚のボードの前後や左右に動かすタイミングを変えることによって、ボードに立たせた人形はどちらの方向にも動かすことができる（二つのベクトルの総和で合計ベクトルはどの方向にも向けることができる）。

3. 肩鎖関節の3次元動態^{7,10,11)}

上肢を挙上させるにしたがって、上腕骨はもち



図8 手関節部の動きの違いと遠位手根骨の運動軸の同一性

左上：手関節の掌背屈運動と遠位手根骨の運動軸

右上：手関節の撓尺屈運動と遠位手根骨の運動軸

右下：ダーツモーションと遠位手根骨の運動軸

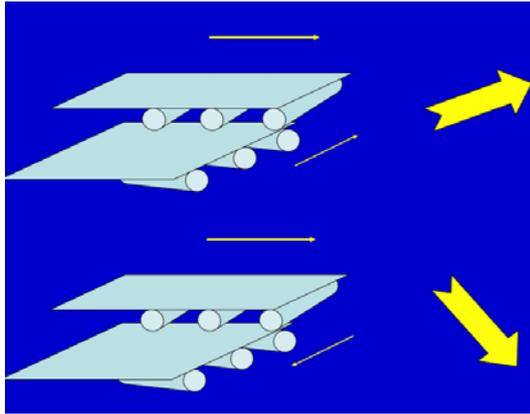


図9 手関節部の動きを考えるための2枚のボードと直行するコロのモデル
 上のボードを左右, 下のボードを前後にずらすタイミングを変えることで移動の方向は自由に変えることができる。

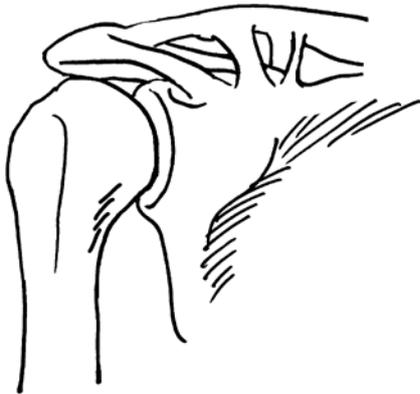


図11 烏口鎖骨靭帯
 菱形靭帯と円錐靭帯からなり, 両者は烏口突起からVの字に分かれて鎖骨に付着している。

ろん肩甲骨も大きく動く。その一方で鎖骨も肩甲骨に連結されているために、鎖骨自体も大きく動くことは知られていたが、肩鎖関節となるとほとんど動きがないものと考えられてきた。しかし、生体内での解析を行ってみると肩鎖関節は一定の軸周りに大きく動くことが明らかとなった。一定の軸とは烏口突起と肩峰を結ぶ直線であり、この軸を中心にして鎖骨は大きく左右に回転する(図10)。

補足であるが、鎖骨のその動きを安定的に行うことができるように、烏口鎖骨靭帯がある。靭帯

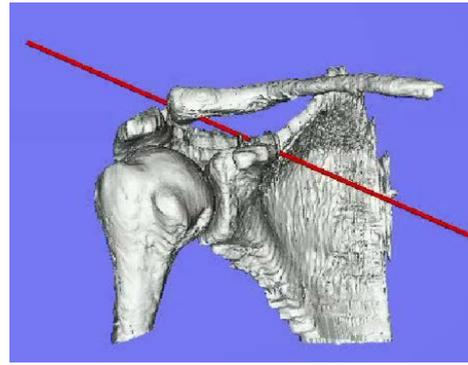


図10 肩鎖関節の運動軸
 鎖骨は肩甲骨に対して烏口突起と肩峰を結ぶ軸周りに回転する。

は菱形靭帯と、円錐靭帯というV字状に分かれた2本の靭帯で構成される。その靭帯がなぜ、その位置にV字状に分割されて存在しているかは、肩鎖関節の動きを考えると理解がしやすい。V字状の2本の靭帯があつてこそ、はじめて鎖骨の回転軸周りで左右の大きな動きが安定的に可能となる(図11)。

なぜ靭帯がその場所にあるのか? どんな役割をしているのかは、関節の動きを安定化させ、さらに動きを制限せずスムーズな動きを可能にするように最適に形作られていることがわかる。

肩鎖関節の動きとそれに伴う靭帯の構造を見るだけでも、人間の巧みに計算された無駄のない素晴らしい構造に敬服するばかりである。

4. 足関節の3次元動態^{7,12)}

足関節部の大きな動きとして、底背屈運動と内外反運動がある。両者の運動方向は全く異なるものであるが、その近傍にある距踵関節の動きは底背屈運動と内外反運動といった異なる動きにかかわらず一定の動きをする(図12)。そもそも距踵関節はどのような形態をしているのであろう。踵骨にある前、中、後関節面(一部に中と後関節面が癒合したものもある)は一見独立して、様々な向きをしているように見えるが、図12に示したような斜め上を向いた関節の運動軸に対してスムー

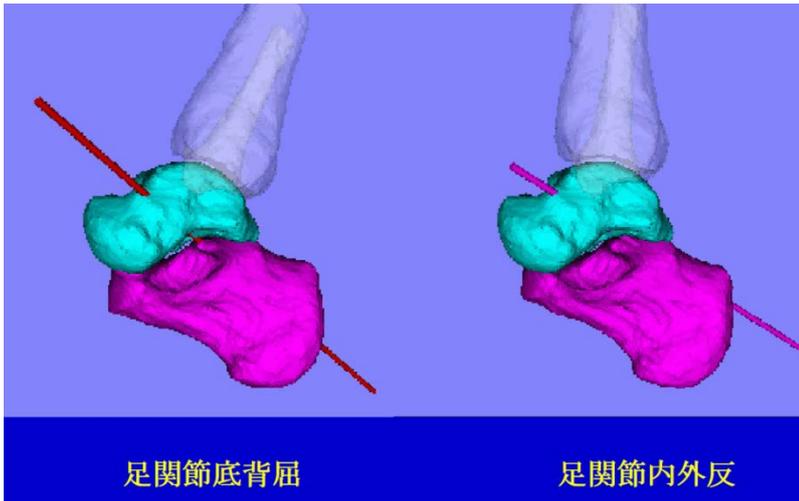


図 12 足関節の底背屈運動と内外反運動における距踵関節の動きの同一性

足関節の底背屈運動と内外反運動において距踵関節の運動軸は斜め上の同じ軸を示す。



図 13: 踵骨における距踵関節（前，中，後関節面）

図 12 に示す距踵骨関節の運動軸まわりの運動を妨げないように距踵関節（前，中，後関節面）は運動軸を通る立体的に同じ球体面上に位置している。

ズに回転できるように合理的な配置をしている（図 13）。さらにそれが底背屈運動と内外反運動といった全く異なる運動においてもこの関節は同じ動きのみをするのである。

足関節部の動きでは底背屈運動と内外反運動，さらには足関節をグリングリンと大きく回す動きも可能である。その際に関係する関節として遠位脛腓関節やさらには荷重による距舟関節なども関与して，それぞれに合った合目的な動きをする。ここでは紙面の関係上言及しないが，それらの関節も理にかなった動きをしているのである。

IV. まとめ

手根骨の月状骨や舟状骨は手関節のどのような動きに対してどう動くのだろう。それを知っているか知らないかによってそれらの骨折患者に対するリハビリテーションのやり方は大きく変わってくる。骨折がある場合には前腕から指にかけてギプス固定をし，そのあとは拘縮した手関節に対してゆっくりと様々な方向への可動域訓練を行うのがこれまでの一般的なリハビリテーションの方法であった。しかし月状骨や舟状骨の動態メカニズムがわかればおのずとやり方が大きく変わってくるだろう。手関節は屈伸や撓尺屈に対して驚くべきことに遠位手根骨は常に一定の一軸性の動きをする。近位手根骨はその動きを補足することによって手関節は屈伸も撓尺屈といった動きとしては90度異なる動きをすることも可能となる。遠位手根骨の運動軸は丁度手関節のダーツスローをする方向へ向いているために，手関節のダーツスロー運動では近位手関節は殆ど動かずに済む。ギプスを外した後の手関節でもこの方向への可動域訓練は行なっても骨折した骨は動かないためにこの方向への手関節訓練はやって良いことがわかる。

これはその一例であるが，体の動きは非常に多様性に富んでいるために，一つ一つの骨関節の動きも自在に動くものと考えられてきた。しかしこれまでの研究から必ずしもそうではなく，各関節の動きはある法則性を持った決められたものであ

る一方で、その方向の組み合わせや動きのタイミングの組み合わせによって多様性に富んだ動きが可能となっている。その本当に基本的な骨関節動態の原理を知ることによりリハビリテーションの治療体系を大きく変化していく可能性があると考えている。

引用文献

1. Yamazaki T, Watanabe T, Nakajima Y et al: Improvement of depth position in 2-D/3-D registration of knee implants using single-plane fluoroscopy. *IEEE Trans Med Imaging*. 23: 602-612, 2004.
2. Watanabe T, Yamazaki T, Sugamoto K, et al: In vivo kinematics of mobile-bearing knee arthroplasty in deep knee bending motion. *J Orthop Res* 22: 1044-1049, 2004.
3. 菅本一臣: 骨関節の動き方を知ってリハビリテーションに活かしましょう. *Jpn J Rehabil Med* 54: SL11, 2017.
4. Moritomo H, Goto A, Sato Y, et al: The triquetrum-hamate joint: an anatomic and in vivo three-dimensional kinematic study. *J Hand Surg*. 28: 797-780, 2003.
5. Moritomo H, Murase T, Goto A, et al: Capitate-based kinematics of the midcarpal joint during wrist radioulnar deviation: an in vivo three-dimensional motion analysis. *J Hand Surg*. 29: 668-675, 2004.

6. Goto A, Moritomo H, Murase T, et al: In vivo elbow biomechanical analysis during flexion: three-dimensional motion analysis using magnetic resonance imaging. *J Shoulder Elbow Surg* 13: 441-447, 2004.
7. 菅本一臣: 骨関節の 3 次元動態 その動きの多様性と画一性からくる関節動態の神秘. *Jpn J Rehabil Med* 54: 297-301, 2017.
8. Ishii T, Mukai Y, Hosono N, et al: Kinematics of the upper cervical spine in rotation in vivo three-dimensional analysis. *Spine* 29: E139-144, 2004.
9. Ishii T, Mukai Y, Hosono N, et al: Kinematics of the axial cervical spine in rotation: in vivo three-dimensional analysis. *Spine* 29: 2826-2831, 2004.
10. Sahara W, Sugamoto K, Murai M, et al: 3D kinematic analysis of the acromioclavicular joint during arm abduction using vertically open MRI. *J Orthop Res* 24: 1823-1831, 2006.
11. Sahara W, Sugamoto K, Murai M et al: Three-dimensional clavicular and acromioclavicular rotations during arm abduction using vertically open MRI. *J Orthop Res* 25: 1243-1249, 2007.
12. Goto A, Moritomo H, Itohara T, et al: Three-dimensional in vivo kinematics of the subtalar joint during dorsi-plantarflexion and inversion-eversion. *Foot Ankle Int* 30: 432-438, 2009.

3D motion analysis of the human joint and the outcome of rehabilitation

英文抄録 : One of the purposes of rehabilitation is a joint recovery of the patients which consists of a pain relief and a normal function. The functional evaluation is essential to estimate the clinical results, and it is enabled by the analysis of the joint kinematics. Thousands of cadaveric studies were already reported but those may differ from the in vivo condition because of the lack of ligamentous or muscular effects. Development of in vivo 3D kinematic analysis system was needed for the diagnosis of pathological movement or the evaluation of postoperative function. Two systems were developed in our institute. One is a system using 3D CT or MRI and it is available for the analysis of the joint movement. The targeted joint is placed in serial positions of the motion plane to evaluate 3D kinematics of the motion, and the images are obtained in each position. The data are saved and transmitted to a computer workstation. Kinematic variables are measured by automatically. Animations of the joint movement are created from the calculated motions. The other is a system using a radiographic image intensifier. It can evaluate real-time 3D dynamic motion of the metal implant and it is available to evaluate the kinematics after the arthroplasty. The 3D pose-estimation technique is built on a 2D/3D registration algorithm, which determines the spatial pose for each component from the implant contours and computer-assisted design models of the implant. Sequential fluoroscopic images are taken in the sagittal plane.

住所 : 大阪府吹田市山田丘 2 - 2

所属 : 大阪大学大学院医学系研究科 運動器バイオマテリアル寄附講座

Osaka University Graduate School of Medicine, Department of Orthopedic Biomaterial Science

E-Mail: sugamoto@ort.med.osaka-u.ac.jp